

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**PAULO HENRIQUE SARTOR**

**MONITORAMENTO E VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:  
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA**

**PATO BRANCO**

**2022**

**PAULO HENRIQUE SARTOR**

**MONITORAMENTO E VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:  
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA**

**Measurement and verification of photovoltaic systems: Technical and  
economic analysis**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Géremi Gilson Dranka.

**PATO BRANCO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/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). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**PAULO HENRIQUE SARTOR**

**MONITORAMENTO E VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:  
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA**

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

Data de aprovação: 10/junho/2022

---

Marcelo Gonçalves Trentin  
Doutorado em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

---

Santo Tiveroli Filho  
Mestrado em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

---

Géremi Gilson Dranka  
Doutorado em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

**PATO BRANCO**

**2022**

Dedico este trabalho a minha família e a minha namorada que sempre estiveram ao meu lado e aos meus amigos por toda a ajuda prestada.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família e minha namorada por todo o apoio prestado na minha vida.

Agradeço também ao meu orientador Dr. Géremi Gilson Dranka, pela ajuda na escolha do tema do trabalho de conclusão de curso e também por todo o ensinamento passado.

Por fim, agradeço a UTFPR e todos os colaboradores pelo ambiente e materiais disponibilizados.

## EPÍGRAFE

Seja a mudança que você quer ver no mundo.  
(MAHATMA GANDHI).

## RESUMO

Buscando alternativas para o iminente aumento do consumo e da tarifa da energia elétrica, aparece como alternativa a geração de energia elétrica por meio dos sistemas fotovoltaicos. A energia solar fotovoltaica teve um grande crescimento de potência instalada nos últimos anos no Brasil, se tornando uma das fontes de geração de energia elétrica mais promissoras da atualidade no país. A pesquisa proposta nesse trabalho tem como objetivo principal implementar, de modo simplificado, a metodologia de Monitoramento & Verificação (M&V) para um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Através da análise técnica realizada no método M&V para sistemas fotovoltaicos, pode-se perceber uma geração de energia elétrica monitorada próxima da prevista em projeto. A diferença resultante entre a geração de energia elétrica prevista em projeto e monitorada foi de aproximadamente 2%. Para os três indicadores de viabilidade a análise do projeto mostrou-se atrativo, uma vez que o *payback* descontado, tanto para a economia prevista quanto para a economia monitorada foi de aproximadamente 5 anos, a TIR da economia prevista e da economia monitorada é maior que a taxa mínima de atratividade e o VPL da economia prevista e economia monitorada é positivo.

Palavras-chave: Monitoramento & Verificação (M&V); Sistemas Fotovoltaicos; Análise Técnica; Análise Econômica.

## **ABSTRACT**

Searching for alternatives to the high increase in demand and electricity tariffs, electricity generation through photovoltaic systems has been considered a good alternative worldwide. Photovoltaic systems have been considerably growing in Brazil, becoming one of the most promising sources of electricity generation in the country. The research proposed in this work aims to propose a simplified Monitoring & Verification (M&V) methodology applied to grid-connected photovoltaic systems. The results obtained from the technical analysis indicated a monitored electricity generation close to that predicted in the project. The resulting difference between projected and monitored electricity generation was approximately 2%. For the three feasibility indicators estimated, the analysis of the project proved to be attractive, since the discounted payback, for both the predicted and monitored savings, was approximately 5 years; the IRR of the predicted and monitored savings is greater than the minimum attractiveness rate and the NPV of the forecasted economy and monitored economy is positive.

**Keywords:** Measurement & Verification (M&V); Photovoltaic (PV) Systems; Technical analysis; Economic analysis.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes da radiação solar .....	21
Figura 2 - Exemplos de irradiância solar diária .....	22
Figura 3 - Ângulo azimutal do sol .....	22
Figura 4 – Ilustração de um sistema fotovoltaico <i>on grid</i> .....	24
Figura 5 - Célula fotovoltaica .....	25
Figura 6 - Célula de silício monocristalina.....	25
Figura 7 - Célula de silício policristalino .....	26
Figura 8 - Células de filme fino .....	26
Figura 9 – Principais perdas associadas a um sistema fotovoltaico .....	28
Figura 10 - Fluxograma das principais etapas de M&V .....	31
Figura 11 - Enquadramento metodológico.....	35
Figura 12 - Fluxograma simplificado do método M&V para sistemas fotovoltaicos .....	37
Figura 13 - Fluxograma referente a análise técnica e econômica.....	38
Gráfico 1 - Matriz elétrica mundial de 2020 .....	13
Gráfico 2 - Crescimento da energia solar mundial.....	15
Gráfico 3 - Matriz elétrica brasileira em 2020 .....	17
Gráfico 4 - Geração de energia elétrica no Brasil (MW).....	18
Gráfico 5 - Evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil .....	19
Gráfico 6 - Consumo mensal de energia elétrica da UC .....	41
Gráfico 7 - Geração de energia elétrica prevista da UC .....	42
Gráfico 8 - Geração de energia elétrica monitorada em 2020 .....	43
Gráfico 9 - Dados previstos e monitorados no ano de 2020 .....	44
Gráfico 10 - Geração de energia elétrica da UC no dia 04/12/2020 .....	45
Gráfico 11 - Geração de energia elétrica da UC no dia 05/12/2020 .....	45
Gráfico 12 - Geração de energia elétrica da UC no dia 21/12/2020 .....	46
Gráfico 13 - Estimativa de economia realizada em projeto para 2020 .....	47
Gráfico 14 – Estimativa de economia monitorada em 2020.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da UC referente ao estudo .....	40
Tabela 2 - Dados do dimensionamento realizado em projeto .....	41
Tabela 3 - Cálculo da média de geração de energia elétrica no ano de 2020 ....	44
Tabela 4 - Dados para calcular os indicadores de viabilidade .....	48
Tabela 5 - Resultados dos cálculos dos indicadores de viabilidade econômica .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Coef.	Coeficiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
M&V	Monitoramento e Verificação
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
Selic	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
kWh	Quilowatt-hora
MW	Megawatt
E	Energia Elétrica
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
Pv	Valor Descontado
FC	Fluxo de Caixa
Pd	Payback descontado
In	Investimento Inicial
N	Tempo de projeto
T	Período
UC	Unidade Consumidora

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização e justificativa</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>16</b>
1.2.1	Objetivo geral .....	16
1.2.2	Objetivo específico .....	16
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Energia solar fotovoltaica no Brasil</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Fundamentos da Energia solar fotovoltaica</b> .....	<b>20</b>
2.2.1	Radiação solar .....	20
2.2.2	Sistemas fotovoltaicos .....	23
2.2.3	Módulos fotovoltaicos .....	24
2.2.4	Dimensionamento e perdas nos sistemas fotovoltaicos .....	27
<b>2.3</b>	<b>Modalidades tarifárias no Brasil</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4</b>	<b>Monitoramento e Verificação (M&amp;V)</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5</b>	<b>Fundamentos sobre a viabilidade econômica de projetos</b> .....	<b>32</b>
2.5.1	<i>Payback</i> descontado .....	33
2.5.2	Taxa interna de retorno ( <i>TIR</i> ) .....	33
2.5.3	Valor Presente Líquido ( <i>VPL</i> ) .....	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Estrutura metodológica</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodologia proposta</b> .....	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Descrição do Sistema Fotovoltaico em Estudo</b> .....	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise dos Resultados</b> .....	<b>40</b>
4.2.1	Análise Técnica .....	42
4.2.2	Análise Econômica .....	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

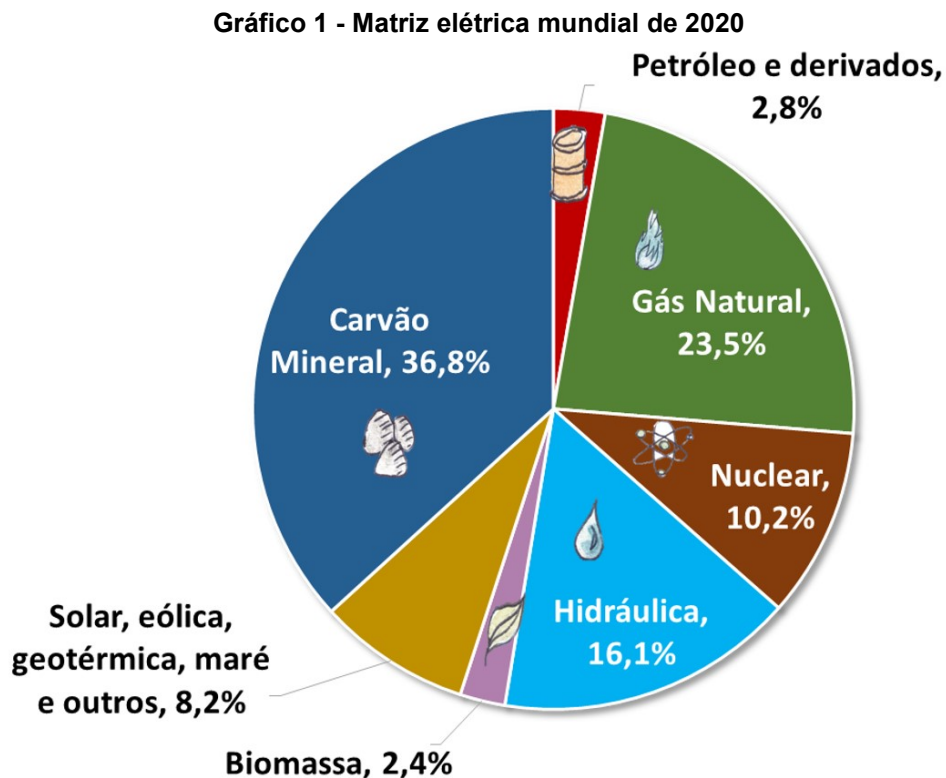
<b>APÊNDICE A - Folha de dados do módulo fotovoltaico utilizado no sistema fotovoltaico referente ao estudo de caso .....</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE B - Folha de dados do inversor dimensionado no sistema fotovoltaico referente ao estudo de caso.....</b>	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e justificativa

A geração de energia elétrica é essencial e sua importância vem crescendo de maneira expressiva no decorrer das últimas décadas, principalmente pelo seu papel fundamental nos processos de produção industriais assim como no setor de prestação de serviços e comércio em geral e do conforto nas residências (IEA, 2020). Desse modo, o aumento da utilização da energia elétrica é inquestionável, sobretudo devido ao crescimento populacional e o avanço de novas tecnologias. Para suprir essa demanda crescente, a geração de energia elétrica também precisa aumentar constantemente. Na última década, a geração de energia elétrica mundial teve um aumento de mais de 20%, por exemplo (IEA, 2020).

Como consequência do aumento da utilização de energia elétrica, também ocorre o aumento da emissão de gases de efeito estufa, uma vez que os combustíveis fósseis constituem grande parte da matriz elétrica mundial (EPE, 2019). O Gráfico 1 apresenta a matriz elétrica mundial no ano de 2020 (IEA, 2020).



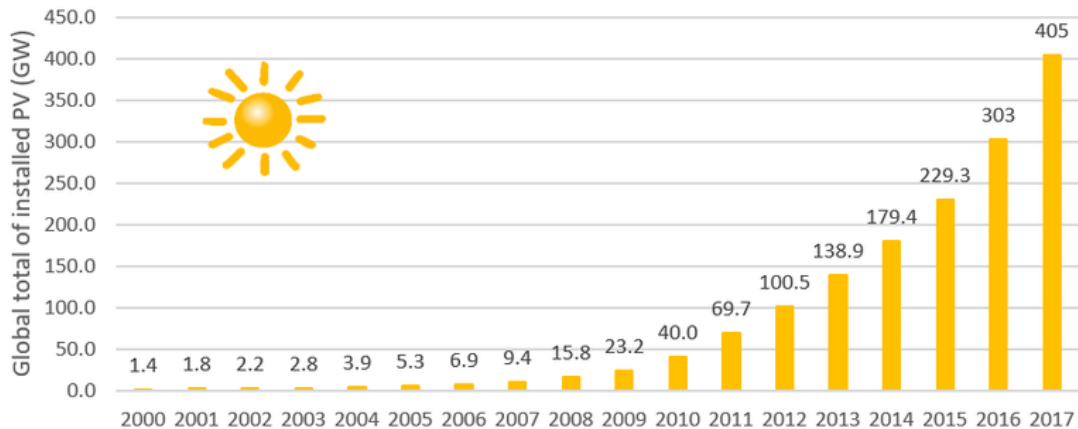
Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA, 2021)

De acordo com o Gráfico 1, a matriz elétrica mundial é composta, principalmente, por fontes não renováveis, como combustíveis fósseis, carvão, óleo e o gás natural (IEA, 2020). A dependência da matriz elétrica mundial em relação as fontes não renováveis fazem com que os reservatórios das hidrelétricas diminuam cada vez mais pela exploração desenfreadas dos recursos naturais e outro problema é a questão ambiental, pela emissão de gases de efeito estufa pela queima de combustíveis fósseis (EPE, 2019).

Para diminuir esse aumento da emissão de gases de efeito estufa, a agenda ambiental mundial uniu diversos países em prol de um objetivo comum e, por meio de inúmeras conferências, foram discutidos assuntos e traçados objetivos que buscam o desenvolvimento sustentável da sociedade (SILVA; CRISPIM, 2011). Um exemplo disso é o Acordo de Paris, realizado em 2015. Esse acordo, assinado por aproximadamente 200 países, traçou objetivos e metas para a redução de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera e limitação da ascensão de temperatura média global para no máximo 1,5° C comparados a níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015).

Para solucionar esse aumento constante da demanda pela energia elétrica e na diminuição da emissão de gases de efeito estufa, tem-se buscado novas fontes de geração energia elétrica alternativas e renováveis. A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de geração de energia elétrica mais promissoras da atualidade devido ao conjunto de vantagens associadas a esta fonte, tais como baixo impacto ambiental, alívio sobre os recursos hídricos que estão cada vez mais escassos, fonte inesgotável de geração de energia elétrica, baixa manutenção, entre outros (ABSOLAR, 2020).

Principalmente pelas diversas vantagens, a energia solar fotovoltaica foi uma das fontes de geração de energia elétrica que mais cresceu nas últimas décadas. Em 2001, a capacidade mundial de geração de energia solar fotovoltaica era de aproximadamente 1,8 GW. Já em 2009, atingiu os 23,2 GW, e desde então vem crescendo em ritmo acelerado, atingindo 100,5 GW em 2012 e 179,4 GW no ano de 2014 (EPIA, 2015), conforme ilustra o Gráfico 2.

**Gráfico 2 - Crescimento da energia solar mundial**

Fonte: (EPIA, 2015)

Com a evolução da energia solar fotovoltaica e o aumento de incentivos governamentais para a utilização de fontes de energia renováveis, surge uma nova forma de empreendimento. No caso do Brasil, em 2015, aproximadamente 700 empresas atuavam no setor de energia solar fotovoltaica e atualmente esse valor ultrapassou a marca de 20.000 empresas atuando no setor (PORTALSOLAR, 2021).

Com o iminente aumento da concorrência, promove-se a diminuição da margem de lucro para tornar o negócio atrativo no mercado (SEBRAE, 2018). Porém, existem empresas que promovem propagandas irreais para atrair os clientes. No mercado da energia solar não é diferente, empresas que atuam na área usufruindo de estimativas de retorno financeiro irreais surgiram nos últimos anos.

Nesse sentido, o método de Medição e Verificação (M&V) pode ser utilizado como ferramenta de apoio para uma avaliação mais criteriosa da geração de energia elétrica e economia gerada, comparando os dados de projeto com valores medidos e/ou calculados do projeto real. Em resumo, o processo de M&V consiste nas etapas de planejamento, medição, coleta e análise de dados com o propósito de verificar e relatar a economia de energia elétrica em uma instalação individual resultante da implementação de medidas de conservação de energia (EVO, 2021).

Nesse contexto, através da implementação dos aspectos relacionados à etapa de M&V, este trabalho propõe-se a realizar um estudo de análise técnica e econômica aplicada a um sistema fotovoltaico já instalado de 91,63 kWp, comparando os dados previstos na etapa de projeto com os dados de medição.



## **1.2 Objetivos**

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos definidos para a realização desse trabalho.

### **1.2.1 Objetivo geral**

A pesquisa proposta nesse trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal implementar, de modo simplificado, a metodologia de Monitoramento & Verificação (M&V) para um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

### **1.2.2 Objetivo específico**

- Realizar um levantamento das legislações vigentes relacionadas ao grupo tarifário A;
- Revisar a literatura referente a etapa de Monitoramento & Verificação (M&V);
- Propor uma metodologia simplificada relacionada a etapa de Monitoramento & Verificação (M&V) para sistemas fotovoltaicos;
- Executar a análise técnica da instalação referente ao estudo;
- Avaliar os parâmetros de viabilidade técnica e econômica estimados na etapa do projeto;

## **1.3 Estrutura do trabalho**

O trabalho está organizado conforme a sequência a seguir. No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica desse trabalho. No capítulo 3 serão apresentados aspectos relacionados à metodologia de pesquisa aplicada ao longo do desenvolvimento da monografia. Na sequência, no capítulo 4, apresenta-se a implementação do método M&V para um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões desse trabalho de pesquisa.

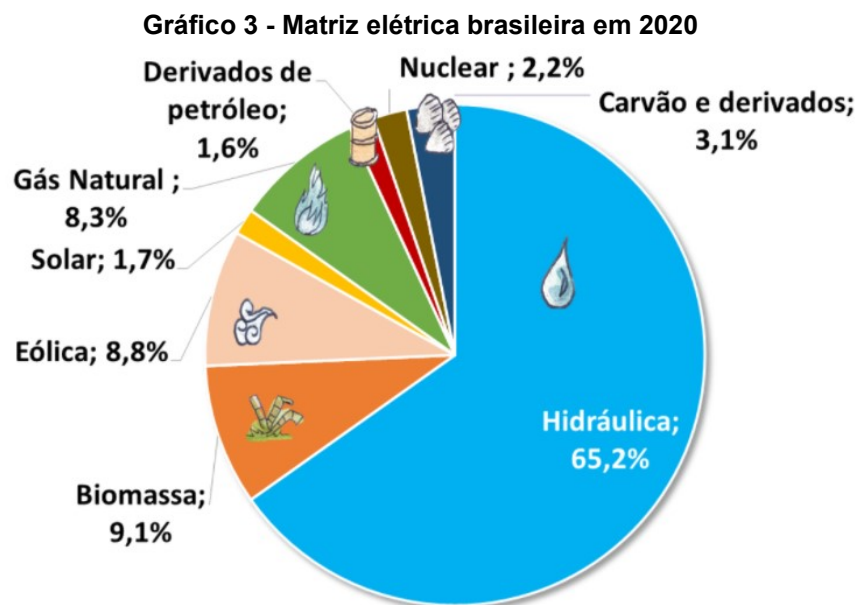
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão teórica dos conceitos fundamentais utilizados para o desenvolvimento dessa pesquisa.

### 2.1 Energia solar fotovoltaica no Brasil

No Brasil, com o abundante recurso hídrico, a geração de energia elétrica por meio das hidrelétricas tem sido a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro por décadas. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o parque gerador brasileiro possui uma capacidade instalada que já supera os 170 GW (ANEEL, 2020).

O Gráfico 3 apresenta a matriz elétrica brasileira no ano de 2020 (EPE, 2020).

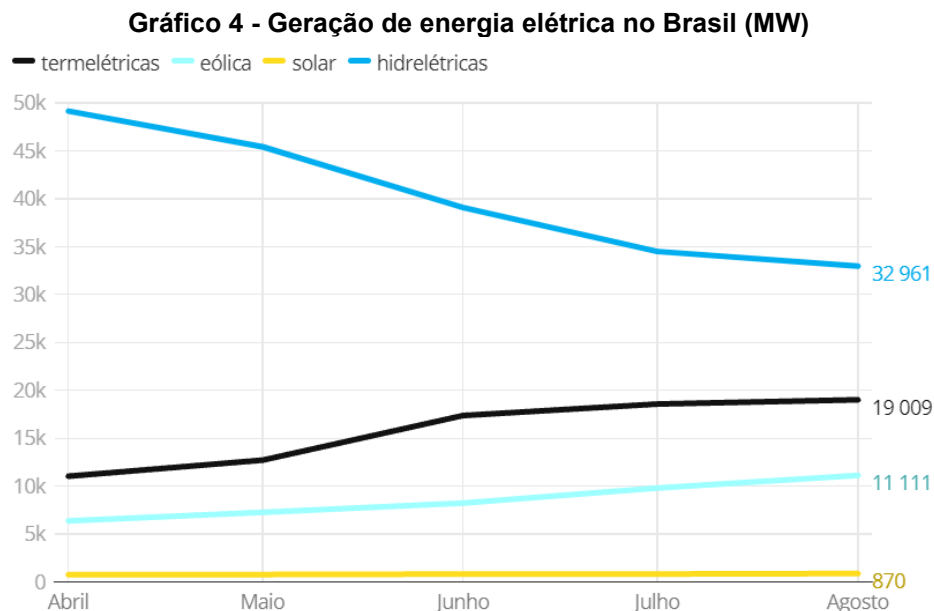


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020)

De acordo com o Gráfico 3, é possível perceber a elevada participação de fontes renováveis, que tem impacto ambiental reduzido e custo de operação menores quando comparados com as fontes de geração de energia elétrica tradicionais (e.g., as termelétricas a carvão ou gás natural) (EPE, 2020). Porém, como as fontes renováveis geralmente dependem de condições temporais/climáticas, a geração de energia elétrica possui como característica intrínseca a estocasticidade/variabilidade. Como exemplo, pode-se citar o caso das usinas hidrelétricas que dependem de condições hídricas adequadas para a produção de eletricidade, ou seja, se as

condições de chuva forem insatisfatórias, o nível da água tende a diminuir, afetando a geração de energia elétrica.

Em 2021, o Brasil experienciou uma das piores crises hídricas dos últimos 91 anos. Nesse sentido, a ANEEL, anunciou uma nova bandeira tarifária na conta de energia elétrica, denominada de bandeira de escassez hídrica. Esse novo patamar foi criado para cobrir os custos extras do acionamento de usinas térmicas e da importação de energia, o que acarretará na elevação das tarifas de energia elétrica para o consumidor final. O Gráfico 4 ilustra a geração de energia elétrica no Brasil no ano de 2021 (ONS, 2021).

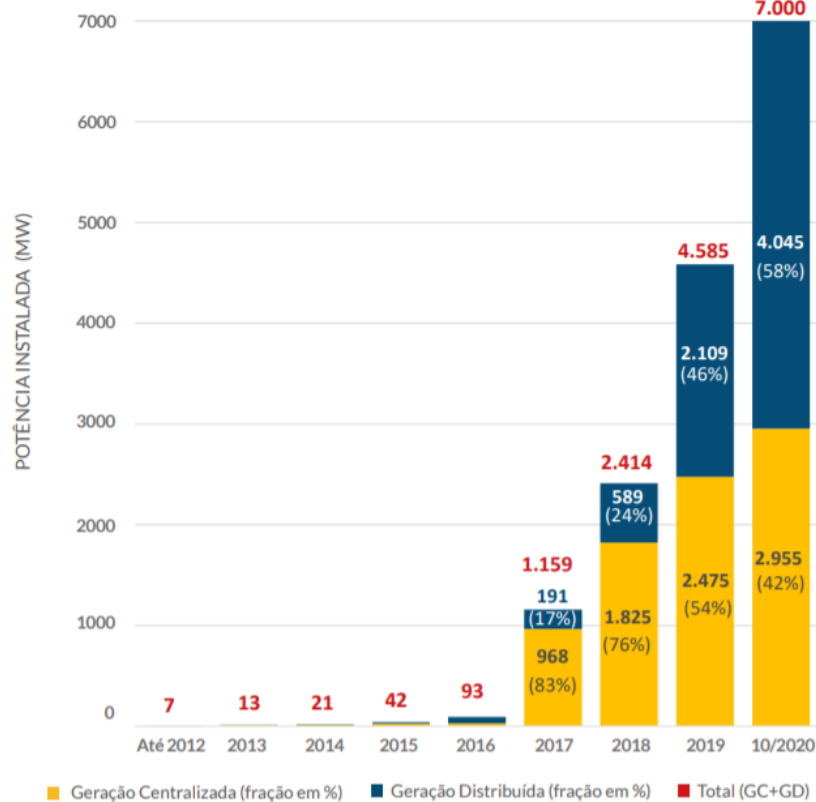


Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2021)

Segundo dados do Gráfico 4, disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), constata-se uma diminuição considerável da geração por parte das hidrelétricas e um aumento por parte das termelétricas e eólicas para prover o balanço entre carga e geração.

A crise hídrica enfrentada no ano de 2021 em conjunto com questões transversais, como o aumento da emissão de CO<sub>2</sub>, impulsionou o país a buscar alternativas para a redução de tais impactos, impulsionando de forma específica o aumento da participação da energia solar fotovoltaica na matriz de energia elétrica (ANEEL, 2021).

O Gráfico 5 apresenta a evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil (ABSOLAR, 2020).

**Gráfico 5 - Evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil**

Fonte: ABSOLAR (2020)

De acordo com o Gráfico 5, a potência instalada de energia solar fotovoltaica teve um crescimento de 100.000% nos últimos 8 anos (ABSOLAR, 2020). Em 2018 a meta do Brasil para 2024, era alcançar 7 gigawatts de capacidade instalada da fonte solar fotovoltaica. Entretanto, já em 2021, o país ultrapassou os 10 gigawatts de capacidade de geração solar instalada, estando no grupo dos 15 países com maior capacidade instalada da fonte. Mesmo com o grande avanço ocorrido nos últimos anos, a fonte solar fotovoltaica ainda representa uma pequena parcela na matriz elétrica brasileira. Analisando o Gráfico 3, em 2020, a fonte solar fotovoltaica representava em torno de 1,7% da matriz elétrica brasileira.

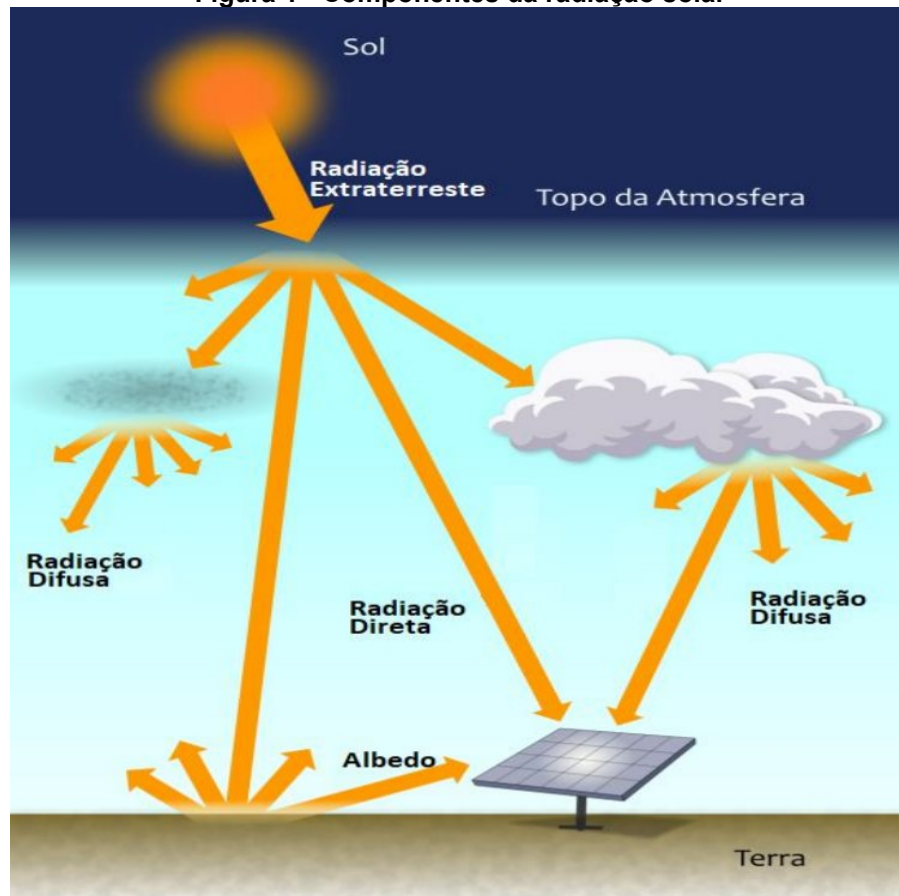
A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de geração de energia elétrica mais promissoras da atualidade devido ao conjunto de vantagens associadas a esta fonte, tais como baixo impacto ambiental, alívio sobre os recursos hídricos que estão cada vez mais escassos, fonte inesgotável de geração de energia elétrica, baixa manutenção, entre outros (ABSOLAR, 2020). Mesmo com tantas vantagens, a energia solar no Brasil começou a ser melhor aproveitada somente em 2012, de acordo com o Gráfico 3, a partir da criação da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que

possibilitou ao consumidor brasileiro gerar a sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2012). Trata-se da microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, que tem como objetivos suplementares aliar economia financeira, consciência socioambiental e sustentabilidade. A microgeração é definida para uma potência instalada de até 75 kW e minigeração distribuída é aquela com potência instalada acima de 75 kW (ANEEL, 2016). Desse modo, a partir de regulações para o setor de Geração Distribuída (GD) realizadas pelo governo brasileiro, houve um crescimento da GD, sobretudo da GD Fotovoltaica.

## **2.2 Fundamentos da Energia solar fotovoltaica**

### **2.2.1 Radiação solar**

A radiação solar é a energia advinda do Sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas. A energia solar incidente na superfície do planeta sofre a influência de processos físicos, que reduzem a intensidade da radiação ao longo do percurso (CRESESB, 2018). A Figura 1 apresenta as componentes da radiação solar (ATLAS SOLAR, 2017).

**Figura 1 - Componentes da radiação solar**

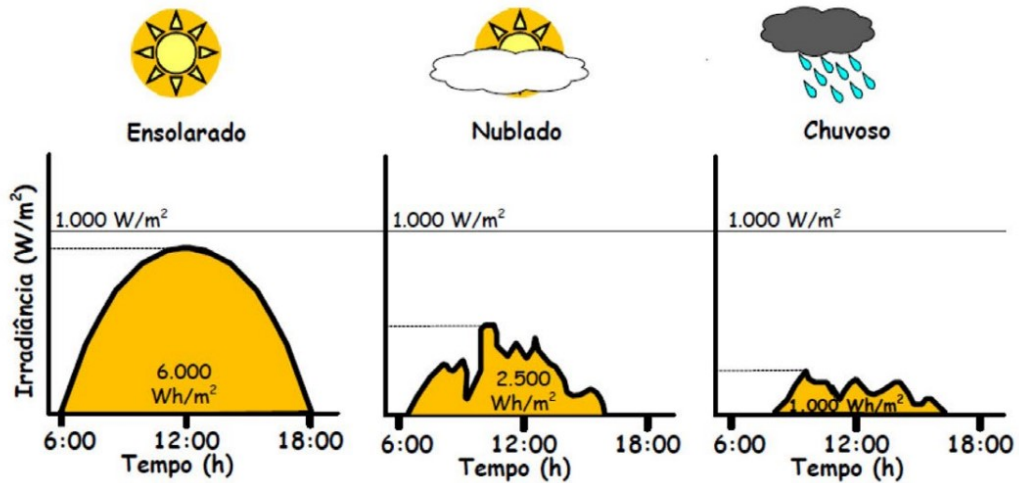
Fonte: Atlas Solar (2017)

Como ilustra a Figura 1, a radiação solar é dividida nas seguintes componentes (ATLAS SOLAR 2017):

- Radiação direta: Linha reta entre o sol e a superfície da terra.
- Radiação difusa: Espalhamento que ocorre na trajetória da radiação solar.
- Albedo: Luz difundida a partir da superfície da Terra.

Irradiância total é a potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer (WEG, 2015). A Figura 2 apresenta exemplos de irradiação solar diária para diferentes condições (PINHO, GALDINO, 2014).

Figura 2 - Exemplos de irradiância solar diária

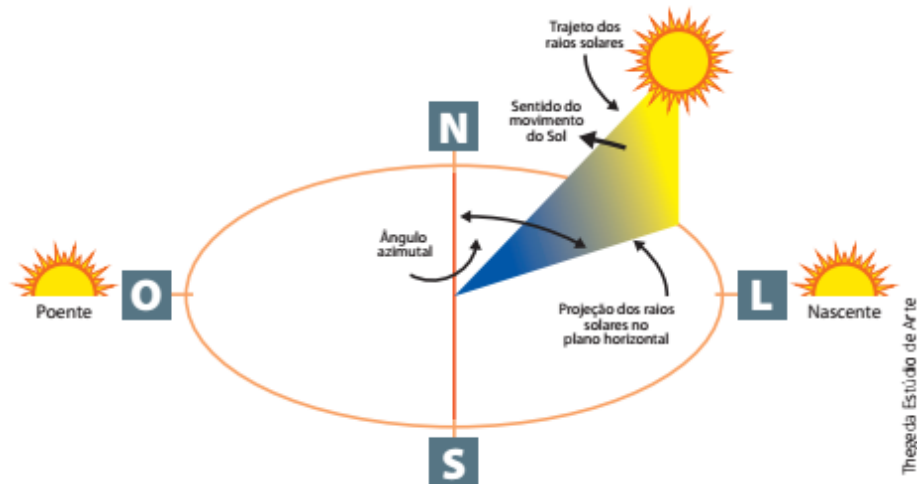


Fonte: Pinho, Galdino (2014)

Segundo Pinho, Galdino (2014), a irradiância é variável de acordo com a situação do tempo, se está ensolarado a irradiância é maior, se está nublado ou chuvoso é menor.

Azimutal é o ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico (INSTITUTO SOLAR 2017), ilustrado pela Figura 3.

Figura 3 - Ângulo azimutal do sol



Fonte: Instituto Solar (2017)

A instalação correta de um módulo solar fotovoltaico deve considerar o movimento diário do sol. Um módulo instalado com sua face voltada para Leste ou Oeste fará o aproveitamento da energia solar prioritariamente em um período do dia. No hemisfério Sul, o ideal é orientar os módulos fotovoltaicos para o Norte geográfico,

para um melhor aproveitamento da irradiação solar ao longo do dia, pois durante todo o tempo o módulo tem raios solares incidindo sobre a sua superfície (Villalva, 2012).

### 2.2.2 Sistemas fotovoltaicos

A energia do sol pode ser utilizada para produzir eletricidade pelo efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a radiação eletromagnética do sol incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas (VILLALVA, 2012).

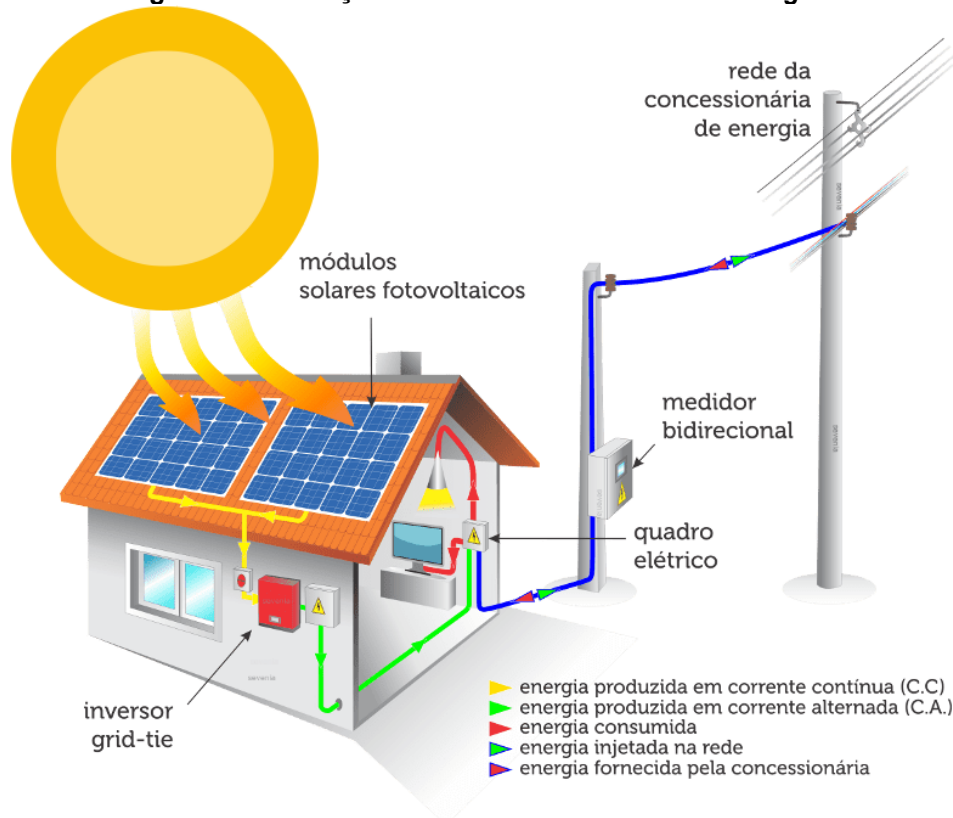
Os sistemas fotovoltaicos são divididos em três tipos principais: conectados à rede (*on grid*), isolados (*off grid*), ou híbridos. O sistema *on grid* é conectado à rede, utilizando a energia da distribuidora durante à noite ou em dias de pouco sol e acumulando créditos com a energia excedente gerada durante o dia. O sistema *off grid* não é conectado à rede e faz o uso de baterias para acumular a energia excedente e usá-la quando não é possível produzir. O sistema híbrido é um sistema que gera eletricidade a partir de duas ou mais fontes em conjunto (PORTAL SOLAR, 2019).

O sistema *on grid* normalmente é o mais vantajoso por ter um custo inferior comparado com as alternativas citadas e conseqüentemente tem sido o sistema mais utilizado. Isso se dá em especial por não haver o uso de baterias, que possuem um valor elevado (PORTAL SOLAR, 2019).

A Figura 4 apresenta a estrutura típica de um sistema fotovoltaico *on grid* (UNIVERSAL AUTOMAÇÃO, 2014).



**Figura 4 – Ilustração de um sistema fotovoltaico *on grid***



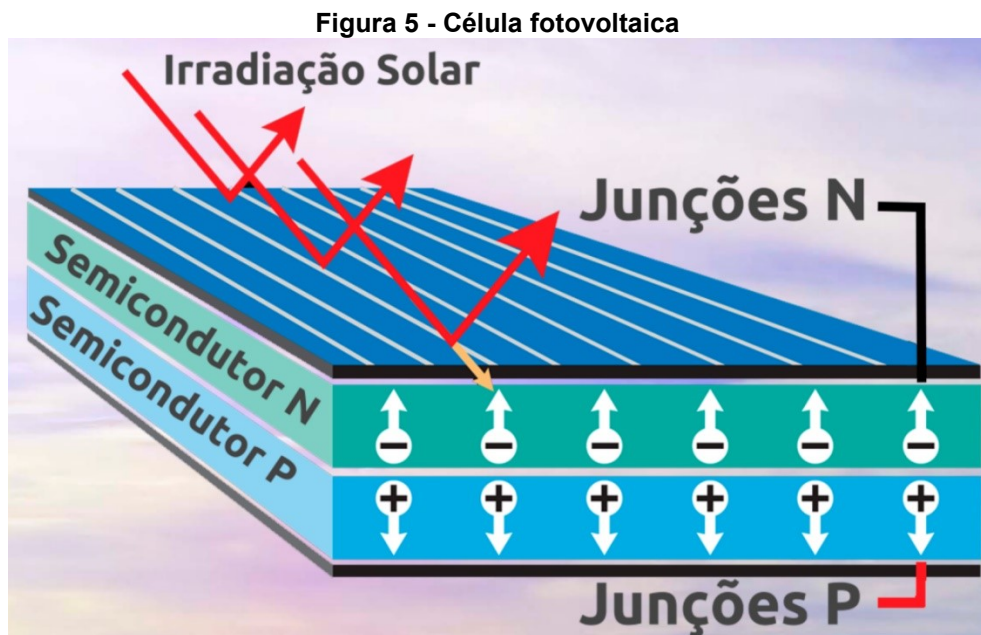
**Fonte: Universal Automação (2014)**

Os módulos fotovoltaicos geram energia elétrica em corrente contínua (CC), quando os fótons (partículas de luz solar) colidem com os átomos do material do painel fotovoltaico, provocando assim o deslocamento dos elétrons, criando uma corrente elétrica. Para sistemas conectados à rede elétrica, a energia elétrica gerada em corrente contínua é convertida em corrente alternada por meio de um inversor. Após a conversão, a energia elétrica é distribuída para a unidade consumidora e o excedente é injetado na rede pública (VILLALVA, 2012).

### 2.2.3 Módulos fotovoltaicos

A célula fotovoltaica é o dispositivo fotovoltaico principal de um sistema fotovoltaico. Uma célula sozinha produz pouca eletricidade, então várias células são agrupadas para produzir um módulo fotovoltaico. Existem atualmente diversas tecnologias para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos. As mais comuns encontradas no mercado são a de silício monocristalino, silício policristalino e a de filme fino de silício (PEREIRA et al, 2006).

Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra N. O material N possui excedente de elétrons e o material P apresenta falta de elétrons, com isso, devido à diferença de concentração de elétrons nas duas camadas de materiais, os elétrons da camada N fluem para a camada P e criam um campo elétrico chamado de barreira de potencial (VILLALVA, 2012). A Figura 5 apresenta o exemplo de uma célula fotovoltaica (ENSOLARE, 2019).



Fonte: Ensolare (2019)

As células de silício monocristalino (ilustradas pela Figura 6) são as mais eficientes, alcançando de 15 a 18% de eficiência, porém tem um custo maior de produção que outros tipos de células (MARINI; ROSSI, 2003).

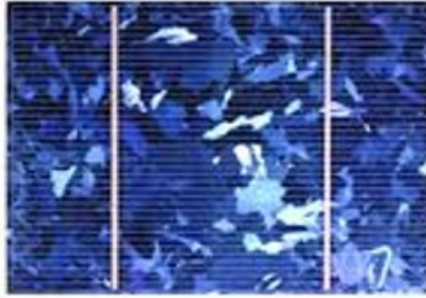
**Figura 6 - Célula de silício monocristalina**



Fonte: Canalsolar (2015)

O silício policristalino (ilustrado pela Figura 7) é fabricado em um processo mais barato do que o silício monocristalino, porém, em geral tem uma eficiência na faixa entre 13 a 15%, um pouco menor quando comparado com o silício monocristalino (SOUZA, 2016).

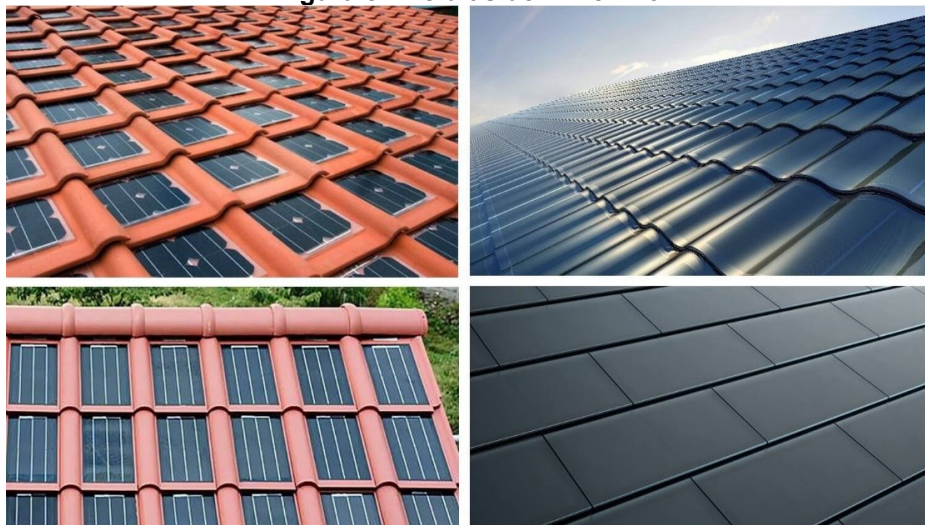
**Figura 7 - Célula de silício policristalino**



Fonte: Canalsolar (2015)

Os filmes finos são uma tecnologia mais recente, que surgiu após as tecnologias cristalinas já estarem desenvolvidas. Para sua fabricação, necessita de uma temperatura muito menor quando comparado com as células cristalinas, portanto consome menos energia e também consome menos matéria-prima, tornando mais baixo o custo da tecnologia. Apesar de ter um custo relativamente baixo, os dispositivos de filmes finos têm baixa eficiência (VILLALVA, 2012). A Figura 8 apresenta as células de filme fino (CANALSOLAR, 2015).

**Figura 8 - Células de filme fino**



Fonte: Canalsolar (2015)

#### 2.2.4 Dimensionamento e perdas nos sistemas fotovoltaicos

O dimensionamento do sistema fotovoltaico varia de acordo com a necessidade do projeto, podendo ser dimensionado para suprir a demanda total de energia elétrica ou parte dela. A energia elétrica diária produzida pode ser estimada através da equação (1) (VILLALVA 2015):

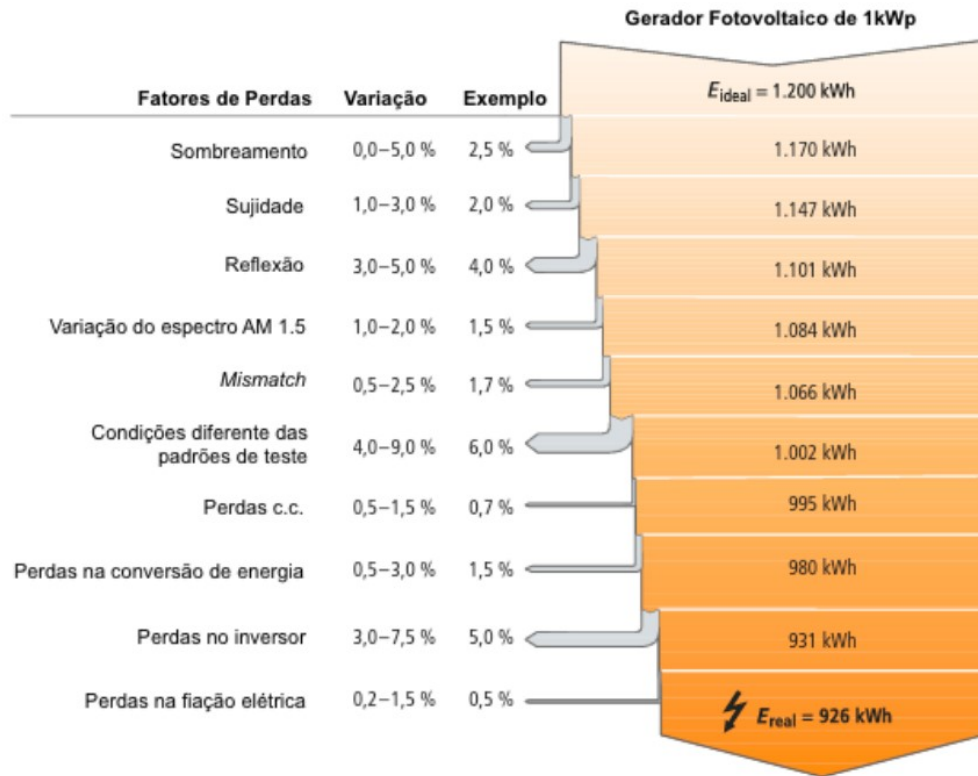
$$E_M = P_{WP} \cdot Id \cdot N \quad (1)$$

A energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico é composta pela componente  $E_M$  (kWh), a potência dos painéis fotovoltaicos pela componente  $P_{WP}$  (kWp), a insolação diária do local da instalação pela componente  $Id$  (kWh/m<sup>2</sup>/dia) e as perdas do sistema fotovoltaico pela componente  $N$  (%) (VILLALVA, 2015).

As perdas do sistema fotovoltaico fazem com que a energia efetivamente entregue à rede elétrica seja menor que a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos. O desempenho do sistema solar fotovoltaico é altamente dependente da localização geográfica, bem como do projeto do sistema. Portanto, para desenvolver um sistema eficiente, precisa-se de ferramentas de projeto e previsão eficientes (FADIGAS, 2011).

Os sistemas fotovoltaicos apresentam diversos fatores de perdas de energia elétrica, desde os módulos fotovoltaicos até o ponto de conexão. Existem diversas condições ambientais que afetam a geração de um sistema de energia fotovoltaica, as quais devem ser levados em consideração para que se tenha expectativas realistas sobre os resultados (MALINOWSKI; LEON; ABU-RUB, 2017). A Figura 9 ilustra um exemplo das principais perdas associadas a um sistema fotovoltaico (ARAÚJO ET AL, 2016).

**Figura 9 – Principais perdas associadas a um sistema fotovoltaico**



Fonte: Araújo et al. (2016)

De acordo com os dados da Figura 9, os principais fatores de perdas em sistemas fotovoltaicos é a sujidade, a temperatura, o sombreamento, as perdas no inversor, as perdas na fiação elétrica nos lados CC e CA, a degradação dos módulos e o ângulo de incidência solar (ARAÚJO ET AL, 2016).

### 2.3 Modalidades tarifárias no Brasil

As modalidades tarifárias no contexto do setor elétrico brasileiro são um conjunto de tarifas aplicáveis ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência ativa. Elas são definidas de acordo com o Grupo Tarifário, segundo as opções de contratação definidas na Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021 (GOV, 2022).

Grupo A: Grupamento composto de unidades consumidoras com conexão em tensão maior ou igual a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistemas subterrâneo de distribuição em tensão menor que 2,3 kV, e subdividido nos seguintes subgrupos (ANEEL, 2021):

- Subgrupo A1: tensão de conexão maior ou igual a 230 kV;

- Subgrupo A2: tensão de conexão maior ou igual a 88 kV e menor ou igual a 138 kV;
- Subgrupo A3: Tensão de conexão igual a 69 kV;
- Subgrupo A3a: Tensão de conexão maior ou igual a 30 kV e menor igual a 44 kV;
- Subgrupo A4: Tensão de conexão maior ou igual a 2,3 kV e menor ou igual a 25 kV;
- Subgrupo AS: Tensão de conexão menor que 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

Para unidades consumidoras da Alta Tensão (Subgrupos A1, A2 e A3), é disponibilizada a Tarifa Azul, que são tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia (postos tarifários). Para unidades consumidoras da Média Tensão (Subgrupos A3a e A4), e de sistemas subterrâneos (Subgrupo AS) é disponibilizada a Tarifa Verde, que são tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia (postos tarifários), e de uma única tarifa de demanda de potência (ANEEL, 2021).

Em certos casos, consumidores do grupo tarifário A podem contratar o serviço de uma concessionária que atua em uma região diferente do local onde está o consumidor. Consumidores do grupo A não pagam custo de disponibilidade, mas são obrigados a contratar da concessionária uma certa demanda de potência (kW), com valor igual ou superior a 30 kW. Consumidores do grupo tarifário A pagam tanto pela energia ativa (kWh) quanto pela energia reativa (KVArh), também pagam se ultrapassarem a demanda contratada (kW) (ANEEL, 2021). Em geral o Grupo A inclui shopping centers, grandes centros comerciais, agências bancárias, indústrias, prédios residenciais e comerciais.

Grupo B: Grupamento composto de unidades consumidoras com conexão em tensão menor que 2,3 kV e subdividido nos seguintes subgrupos (ANEEL, 2021):

- Subgrupo B1: Residencial;
- Subgrupo B2: Rural;
- Subgrupo B3: Demais classes;
- Subgrupo B4: Iluminação pública.

## 2.4 Monitoramento e Verificação (M&V)

Monitoramento e Verificação (M&V) é o processo de planejamento, medição, coleta e análise de dados com o propósito de verificar e relatar a economia de energia elétrica em uma instalação individual resultante da implementação de medidas de conservação de energia (EVO, 2021). As reduções de energia e custos são comparadas com uma linha de base histórica, que pode ser ajustada para refletir mudanças nas condições operacionais ou tarifas de serviços públicos.

As economias são determinadas comparando o uso de recursos antes e depois da instalação de medidas de eficiência energética e fazendo os ajustes apropriados para mudanças nas condições. O caso “antes” é chamado de linha base e o caso “depois” é chamado de pós-instalação ou período de desempenho (DOE, 2015).

Segundo do Departamento de Energia dos Estados Unidos, se aplicado corretamente, o M&V pode alcançar os seguintes objetivos:

- Alocar riscos entre o contratante e o cliente;
- Avaliar com precisão a economia de energia e a persistência da economia para um projeto;
- Reduzir incertezas a níveis razoáveis;
- Auxiliar no monitoramento do desempenho do equipamento;
- Identificar economias adicionais;
- Melhorar as operações e manutenção.

A Figura 10 apresenta uma visão geral das atividades de M&V em cada fase de um projeto (DOE, 2015).

**Figura 10 - Fluxograma das principais etapas de M&V**



**Fonte: DOE (2015).**

Na sequência, apresenta-se as principais características de cada etapa:

Etapa 1: A base de qualquer plano de M&V é a alocação dos principais riscos e responsabilidades do projeto. Uma série de questões financeiras, operacionais e de desempenho típicas devem ser consideradas ao alocar riscos e responsabilidades.

Etapa 2: As condições físicas de linha de base (como inventário e condições de equipamentos, dados climáticos atuais, etc.) e atividades de medição devem ser estabelecidas. As contas de serviço público podem ser utilizadas para verificar se a



linha de base foi definida com precisão. As condições de linha de base são estabelecidas com o objetivo de estimar as economias comparando o “antes” com o “pós-instalação”.

Etapa 3: O plano de M&V define como a economia será calculada e especifica quaisquer atividades em andamento que ocorrerão após a instalação do equipamento. O plano de M&V específico inclui itens de todo o projeto, tais como:

- Cronograma para todas as atividades de M&V;
- Requisitos de testemunho e requisitos de aprovação do cliente;
- Taxas de serviços públicos e o método usado para calcular a economia de custos;
- Detalhes das condições de linha de base e dados coletados;
- Como a economia de energia será calculada;
- Detalhes da proposta de economia de energia e custos.
- Detalhe das atividades de verificação pós-instalação.

Etapa 4: O comissionamento garante que os sistemas sejam instalados e testados, mantendo em conformidade com as intenções do projeto. O comissionamento geralmente requer medições de desempenho para garantir que os sistemas estejam funcionando corretamente.

Etapa 5: As atividades de M&V pós-instalação são conduzidas para garantir que os equipamentos/sistemas adequados foram instalados, estão operando corretamente e estão gerando a economia prevista. Os métodos de verificação incluem pesquisas, inspeções, medições pontuais e medições de curto prazo.

Etapa 6: A M&V deve ser realizada em intervalos regulares para garantir que o equipamento instalado esteja operacional e esteja entregando as economias previstas.

## **2.5 Fundamentos sobre a viabilidade econômica de projetos**

Os indicadores de viabilidade servem para subsidiar a tomada de decisão acerca de investimentos em novos projetos ou na expansão de um já existente. Os índices econômicos permitem indicar o grau de rentabilidade das atividades ao longo do tempo, pois devem estimar os resultados possíveis de serem alcançados, bem como os riscos inerentes ao processo (BORDEAUX-RÉGO et al., 2006).

### 2.5.1 *Payback* descontado

*Payback* indica o tempo necessário para que o empreendimento retorne o valor investido. Esse é um dos principais indicadores utilizados pelos investidores, pois quanto menor o tempo de retorno do investimento, menores serão os riscos e melhor será a liquidez do investimento. O *payback* descontado é o instrumento que melhor permite a avaliação do tempo de retorno, uma vez que leva em consideração a atualização dos valores monetários ocorridos ao longo do fluxo de caixa (SILVA, 2004; HOJI, 2003). Para calcular o *payback* descontado utiliza-se as Equações (2) e (3) (REIS, 2019):

$$P_V = \frac{FC_i}{(1+i)} \quad (2)$$

O valor descontado é composto pela componente  $P_V$  (R\$), o fluxo de caixa inicial pela componente  $FC_i$  (R\$) e a taxa mínima de atratividade (taxa Selic) pela componente  $i$  (%) (REIS, 2019).

$$P_d = \frac{I_N}{P_V} \quad (3)$$

O *payback* descontado é composto pela componente  $P_d$  (R\$), o investimento inicial pela componente  $I_N$  (R\$) e o valor descontado pela componente  $P_V$  (R\$) (REIS, 2019).

### 2.5.2 Taxa interna de retorno (*TIR*)

Taxa Interna de Retorno (*TIR*) é o indicador relacionado ao rendimento da atividade em um determinado período de tempo. Quanto maior a *TIR*, maior a viabilidade de realização do projeto em análise. Quando a *TIR* for negativa, o projeto é inviável do ponto de vista econômico financeiro (HOJI, 2003). Para calcular a *TIR*, utiliza-se a Equação (4) (HOJI, 2003).

$$\sum \frac{CF_N}{(1+TIR)^N} = 0 \quad (4)$$

O fluxo inicial é composto pela variável  $CF_N$  (R\$), a taxa interna de retorno é composta pela variável  $TIR$  (%) e  $N$  é o período de análise (HOJI, 2003).

### 2.5.3 Valor Presente Líquido ( $VPL$ )

A análise por meio do Valor Presente Líquido ( $VPL$ ) tem como finalidade medir o valor presente dos fluxos de caixa futuros gerados pela atividade ao longo de um tempo determinado. Se o  $VPL$  for maior que zero, se aceita o projeto; se o  $VPL$  for menor que zero, rejeita-se o projeto (HOJI, 2003). Para calcular o  $VPL$ , utiliza-se a Equação (5) (HOJI, 2003):

$$VPL = \sum \frac{CF_N}{(1+i)^N} \quad (5)$$

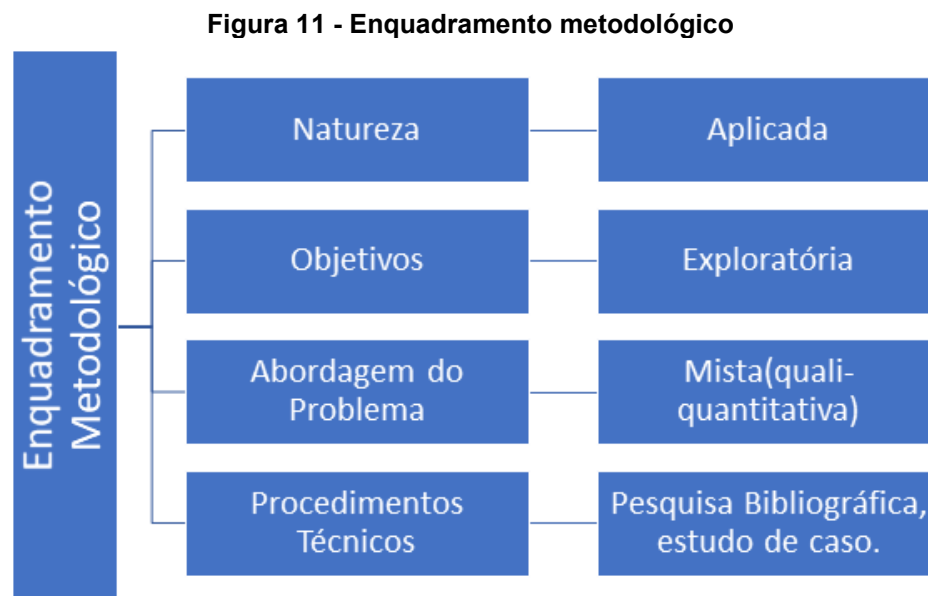
O valor presente líquido ( $VPL$ ) (R\$) é determinado utilizando-se o fluxo de caixa do período ( $CF_N$ ) (R\$) e a taxa mínima de atratividade ( $i$ ) (%) (HOJI, 2003).

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os principais aspectos metodológicos da pesquisa.

#### 3.1 Estrutura metodológica

Para a realização desse trabalho de pesquisa foram utilizados como referência bibliográfica artigos científicos, livros e outras fontes de pesquisa relevantes, incluindo referências de órgãos nacionais e internacionais do setor energético. De acordo com a Figura 11, a natureza do trabalho de pesquisa é aplicada, pois tem como objetivo solucionar um problema específico e tem aplicação prática no mundo real. A escolha metodológica foi de forma mista (quali-quantitativa). A Figura 11 ilustra o enquadramento metodológico.



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 3.2 Metodologia proposta

Com base nos conhecimentos no método M&V obtidos nos estudos citados no decorrer deste trabalho (DOE, 2015), uma metodologia simplificada será proposta referente a etapa de M&V aplicada a sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. A metodologia foi construída com base da revisão bibliográfica conduzida ao longo do trabalho e será aplicada a um sistema fotovoltaico de 91,63 kWp.

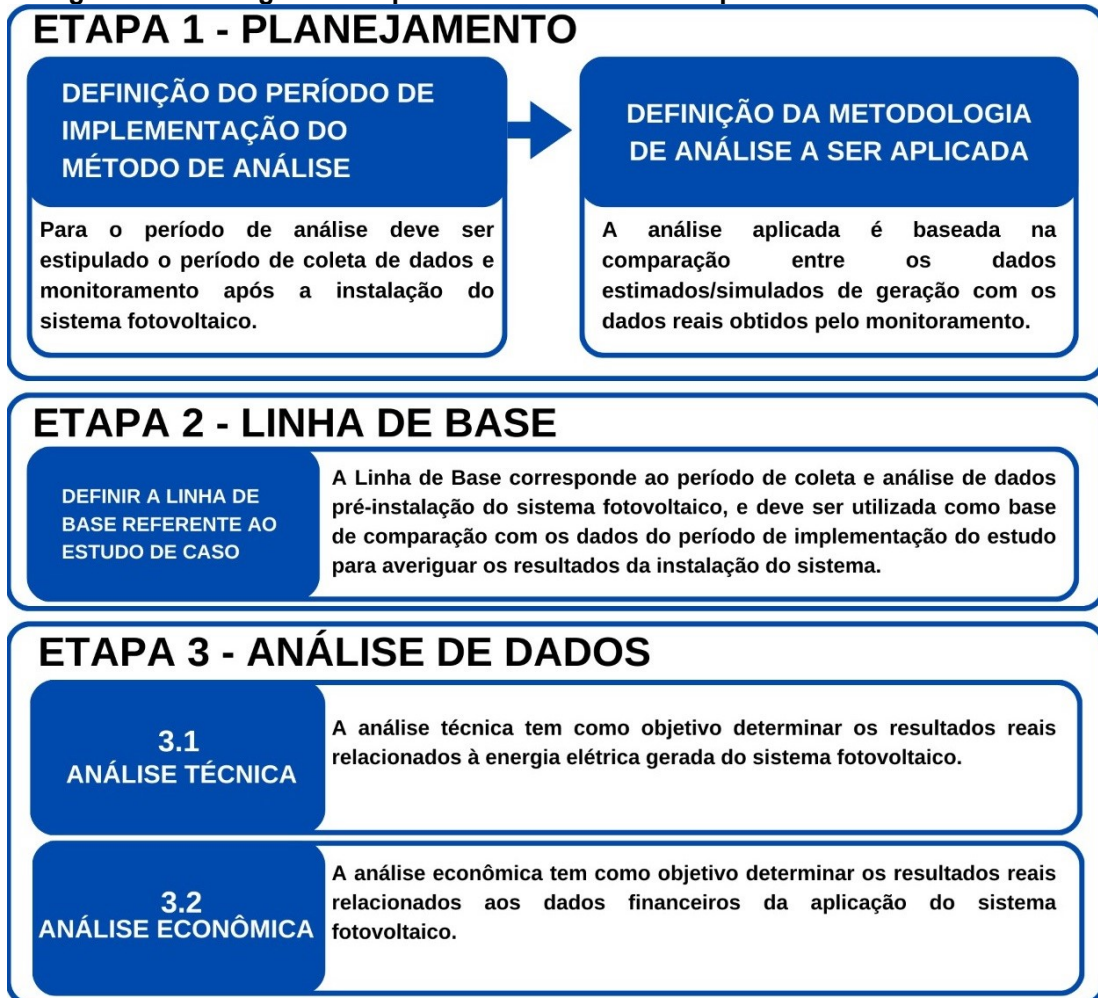
Para uma melhor demonstração, o método será dividido em 2 fluxogramas. O primeiro fluxograma é referente ao método M&V para sistemas fotovoltaicos, para construção desse fluxograma, foi utilizado como base o guia do método de Monitoramento e Verificação (M&V) disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). O segundo fluxograma mostra como será realizada a análise técnica com base nas referências do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2015) e a análise econômica, com base na referência (HOJI, 2003).

A Figura 12 apresenta o fluxograma simplificado do método M&V para sistemas fotovoltaicos que pode ser resumido nas seguintes etapas:

- Etapa 1: Definir o período da implementação do método M&V e como será realizada a análise de dados.
- Etapa 2: Definir qual será a linha de base, para realizar uma comparação entre o “antes” e o “depois” e constatar a real economia.
- Etapa 3: Realizar uma análise técnica e econômica para comparar a geração de energia elétrica e economia financeira (em R\$) obtida ao longo do período de análise.

A Figura 12 apresenta a implementação do método M&V para sistemas fotovoltaicos (DOE, 2015).

Figura 12 - Fluxograma simplificado do método M&V para sistemas fotovoltaicos



Fonte: Adaptada de DOE (2015)

A Figura 13 apresenta os detalhes da metodologia proposta relacionados à análise técnica e econômica (DOE, 2015).

Figura 13 - Fluxograma referente a análise técnica e econômica



Fonte: Adaptada de DOE (2015)

Na sequência apresentam-se a descrição das etapas correspondentes à Figura 12:

- Etapa 3.1.1: Para realizar a análise técnica, é necessário obter os dados iniciais de projeto. Para realizar o dimensionamento em *software*, é necessário o conhecimento do local da instalação. A irradiação diária do local da instalação pode

ser obtida pelo site da *Global Solar Atlas*. É necessário também os dados de consumo mensal da unidade consumidora e os equipamentos a serem utilizados. Caso for utilizar os dados do dimensionamento já realizados, é necessário obter os dados de geração de energia elétrica previstos em projeto, o consumo mensal da unidade consumidora utilizado em projeto (kWh), o local da instalação e os equipamentos utilizados no dimensionamento. Neste trabalho, para a implementação do estudo na unidade consumidora, será utilizado os dados do dimensionamento realizado em projeto pela empresa responsável pela instalação do sistema fotovoltaico, ou seja, a etapa 3.1.1.2.

- Etapa 3.1.2: É necessário obter os dados de monitoramento do sistema fotovoltaico. De modo simplificado, será considerada a quantidade de energia elétrica gerada ao longo do período de análise (kWh).

- Etapa 3.1.3: Com os dados previstos de geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico e os dados reais de geração, é necessário fazer uma comparação entre os dados estimados em projeto e os dados medidos. Na sequência, realiza-se uma estimativa de performance do sistema fotovoltaico.

- Etapa 3.2.1: Obter os dados previstos de economia no pré-projeto. Posteriormente calcular os indicadores de viabilidade econômica: *Payback* Descontado, VPL, e a TIR.

- Etapa 3.2.2: Obter os dados reais de economia gerado pelo sistema fotovoltaico em um período definido (pelo menos um ano). Posteriormente calcular os indicadores de viabilidade econômica: *Payback* Descontado, VPL, e a TIR.

- Etapa 3.2.3: Fazer uma comparação entre os indicadores de viabilidade econômica do pré-projeto com o pós-instalação.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta em uma unidade consumidora que possui um sistema fotovoltaico instalado de 91,63 kWp. Inicialmente será descrito as características do sistema fotovoltaico (Seção 4.1). Na sequência, a metodologia proposta no capítulo 3 será aplicada (Seção 4.2) e finalmente a análise dos resultados será realizada na Seção 4.3.

### 4.1 Descrição do sistema fotovoltaico em estudo

Para efeito de estudo, foi considerado um sistema fotovoltaico instalado em uma indústria na região sudoeste do Paraná com potência instalada de 91,63 kWp. A Tabela 1 apresenta os principais dados da unidade consumidora. As informações são referentes ao ano de 2020 e foram extraídas com base nos dados do dimensionamento realizado pela empresa responsável pela instalação do sistema fotovoltaico. O apêndice A ilustra os dados do módulo fotovoltaico utilizado no sistema fotovoltaico referente ao estudo e o apêndice B ilustra os dados do inversor utilizado no sistema fotovoltaico.

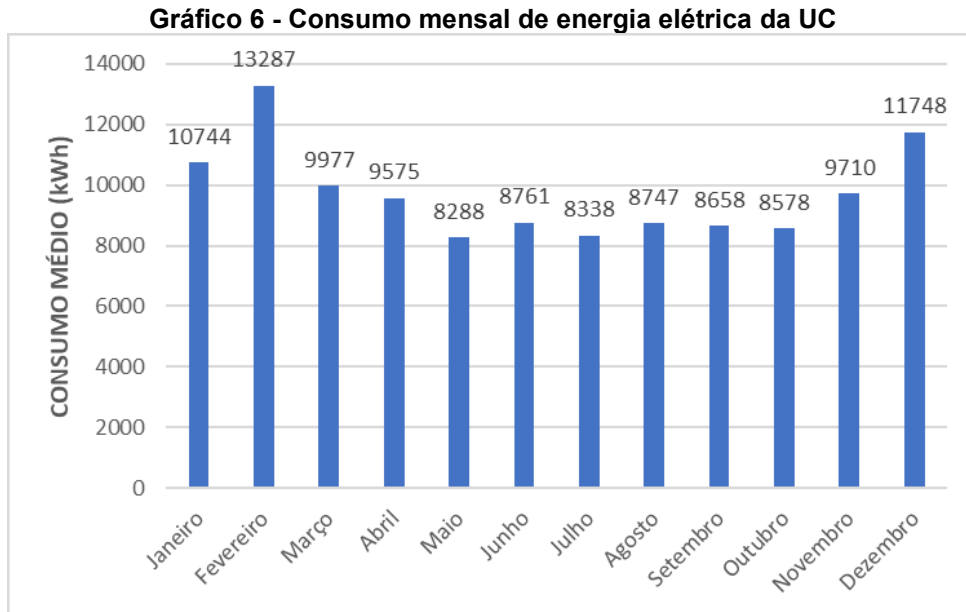
**Tabela 1 - Dados da UC referente ao estudo**

Parâmetro	Valor
Consumo anual	116.411 kWh
Consumo médio mensal	9.701 kWh
Irradiação diária do local	4,981 kWh/m <sup>2</sup> /dia
Tarifa	R\$ 0,519549
Grupo tarifário	A

Fonte – Autoria própria (2022)

### 4.2 Análise dos resultados

O Gráfico 6 ilustra o consumo mensal de energia elétrica do estudo de caso no ano de 2020.



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Somando o consumo de todos os meses, tem-se um consumo anual de 116.412 kWh e, com isso, um consumo médio mensal de 9.701 kWh. A Tabela 2 apresenta os dados do dimensionamento realizado para instalação do sistema fotovoltaico na unidade consumidora, extraído com base nos dados do dimensionamento realizado pela empresa responsável pela instalação do sistema fotovoltaico.

**Tabela 2 - Dados do dimensionamento realizado em projeto**

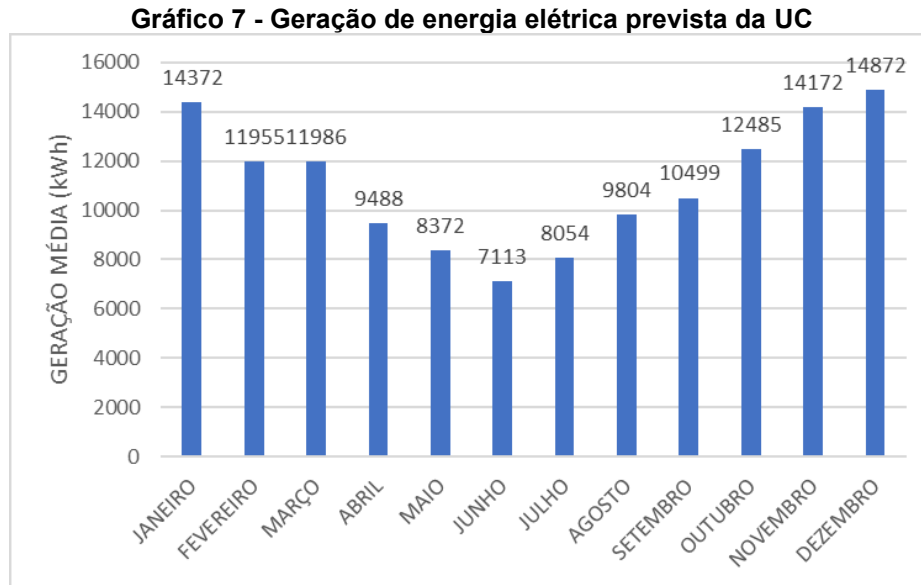
Parâmetro	Unidade
Módulo FV Canadian	238 un
Potência do sistema	91,63 kWp
Potência do inversor	75 kW
Orientação	10° Norte
Custo específico	3.274,04 R\$/kWp
Energia elétrica gerada no 1º ano	133.171 kWh

**Fonte – Autoria própria (2022)**

Para suprir o consumo de energia elétrica, foi utilizado 238 módulos fotovoltaicos da empresa Canadian Solar de 385 W, totalizando uma potência de 91,63 kWp e um inversor de 75 kW da empresa SMA.

O Gráfico 7 ilustra a geração de energia elétrica prevista para o sistema fotovoltaico para o ano de 2020 no dimensionamento realizado pela empresa responsável pela instalação do sistema fotovoltaico. A previsão em projeto é uma

geração de energia elétrica de 133.171 kWh para o primeiro ano, resultando em uma média mensal de 11.098 kWh.



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Será implementado o método proposto de Monitoramento & Verificação para sistemas fotovoltaicos no estudo em questão. Seguindo a ordem das etapas do fluxograma da Figura 12, inicialmente é necessário fazer o planejamento do período a ser implementado o estudo e como será feita a análise de dados.

A linha de base que será utilizada será do período pré-instalação do sistema fotovoltaico, quando foi realizado o dimensionamento. O período de implementação do método M&V para sistemas fotovoltaicos no estudo de caso será de 1 ano posterior à linha de base. Em seguida, serão obtidos/calculados os dados previstos em projeto e os dados reais de geração de energia elétrica após a instalação do sistema fotovoltaico. Com isso, será realizada uma comparação para averiguar se a geração de energia elétrica está de acordo com os valores previstos em projeto. Finalmente, será realizada a análise simplificada de viabilidade econômica.

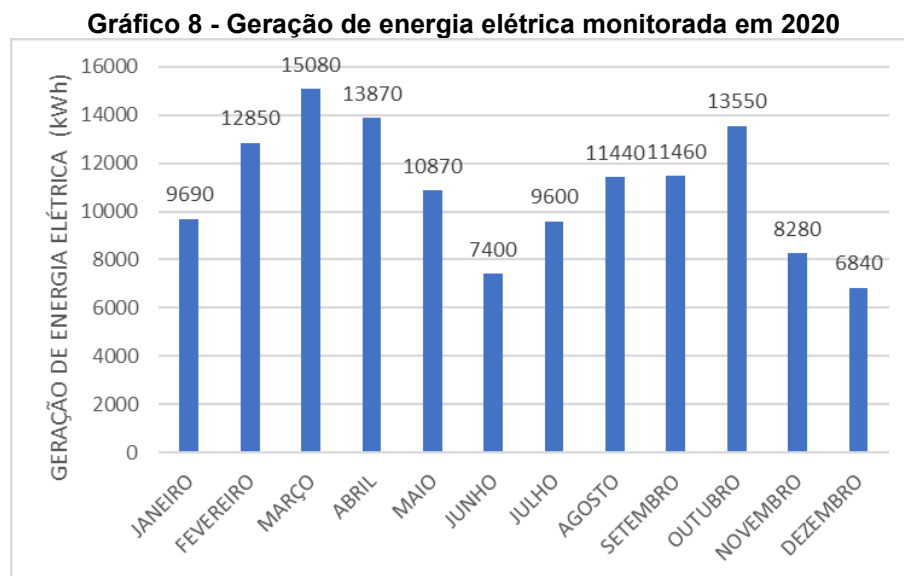
#### 4.2.1 Análise técnica

Para implementar a análise técnica é necessário seguir as seguintes etapas do fluxograma da Figura 12:

- Etapa 3.1.1: É possível obter os dados do dimensionamento realizado para instalação do sistema fotovoltaico ou pode-se realizar o dimensionamento a partir dos dados da unidade consumidora. Para implementação da análise técnica, será utilizado os dados da Tabela 2 do dimensionamento realizado pela empresa responsável pela instalação do sistema fotovoltaico na unidade consumidora, portanto a etapa 3.1.1.2.

- Etapa 3.1.2: Os dados reais de geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico foram obtidos pelo monitoramento do inversor do sistema.

O Gráfico 8 ilustra a geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico monitorada no ano de 2020, extraído com base nos dados disponibilizados pela empresa responsável pelo monitoramento do sistema fotovoltaico. Somando a geração de energia elétrica de todos os meses do ano de 2020, tem-se um total de 130.910 kWh. É possível destacar que a geração de energia elétrica realizada pelo sistema fotovoltaico referente ao estudo de caso está próxima do que foi prevista em projeto. A geração de energia elétrica anual prevista em projeto pelo sistema fotovoltaico era de 133.171 kWh e a geração de energia elétrica monitorada pelo sistema fotovoltaico foi de 130.910 kWh.

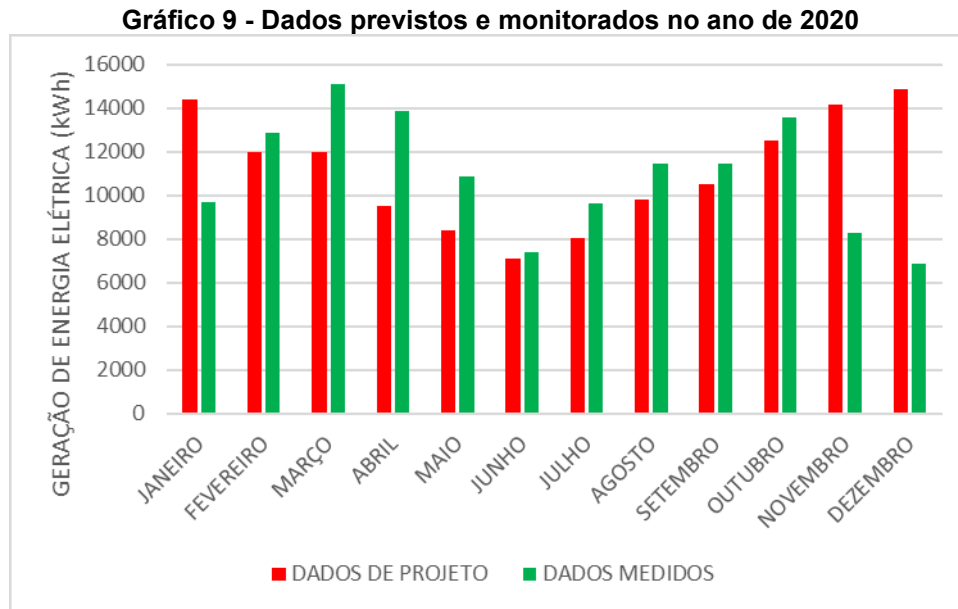


Fonte: Autoria própria (2022)

- Etapa 3.1.3: Será realizado uma comparação entre a geração de energia elétrica prevista no projeto e os dados reais de geração de energia elétrica do sistema

fotovoltaico. Posteriormente, será realizada uma estimativa de performance para explicar eventuais discrepâncias.

O Gráfico 9 apresenta uma comparação entre os dados previstos e monitorados no ano de 2020.



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Conforme ilustra o Gráfico 9, observa-se uma grande desigualdade em alguns meses específicos entre a geração de energia elétrica prevista em projeto e a geração real monitorada. Portanto, será comparado a média entre a geração de energia elétrica prevista e monitorada para posteriormente realizar uma estimativa de performance do sistema.

A Tabela 3 apresenta o cálculo da média de geração de energia elétrica dos dados previstos e dos dados monitorados no ano de 2020.

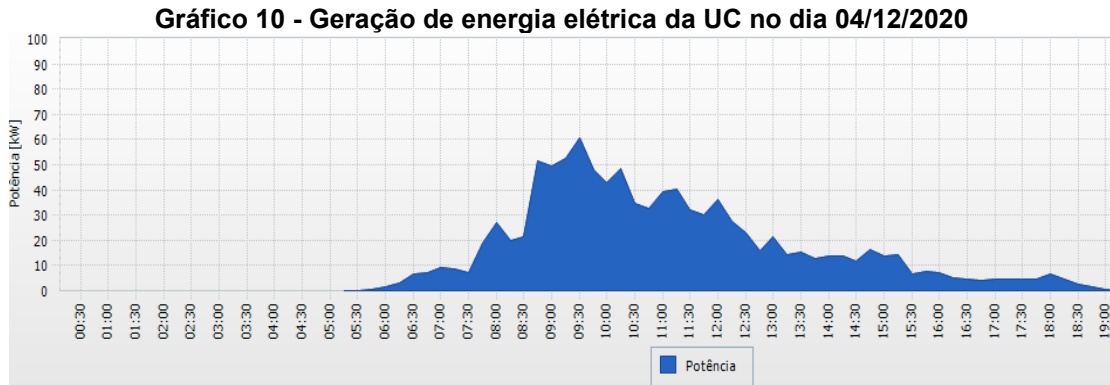
**Tabela 3 - Cálculo da média de geração de energia elétrica no ano de 2020**

Parâmetros	Valor	Unidade
Dados previstos	11.098	kWh
Dados monitorados	10.909	kWh

**Fonte: Autoria própria (2022)**

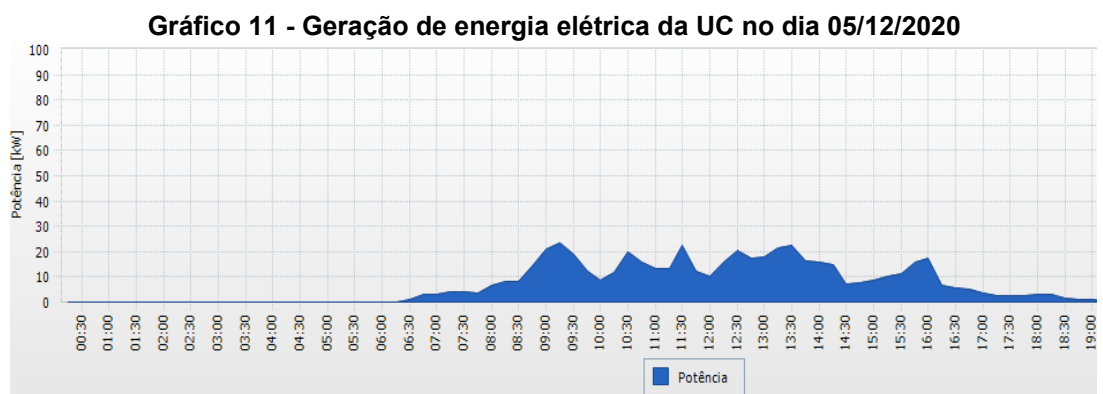
Analisando o Gráfico 9, observa-se que a maior diferença entre a geração de energia elétrica prevista e monitorada foi no mês de dezembro. A título de exemplificação, será realizada uma análise do perfil de geração para diferentes dias do mês de Dezembro. Para realizar a estimativa de performance, serão utilizados dados de três dias com condições temporais distintas.

O Gráfico 10 ilustra a geração de energia elétrica monitorado no dia 04 de dezembro de 2020 (SMA, 2020). Analisando o Gráfico 10 pode-se perceber uma geração de energia elétrica volátil durante o dia, de acordo com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), constatou-se bastantes nuvens nesse dia.



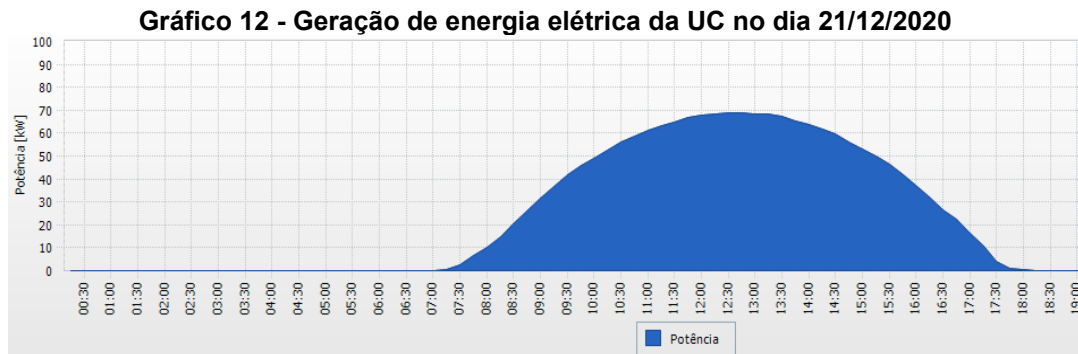
Fonte: SMA (2020)

O Gráfico 11 ilustra a geração de energia elétrica monitorado no dia 05 de dezembro de 2020 (SMA, 2020). Analisando o Gráfico 11, percebe-se uma geração de energia elétrica baixa quando comparada com os valores apresentados no Gráfico 10. De acordo com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), constatou-se chuva ao longo desse dia.



Fonte: SMA (2020)

O Gráfico 12 ilustra a geração de energia elétrica monitorado no dia 21 de dezembro de 2020 (SMA, 2020). Analisando o Gráfico 12, pode-se perceber uma geração de energia elétrica consideravelmente maior que dos Gráficos 10 e 11. De acordo com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), constatou-se que este dia foi bastante ensolarado.



**Fonte: SMA (2020)**

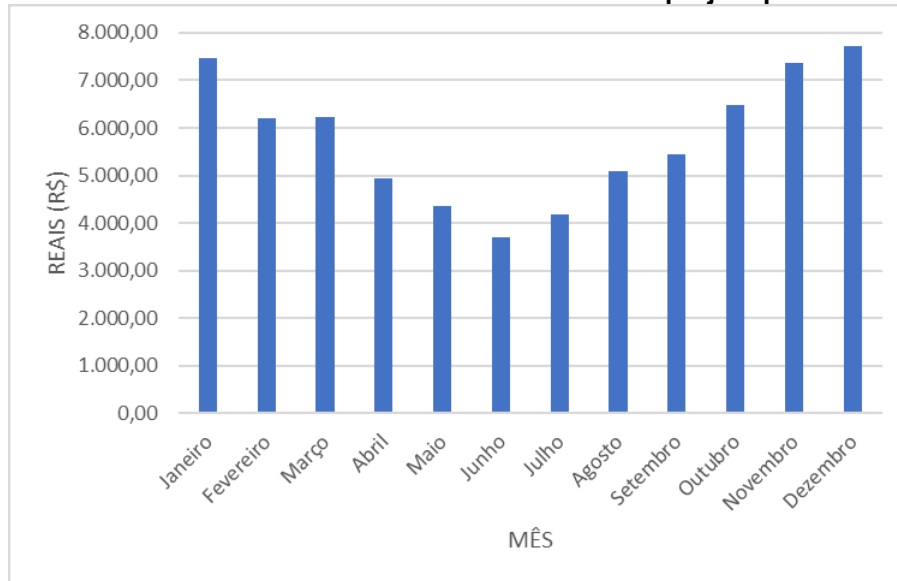
Os Gráficos 10, 11 e 12 mostram as variações diárias de geração de energia elétrica explicadas na Figura 2, que é causado pelas diferentes perdas enfrentadas pelo sistema fotovoltaico em cada dia, principalmente por dias nublados e chuvosos, que impactam consideravelmente na eficiência do sistema.

#### 4.2.2 Análise econômica

Para implementar a análise econômica é necessário seguir as etapas do fluxograma da Figura 12:

- Etapa 3.2.1: Será utilizado os dados de economia previstos no projeto realizado e fornecido pela empresa responsável pela instalação do sistema fotovoltaico.

O Gráfico 13 apresenta a estimativa de economia realizada na etapa de projeto para o ano de 2020.

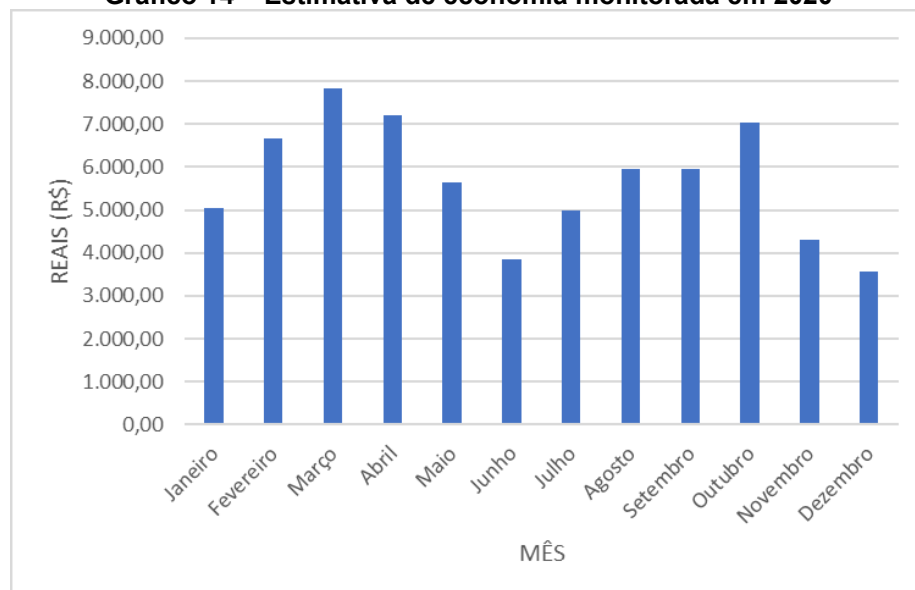
**Gráfico 13 - Estimativa de economia realizada em projeto para 2020**

Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 13 representa a economia prevista em projeto no ano da implementação do estudo de caso. Somando a economia de todos os meses, totaliza R\$ 69.182,79.

- Etapa 3.2.2: Serão utilizados os dados de economia monitorados no ano de 2020.

O Gráfico 14 apresenta a economia monitorada para o ano de 2020. Somando a economia de todos os meses, totaliza R\$ 68.018,11.

**Gráfico 14 – Estimativa de economia monitorada em 2020**

Fonte: Autoria própria (2022)



A partir dos dados de economia prevista e real apresentados nos Gráficos 13 e 14, pode-se calcular os seguintes indicadores de viabilidade: *Payback* descontado, TIR e o VPL.

A Tabela 4 apresenta os dados para realizar o cálculo dos indicadores de viabilidade.

**Tabela 4 - Dados para calcular os indicadores de viabilidade**

Parâmetros	Valor	Unidade
Fluxo de Caixa Inicial Previsto	69.182,79	R\$
Fluxo de Caixa Inicial Monitorado	68.018,11	R\$
Taxa Mínima de Atratividade Prevista	4	%
Investimento Inicial	300.000,00	R\$

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Inicialmente será calculado o *Payback* descontado da economia prevista em projeto e da economia real monitorada utilizando-se dos dados da Tabela 4 e das Equações (2) e (3). Para calcular a TIR, será utilizado a Equação (4) e os dados da Tabela 4. Posteriormente será calculado o VPL da economia prevista em projeto e da economia real monitorada, utilizando-se dos dados da Tabela 4 e da Equação (5).

A Tabela 5 apresenta o resultado dos cálculos dos indicadores de viabilidade econômica para economia prevista em projeto e para a economia monitorada.

Parâmetros	Valor	Unidade
<i>Payback</i> Descontado Economia Prevista	5	Anos
<i>Payback</i> Descontado Economia Monitorada	5	Anos
TIR Economia Prevista	22,93	%
TIR Economia Monitorada	22,63	%
VPL Economia Prevista	780.779,08	R\$
VPL Economia Monitorada	762.584,35	R\$

**Fonte: Autoria própria (2022)**

• Etapa 3.2.3: Comparando o *Payback* descontado da economia prevista em projeto e o *Payback* descontado da economia real monitorada, é possível observar valores similares. Comparando a TIR da economia prevista em projeto e a TIR da economia real, é possível analisar valores coerentes e comparando o VPL da economia prevista e o VPL da economia monitorada, é possível perceber valores também próximos.

## 5 CONCLUSÃO

A energia solar fotovoltaica é considerada uma das fontes de geração de energia elétrica mais promissoras da atualidade, pelas suas inúmeras vantagens apresentadas nesse trabalho e principalmente por ser uma fonte de geração de energia limpa.

A partir do desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso, foi possível destacar a evolução da energia solar fotovoltaica e sua importância, tanto no quesito ambiental quanto econômico. Porém, com o crescimento do mercado da energia solar fotovoltaica, também cresce a competitividade entre as empresas, fazendo com que as empresas busquem alternativas para tornar-se mais competitivas, optando muitas vezes por análises de projeções de viabilidade econômica irreais.

Neste trabalho, foi proposto a utilização simplificada do método de Monitoramento e Verificação (M&V) aplicado em sistemas fotovoltaicos. Através da análise técnica realizada no método M&V para sistemas fotovoltaicos, pode-se perceber uma geração de energia elétrica monitorada próxima da prevista em projeto. Em específico, a geração anual prevista em projeto para o ano de 2020 foi estimada em aproximadamente 133.171 kWh, uma média de aproximadamente 11.098 kWh por mês. A geração real monitorada para o ano de 2020 foi de 130.910 kWh (anual), uma média de aproximadamente 10.909 kWh por mês. A diferença resultante entre a geração de energia elétrica prevista em projeto e monitorada foi de aproximadamente 2%.

Através da análise econômica realizada no método M&V para sistemas fotovoltaicos, pode-se perceber coerência na comparação entre os indicadores de viabilidade da economia prevista e os indicadores de viabilidade da economia monitorada. Para os três indicadores de viabilidade a análise do projeto mostrou-se atrativo, uma vez que o *payback* descontado, tanto para a economia prevista quanto para a economia monitorada foi de aproximadamente 5 anos, a TIR da economia prevista e da economia monitorada é maior que a taxa mínima de atratividade e o VPL da economia prevista e economia monitorada é positivo.

Por fim, em projetos futuros com o mesmo tipo de aplicação desse trabalho, sugere-se que sejam elaborados estudos considerando um intervalo de tempo maior, e que também sejam realizadas comparações com outras formas de investimento

para averiguar qual método apresenta resultados mais eficientes tanto técnica quanto economicamente.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar. **5 motivos para adotar a energia solar residencial**. Disponível em <: <https://www.absolar.org.br/noticia/5-motivos-para-adotar-a-energia-solar-residencial>>. Acesso em 10 nov. 2021.
- ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar. **Energia solar fotovoltaica no Brasil**. Disponível em <: <https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/02/2020.11.24%20Infogr%C3%A1fico%20ABSOLAR%20n%C2%BA%2025.pdf>>. Acesso em 01 nov. 2021.
- ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar. **Energia solar atinge marca histórica e Brasil entra para grupo dos 15 países com maior geração**. Disponível em <: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-atinge-marca-historica-e-brasil-entra-para-grupo-dos-15-paises-com-maior-geracao/>>. Acesso em 02 nov. 2021.
- Agência Brasil. **Brasil em pauta discute os desafios da crise hídrica no país**. Disponível em: <: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-09/brasil-em-pauta-discute-os-desafios-da-crise-hidrica-no-pais>>. Acesso em 27 out. 2021.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Brasil alcança 170 mil megawatts de capacidade instalada em 2019**. Disponível em: < [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-alcanca-170-mil-megawatts-de-capacidade-instalada-em-2019/656877?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-alcanca-170-mil-megawatts-de-capacidade-instalada-em-2019/656877?inheritRedirect=false)>. Acesso em 30 out. 2021.
- ARAÚJO, A. J. N.; Bueno, T. B. A.; Rank, N. I., 2016. “**Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba**”. 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- BORDEAUX-REGO, Ricardo; PAULO, Goret Pereira; SPRITZER, Ilda Maria de Paiva; ZOTES, Luis Pérez. **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Energia solar princípios e aplicações**. Disponível em [http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf). Acesso em 13 de ago. 2018.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Expansão da Geração**. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>>. Acesso em: 30 out. 2021.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 28 out. 2021.
- EVO, Efficiency Valuation Organization. **What is M&V**. Disponível em <: <https://evo-world.org/en/m-v/what-is-m-v>>. Acesso em 07 nov. 2021.

FADIGAS, E. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo, v. 44, n. 8, p. 40–71, 2011.

Federal Energy Management Program. **M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0**. U.S Department Of Energy, v. 3, Novembro 2015. Acesso em: Novembro 2021.

FRONDIZI, Isaura Maria de Rezende Lopes. **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Guia de Orientação 2009**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2009.

HOJI, M. **Administração financeira**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

MACEDO, L.V.(Coord.) **Mudanças climáticas e desenvolvimento Limpo: Oportunidades para Governos Locais**. IN: Um Guia do ICLEI. Rio de Janeiro: ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade e LACS -Secretariado para América Latina e Caribe. fev.2005. p.114.

MALINOWSKI, Mariusz; LEON, José I.; ABU-RUB, Haitham. **Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends**. IEEE, Intitute of Electrical and Eletronics Engineers, 28 abr. 2017. Disponível em:< <https://ieeexplore.ieee.org/document/7914744>>. Acesso em 06 jun. 2017.

MARINI, J.A.; ROSSI, L.A. **Suprimento de eletricidade por meio de painel fotovoltaico: Programa computacional para dimensionamento**. São Paulo, Brasil: V CLAGTEF – Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2003.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Balanco de Energia**. Disponível em:< <http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/balanco-de-energia>>. Acesso em 01 nov. 2021.

PEREIRA, F. A., & OLIVEIRA, M. A. **Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica, 2011**. Porto: Publindústria.

PINHO; J. T.; GALDINO, M. A.(Orgs). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Revisada e Atualizada. CEPTEL – CRESESB: Rio de Janeiro, 2014.

TAHRI, A.; OOZEKI, T.; DRAOU, A.; **Monitoring and Evaluation of Photovoltaic System**. Energy Procedia, v. 42, January 2014, p. 456-464. Acesso em: Novembro 2021.

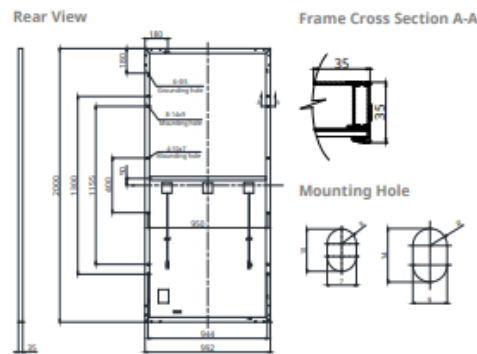
VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica**. [s.l: s.n.]. v. 27

WEG. Departamento de Energia Solar & Smart Grid. Apresentação durante seminário, 2015.

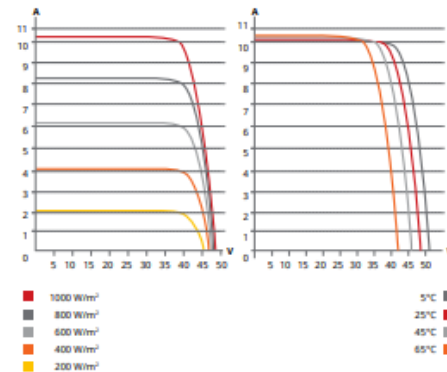
WOYTE, A. et al. **Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems**. Vol.13. March 2014. Acesso em Novembro 2021.

## APÊNDICE A - Folha de dados do módulo fotovoltaico utilizado no sistema fotovoltaico referente ao estudo

### ENGINEERING DRAWING (mm)



### CS3U-400MS / I-V CURVES



### ELECTRICAL DATA | STC\*

CS3U	380MS	385MS	390MS	395MS	400MS
Nominal Max. Power (Pmax)	380 W	385 W	390 W	395 W	400 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.0 V	40.2 V	40.4 V	40.6 V	40.8 V
Opt. Operating Current (Imp)	9.50 A	9.58 A	9.66 A	9.73 A	9.81 A
Open Circuit Voltage (Voc)	47.8 V	48.0 V	48.2 V	48.4 V	48.6 V
Short Circuit Current (Isc)	10.01 A	10.09 A	10.17 A	10.25 A	10.33 A
Module Efficiency	19.2%	19.4%	19.7%	19.9%	20.2%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C				
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)				
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or Class C (IEC 61730)				
Max. Series Fuse Rating	30 A				
Application Classification	Class A				
Power Tolerance	0 ~ + 10 W				

\* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

### ELECTRICAL DATA | NMOT\*

CS3U	380MS	385MS	390MS	395MS	400MS
Nominal Max. Power (Pmax)	283 W	287 W	290 W	294 W	298 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.2 V	37.4 V	37.6 V	37.8 V	38.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.60 A	7.66 A	7.72 A	7.78 A	7.84 A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.8 V	45.0 V	45.2 V	45.4 V	45.6 V
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<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

### MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	144 [2 X (12 X 6)]
Dimensions	2000 X 992 X 35 mm (78.7 X 39.1 X 1.38 in)
Weight	22.5 kg (49.6 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm <sup>2</sup> (IEC), 12 AWG (UL)
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)*
Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	660 pieces

\* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

### TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.36 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42 ± 3°C

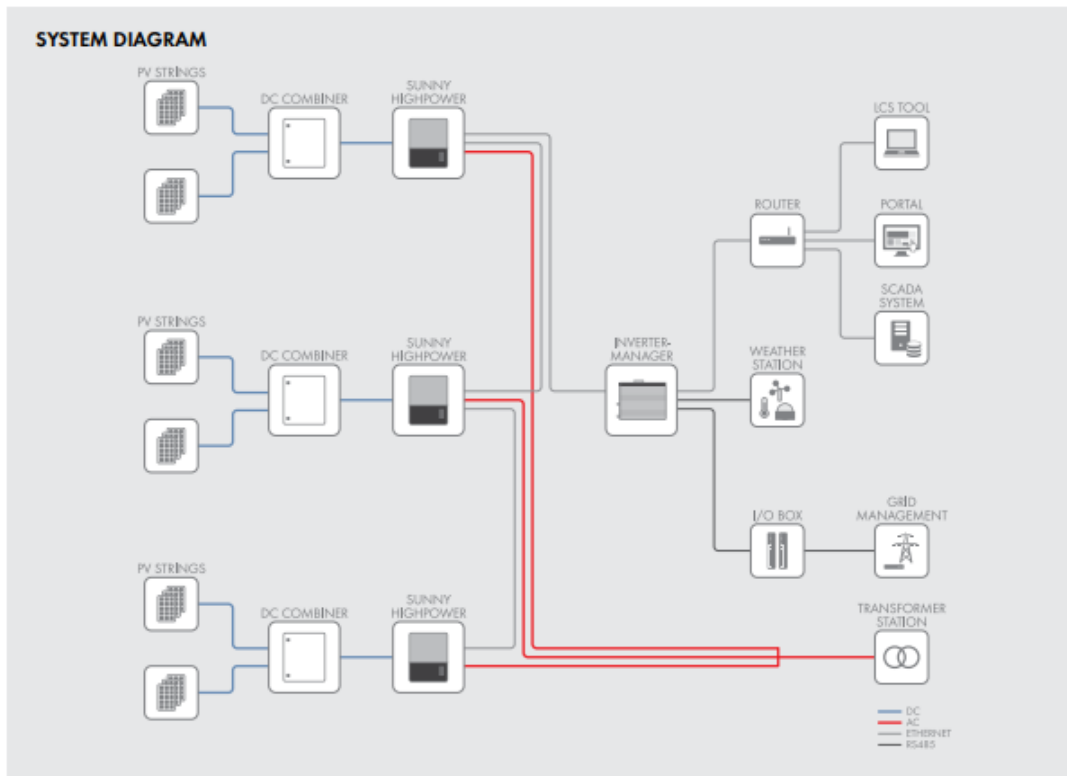
### PARTNER SECTION



\* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. Canadian Solar Inc. reserves the right to make necessary adjustments to the information described herein at any time without further notice. Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

**CANADIAN SOLAR INC.**  
545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, [www.canadiansolar.com](http://www.canadiansolar.com), [support@canadiansolar.com](mailto:support@canadiansolar.com)

## APÊNDICE B - Folha de dados do inversor dimensionado no sistema fotovoltaico referente ao estudo de caso



Technical Data	SMA Inverter Manager
<b>Voltage supply</b>	
Input voltage	9 to 36 Vdc
Power consumption	< 20 W
<b>General data</b>	
Dimensions (W/H/D)	160 / 125 / 49 mm (6.3 / 4.9 / 1.9 inches)
Weight	940 g (2 lbs)
Maximum allowed number of inverters	42
Degree of protection	IP21
Mounting	DIN top-hat rails or wall mounting
Operating temperature range	-40 °C to +85 °C (-40° F to +185° F)
Relative humidity (non-condensing)	5 % to 95 %
<b>Interfaces</b>	
PC user interface	LCS tool
Sensor interface / protocol	RS485 / Modbus RTU for SunSpec Alliance compatible weather station
Interface to inverter	1 Ethernet port (RJ45)
Interface for external network / protocol	1 Ethernet port (RJ45) / Modbus TCP, SunSpec Alliance
Interface to remote control	6 x DI via external SMA Digital I/O Box
Certificates and approvals (more available upon request)	UL 508, UL 60950-1, CSA C22.2 No. 60950-1-07, EN 55022 Class A, EN 60950-1, EN 61000-3-2 Class D, EN 61000-3-3, EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, EN 55024, FCC Part 1.5, Sub-part B Class A
SMA Inverter Manager type designation	IM-20
SMA Digital I/O Box type designation	IM-DIO-10

