

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

**GUILHERME PEREIRA SOUZA CRUZ
STEFFANY GALVÃO RABELLO DE ARAÚJO**

**SISTEMA COMPENSADOR DE TENSÃO CONTÍNUA PARA INVERSORES
SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Taubaté – SP

2023

GUILHERME PEREIRA SOUZA CRUZ
STEFFANY GALVÃO RABELLO DE ARAÚJO

**SISTEMA COMPENSADOR DE TENSÃO CONTÍNUA PARA INVERSORES
SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em **Engenharia Elétrica e Eletrônica.**

Orientador: Prof. Rubens Castilho Júnior.

Taubaté – SP

2023

Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau

A663s Araújo, Steffany Galvão Rabello de
Sistema compensador de tensão contínua para inversores solares
fotovoltaicos / Steffany Galvão Rabello de Araújo, Guilherme Pereira Souza
Cruz. -- 2023.
121 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2023.
Orientação: Prof. Rubens Castilho Junior, Departamento de Engenharia
Elétrica.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Circuito booster. 3. Viabilidade
econômica. 4. Sustentabilidade. I. Universidade de Taubaté. Departamento
de Engenharia Mecânica e Elétrica. Graduação em Engenharia Elétrica e
Eletrônica. II. Cruz, Guilherme Pereira Souza.

CDD – 621.3

**GUILHERME PEREIRA SOUZA CRUZ
STEFFANY GALVÃO RABELLO DE ARAÚJO**

**SISTEMA COMPENSADOR DE TENSÃO CONTÍNUA PARA INVERSORES
SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté.

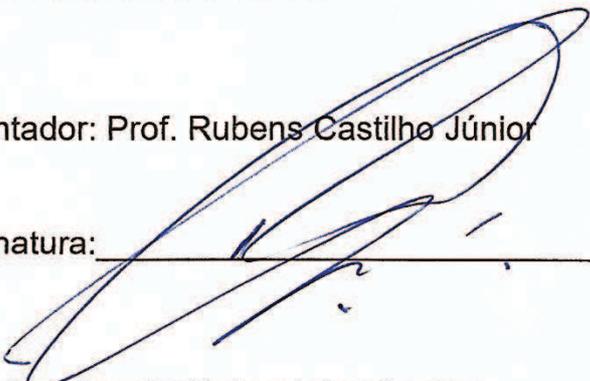
DATA: 06 / 12 / 2023

RESULTADO: 10.0

BANCA EXAMINADORA:

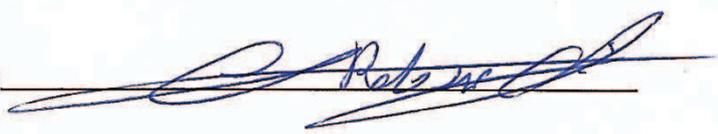
Orientador: Prof. Rubens Castilho Júnior

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof. Me. Sandro Botossi dos Santos

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof. Me. Seide da Cunha Filho

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Dezembro de 2023

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ter nos agraciado com sabedoria e determinação para conseguirmos chegar até a etapa final do curso.

Em especial as nossas famílias que, durante todos estes anos de graduação, nos apoiaram e incentivaram.

Aos professores pelos conhecimentos compartilhados, e por toda diretriz transmitida.

Ao nosso orientador, Eng. Rubens Castilho Júnior, pelo acompanhamento, apoio e orientação no decorrer das reuniões para a discussão do projeto desenvolvido.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que o sonho da graduação se tornasse realidade.

RESUMO

A ascensão da energia solar fotovoltaica no mercado de geração de energia elétrica, ocasiona a busca por projetos solares mais aprimorados, sendo destacadas, nas condições atuais do ramo de inovação tecnológica para esse setor, questões que garantam uma melhor geração com um custo financeiro mais atrativo, e que preze ainda mais pela sustentabilidade. Dessa forma, buscando melhor aproveitamento de uma usina fotovoltaica, por meio da economia nos gastos e da redução tanto de painéis solares, que serão descartados futuramente (no fim da vida útil do sistema), quanto na emissão de poluentes, como o CO₂, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de viabilidade de um sistema compensador de tensão contínua para sistemas fotovoltaicos. Esse estudo baseia-se na ampliação do sinal advindo das placas solares que estarão conectadas em série, sendo que, após essa modificação no sinal, a conexão decorrerá até o inversor de frequência, estabelecendo a continuação do processo normal de uma instalação solar fotovoltaica. Para atingir o que está sendo proposto, a metodologia fundamenta-se em testes utilizando um conversor *DC-DC* do tipo *booster*, fontes, cargas resistivas e seus resultados. Por meio da utilização desse procedimento, analisou-se que é possível a geração de energia elétrica ao se fazer uso de uma quantidade menor de módulos fotovoltaicos, posto que o valor de tensão fornecido pelas placas instaladas será amplificado o suficiente para fazer com que o inversor solar entre em funcionamento, porém, essa alternativa, diante da composição habitual das instalações fotovoltaicas, provou-se não ser viável em longo prazo, tanto economicamente quanto no que se refere à sustentabilidade. Embora pareça uma proposta bem chamativa em função da redução do custo inicial e da redução na quantidade de resíduos gerados ao fim da vida útil do sistema, as quedas na geração e nas economias totais, bem como na redução da emissão de CO₂, acabam fazendo com que a aplicabilidade desse tipo de configuração deixe de ser atrativa.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Circuito *booster*. Viabilidade econômica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The ascension of the photovoltaic energy in the electrical energy generation worldwide market results in the seek for improved solar projects being in the spotlight when it comes to system development; and in the current technology innovation scenario for this field, subjects related to cost reduction and sustainability are highlighted. Therefore, pursuing the idea of better performance of photovoltaic power stations by reducing both the total cost and the material disposal (at the end of the system's life cycle) and pollutant emission (such as CO₂), a huge number of proposals and innovative ideas is showing up as days go by, and every one of them with the same common goal: improvement. This graduation thesis' purpose is to demonstrate the viability study of a DC voltage compensation system. This study is based on amplifying the signal that comes from the solar panels connected to the system, and after the modification, the connection goes all the way up to the frequency inverter. The signal amplification demonstration is achieved by the usage of a DC-DC boost converter circuit, DC power supplies, resistive loads and the analysis of the results attained in lab testing. Following through with this procedure, it was concluded that it is possible indeed to generate electrical energy by using less photovoltaic modules since the modules' voltage will be increased enough to get the solar inverter properly working, however, this alternative to the ordinary photovoltaic energy generation systems proved to be not viable in the long-term (when referring to economy and sustainability), because even though it looks interesting due to the reductions on both initial cost and residue production at the end of the project's life span, the big reduction in critical aspects such as total energy generation, economy and CO₂ emission mitigation ends up causing this system configuration not suitable to be considered attractive during a project's design.

Keywords: Solar energy photovoltaic. Boost converter. Economic viability. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Instalação das Primeiras Placas Solares de Silício.....	22
Figura 2 – Primeiro Satélite utilizando Painéis Solares.....	23
Figura 3 – Composição da Matriz Elétrica Mundial, 2021.....	25
Figura 4 – Composição da Matriz Elétrica do Brasil, 2023.....	26
Figura 5 – Evolução da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.....	27
Figura 6 – Representação simplificada da composição da célula fotovoltaica.....	29
Figura 7 – Representação simplificada do comportamento da célula sob a luz solar.....	29
Figura 8 – Indicação do <i>Finger</i> e das <i>Busbars</i> em uma célula.....	30
Figura 9 – Diferenças das tecnologias de silício em uma placa solar.....	31
Figura 10 – Componentes do Módulo Fotovoltaico.....	33
Figura 11 – Fluxo de corrente com um diodo <i>by-pass</i> em funcionamento.....	34
Figura 12 – Utilização de painéis solares fotovoltaicos em pontos de iluminação.....	35
Figura 13 – Curvas da Corrente e Tensão em Diferentes Temperaturas das Células Fotovoltaicas.....	36
Figura 14 – Curvas da Corrente e Tensão em Diferentes Índices de Irradiação Solar.....	37
Figura 15 – Curvas da Potência e Tensão em Diferentes Índices de Irradiação Solar.....	38
Figura 16 – Ilustração das etapas de um sistema solar fotovoltaico.....	39
Figura 17 – Circuito base para a geração dos pulsos em um inversor solar.....	40
Figura 18 – Lógica de comparação dos comparadores “CMP1” e “CMP2”	41
Figura 19 – Relação visual entre o sinal <i>PWM</i> e o sinal médio	41
Figura 20 – Representação de uma <i>string</i> após o acionamento do <i>MPPT</i> do inversor.....	42
Figura 21 – Definição gráfica do <i>MPP</i> de um módulo fotovoltaico.....	43
Figura 22 – Diferença entre um sistema <i>on-grid</i> e um sistema <i>off-grid</i>	46
Figura 23 – Ilustração dos componentes de um sistema solar híbrido.....	47
Figura 24 – Topologia Básica de um Conversor <i>Step-up</i>	49
Figura 25 – Circuito de um Conversor <i>Step-up</i> com a chave SW fechada.....	50
Figura 26 – Polarização do indutor enquanto atuando como consumidor de energia.....	50
Figura 27 – Polarização do indutor enquanto atuando como consumidor de energia e associação em série com a fonte.....	51
Figura 28 – Topologia Básica de um Conversor <i>Step-down</i>	53
Figura 29 – Ilustração do funcionamento do circuito <i>Step-down</i> com SW fechada.....	53

Figura 30 – Histórico de consumo em uma fatura de energia.....	58
Figura 31 – Irradiação Solar Média para a cidade de Taubaté – SP por dia.....	59
Figura 32 – Ilustração da configuração utilizada para os testes sem carga.....	63
Figura 33 – Ilustração da configuração utilizada para a condição 1 dos testes com carga.....	67
Figura 34 – Ilustração da configuração utilizada para o segundo teste de operação com carga.....	69
Figura 35 – Ilustração da configuração utilizada para o terceiro teste de operação com carga.....	70
Figura 36 – <i>Datasheet</i> do Módulo Fotovoltaico de 550 W da marca Honor Solar.....	74
Figura 37 – <i>Datasheet</i> do Inversor Solar de 1 kW da marca Solis.....	75
Figura 38 – Alíquotas do ICMS fornecidas pela EDP SP, 2023.....	79
Figura 39 – Tarifas sem tributos definidas pela ANEEL, 2023.....	80
Figura 40 – Alterações Tarifárias por Bandeira, 2023.....	80
Figura 41 – Preços dos Sistemas Fotovoltaicos definidos pela GREENER, 2023.....	83
Figura 42 – Ilustração da separação do circuito em duas partes.....	86
Figura 43 – Gráfico de comparação da geração média total ao longo da vida útil de ambos os projetos.....	96
Figura 44 – Gráfico de comparação da economia total ao longo da vida útil de ambos os projetos.....	97
Figura 45 – Gráfico de comparação da média anual de emissão de CO ₂ evitada de ambos os projetos.....	98
Figura 46 – Gráfico de comparação do tempo de <i>payback</i> de ambos os projetos.....	98
Figura 47 – Principais componentes do <i>Step-up</i> utilizado em laboratório.....	113
Figura 48 – Modelo da ventoinha considerada na análise.....	114
Figura 49 – Configuração utilizada nos testes funcionais sem carga.....	115
Figura 50 – Registro de leitura 01 - Testes sem carga (Condição 1 - Quadro 5)	115
Figura 51 – Configuração utilizada na primeira condição dos testes funcionais com carga.....	116
Figura 52 – Registro de leitura 02 - Testes com carga (Condição 1 - Quadro 8)	116
Figura 53 – Configuração utilizada na segunda condição dos testes funcionais com carga.....	117
Figura 54 – Registro de leitura 03 - Testes com carga - tensão de entrada (Condição 2 - Quadro 9)	117

Figura 55 – Registro de leitura 04 - Testes com carga - corrente de entrada (Condição 2 - Quadro 9)	118
Figura 56 – Registro de leitura 05 – Testes com carga - tensão e corrente de saída (Condição 2 - Quadro 9)	118
Figura 57 – Configuração utilizada na terceira condição dos testes funcionais com carga.....	119
Figura 58 – Registro de leitura 06 – Testes com carga - tensão e corrente de entrada (Condição 3 - Quadro 10)	119
Figura 59 – Registro de leitura 07 – Testes com carga - tensão e corrente de saída (Condição 3 - Quadro 10)	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valor Médio das Perdas em um Sistema Solar Fotovoltaico.....	61
Quadro 2 – Valores dos Rendimentos Parciais.....	61
Quadro 3 – Resultados da condição 1 – entrada em 12 V e variação da saída pelos <i>trimpots</i>	64
Quadro 4 – Resultados da condição 1 – entrada em 24 V e variação da saída pelos <i>trimpots</i>	64
Quadro 5 – Resultados da condição 1 – entrada em 36 V e variação da saída pelos <i>trimpots</i>	65
Quadro 6 – Resultados da condição 1 – entrada em 48 V e variação da saída pelos <i>trimpots</i>	65
Quadro 7 – Resultados da condição 2 – saída fixa em 24 V e variação da entrada pela fonte.....	65
Quadro 8 – Resultados da condição 1 dos testes com carga.....	67
Quadro 9 – Resultados da condição 2 dos testes com carga.....	69
Quadro 10 – Resultados da condição 3 dos testes com carga.....	71
Quadro 11 – Resultados de geração e de emissão evitada de CO ₂ do sistema proposto.....	78
Quadro 12 – Valores correspondentes de cada tarifa com tributos.....	81
Quadro 13 – Valor da fatura de energia após a instalação do sistema fotovoltaico.....	82
Quadro 14 – Economia adquirida em função do tempo.....	82
Quadro 15 – Valor Médio das Perdas de “Ab”	87
Quadro 16 – Valor Médio das Perdas de “Db”	87
Quadro 17 – Valores dos Rendimentos Parciais de “Ab”	87
Quadro 18 – Valores dos Rendimentos Parciais de “Db”	88
Quadro 19 – Resultados de geração e de emissão evitada de CO ₂ do sistema proposto.....	91
Quadro 20 – Consumo médio da ventoinha em função do tempo de exposição médio de cada mês.....	93
Quadro 21 – Novos resultados de geração e de emissão evitada de CO ₂ do sistema proposto (após a dedução do consumo mensal da ventoinha)	94
Quadro 22 – Novos valores correspondentes de cada tarifa com tributos.....	95

Quadro 23 – Nova economia adquirida em função do tempo.....	95
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

IRENA – *International Renewable Energy Agency* (Agência Internacional para as Energias Renováveis)

NREL – *National Renewable Energy Laboratory* (Laboratório Nacional de Energia Renovável)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

MMGD – Micro e Minigeração Distribuída

SCEE – Sistema de Compensação de Energia Elétrica

ICMS – Imposto Sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços

IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano

CC/DC – Corrente Contínua

CA/AC – Corrente Alternada

PWM – *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento de Ponto de Potência Máxima)

MPP – *Maximum Power Point* (Ponto de Potência Máxima)

MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico)

UC – Unidade Consumidora

TE – Tarifa de Energia

TUSD – Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

PIS – Programa de Integração Social

COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

CIP – Contribuição de Iluminação Pública

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

STC – *Standard Test Conditions* (Condições Padrão de Teste)

NOCT – *Nominal Operating Cell Temperature* (Temperatura Nominal de Operação da Célula)

EDP – Energias de Portugal

SP – São Paulo

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RPM – Rotações Por Minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
k	quilo – prefixo para unidades de medidas, correspondente a 10^3
W	watt – unidade de potência
p	pico – sufixo que representa valor máximo de eficiência
M	mega – prefixo para unidades de medidas, correspondente a 10^6
h	hora – unidade de tempo
m ²	metro quadrado – unidade de grandeza física de área
$\eta\%$	rendimento percentual
V	volt – unidade de tensão elétrica
A	ampère – unidade de corrente elétrica
m	mili – prefixo para unidades de medidas, correspondente a 10^{-3}
Ω	ohm – unidade de resistência elétrica
G	giga – prefixo para unidades de medidas, correspondente a 10^9
R	real – moeda utilizada no Brasil
\$	cifrão – sufixo que representa o símbolo universal do dinheiro
R	resistência elétrica
C	capacitância elétrica
L	indutância elétrica
X _L	reatância indutiva
X _C	reatância capacitiva
g	grama – unidade da grandeza física de massa
cm	centímetro – unidade da grandeza física de comprimento
un	unidade
CO ₂	dióxido de carbono – composto químico
dB	decibel – unidade de medida relativa, correspondente a um décimo de bel (B)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	18
1.2 MOTIVAÇÃO.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	19
1.4 METODOLOGIA	19
1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 ORIGEM DA ENERGIA SOLAR	21
2.2 MATRIZ ELÉTRICA	25
2.2.1 Matriz Elétrica Mundial	25
2.2.2 Matriz Elétrica Brasileira	26
2.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO	28
2.3.1 Célula Fotovoltaica	28
2.3.2 Outros Componentes dos Painéis Solares	33
2.3.3 Curvas Características de um Módulo	36
2.4 INVERSOR SOLAR FOTOVOLTAICO	39
2.4.1 Definição de Inversor Solar	39
2.4.2 Princípio de Funcionamento de um Inversor Solar	40
2.4.3 Tipos de Inversores Solares	44
2.4.3.1 Inversor Solar <i>On-grid</i> (ou <i>Grid-tie</i>)	44
2.4.3.1.1 Inversor <i>String</i>	44
2.4.3.1.2 Microinversor Solar.....	45
2.4.3.2 Inversor Solar <i>Off-grid</i>	46
2.4.3.3 Inversor Solar Híbrido.....	47
2.5 CONVERSORES <i>DC-DC</i>	48
2.5.1 Conversor <i>Step-up</i> (<i>Boost</i>)	49
2.5.2 Conversor <i>Step-down</i> (<i>Buck</i>)	52
3 METODOLOGIA	55
3.1 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO <i>ON-GRID</i>	55
3.1.1 Análise da Fatura de Energia	56

3.1.2 Dados do CRESESB de Irradiação Solar	58
3.1.3 Fatores que Influenciam no Rendimento do Sistema Fotovoltaico ..	59
3.1.4 Cálculo da Potência em kWp	61
3.1.5 Definição da Quantidade de Módulo e do Inversor.....	62
3.2 TESTES DO CIRCUITO <i>BOOSTER</i> EM LABORATÓRIO	63
3.2.1 Testes Funcionais sem Carga	63
3.2.1.1 Condição 1 – Entrada Fixa e Variação da Tensão de Saída	64
3.2.1.2 Condição 2 – Saída fixa e Variação da Tensão de Entrada	65
3.2.1.3 Conclusão dos Testes sem Carga.....	66
3.2.2 Testes Funcionais com Carga	66
3.2.2.1 Condição 1 – Primeiro Teste de Operação com Carga	66
3.2.2.2 Condição 2 – Segundo Teste de Operação com Carga	68
3.2.2.3 Condição 3 – Terceiro Teste de Operação com Carga (após substituição da fonte).....	70
3.2.2.4 Cálculo do Rendimento Médio Geral e Conclusão dos Testes com Carga.....	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR CONSIDERANDO OS DISPOSITIVOS EM ANÁLISE	73
4.1.1 Geração Estimada do Projeto Solar Fotovoltaico	76
4.1.2 Economia Adquirida durante a Vida Útil dos Equipamentos	79
4.1.3 Custos Gerais do Sistema Fotovoltaico	83
4.1.4 Estimativa de Resíduos Gerados com o Sistema Solar	84
4.2 RECÁLCULO DO SISTEMA SOLAR CONSIDERANDO O CIRCUITO <i>BOOSTER</i>	86
4.2.1 Cálculo do Novo Rendimento Global.....	86
4.2.2 Cálculo da Nova Geração Mensal, Anual e Durante a Vida Útil	89
4.2.3 Dedução do Consumo Médio da Ventoinha	90
4.2.4 Recálculo da Geração Estimada do Sistema Solar Fotovoltaico	91
4.2.5 Recálculo do Consumo Médio da Ventoinha para cada mês segundo o Tempo de Exposição Médio.....	92
4.2.6 Dedução dos Valores de Geração Mensal Estimada após a Retirada dos Valores do Consumo Médio Mensal da Ventoinha	93

4.2.7 Recálculo do Valor de cada uma das Tarifas com Tributos em função do Novo Consumo Médio Mensal.....	94
4.2.8 Recálculo da Economia do Sistema em função do Novo Consumo Médio Mensal	95
4.2.9 Recálculo do Tempo de <i>Payback</i> do Sistema	95
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROJETOS ELABORADOS	96
5 CONCLUSÃO	100
REFERÊNCIAS.....	102
ANEXO A - <i>Datasheet</i> do Módulo Fotovoltaico de 550 W – Honor Solar	109
ANEXO B – <i>Datasheet</i> do Inversor <i>String</i> - Solis	111
APÊNDICE A – Características do <i>Step-up</i> utilizado em laboratório	113
APÊNDICE B – Características da Ventoinha considerada na análise	114
APÊNDICE C – Registros Fotográficos dos Ensaios em Laboratório.....	115

1 INTRODUÇÃO

Ao observar a composição da matriz elétrica mundial, percebe-se o quanto ainda se faz uso de recursos provenientes de fontes não renováveis de energia, sendo altamente degradante para o meio ambiente o uso de reações nucleares e dos insumos advindos dos combustíveis fósseis. Segundo dados do PORTAL SOLAR (2022), 36% da formação da matriz elétrica mundial é referente ao carvão mineral, e 22,9% de gás natural, sendo isso alarmante em termos ambientais. Por isso, as fontes de energia renováveis estão sendo cada vez mais priorizadas, posto que esses meios alternativos de energia, como por exemplo a energia eólica e a energia solar fotovoltaica, proporcionam menos impactos ao meio ambiente, sendo isso transparente, principalmente, por meio da redução na emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono, CO₂.

A matriz elétrica do Brasil evidencia que a geração de eletricidade do país é predominantemente realizada por meio de fontes de energia renováveis, posto que a principal fonte de energia utilizada é a hídrica, que corresponde a 50,1%, sendo que em seguida está a energia solar fotovoltaica, com participação em 15,4%, de acordo com a ABSOLAR (2023). Mesmo a matriz elétrica brasileira apresentando um comportamento voltado para as fontes de energia limpas, o país encontra-se comprometido, por intermédio de incentivos governamentais, com a implementação de fontes de energia renováveis, substancialmente com a energia solar fotovoltaica.

Analisando a localização geográfica do Brasil, percebe-se que a maior parte de seu território está situada, relativamente, perto da linha do Equador, corroborando para que o país possua um melhor aproveitamento da luz do sol, já que, devido à inclinação da Terra, não ocorrem tantas variações durante o dia, principalmente nos períodos dos equinócios. Os altos índices de radiação eletromagnética por todo o território brasileiro, sobretudo na região nordeste, remetem às condições favoráveis que o país possui para o investimento em energia solar fotovoltaica, sendo possível a transformação da radiação solar em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico, que ocorre nas células dos painéis solares.

Conforme dados obtidos pela empresa de consultoria do mercado de energia solar fotovoltaica, a GREENER (2023), ao avaliar os valores dos sistemas solares fotovoltaicos residenciais instalados, de 4 kWp, nota-se uma redução acumulativa de 58% entre junho/2016 e junho/2023, acreditando-se que esse declínio prevaleça para

os anos seguintes. No entanto, mesmo com essa expectativa de atenuação nos preços, a obtenção de um sistema de energia solar fotovoltaica, até então, possui um custo elevado, o que inviabiliza que essa fonte de energia limpa cresça ainda mais, evidenciando a necessidade pela busca por meios que tornem esse sistema mais acessível financeiramente, e que agreguem uma maior eficiência possível, viabilizando um projeto solar com um melhor proveito energético por um custo mais baixo.

A geração fotovoltaica é classificada como limpa, sustentável e renovável, sendo considerada a fonte de energia existente com maior responsabilidade ambiental, uma vez que 90% dos materiais que compõem os painéis solares são recicláveis. (KINSOL, 2023). Entretanto, segundo uma pesquisa realizada pela IRENA, em 2016, foi estimado que cerca de 550 mil toneladas de módulos fotovoltaicos deverão ser descartadas no Brasil até o ano de 2050, sendo essa estimativa, para o mundo inteiro, em torno de 78 milhões de toneladas referente ao acúmulo de todos os equipamentos fotovoltaicos. Diante dessa quantidade abundante de materiais, torna-se preocupante, do ponto de vista ambiental, o fato do possível descarte inapropriado destes, relatando o anseio por novas maneiras que possibilitem que os sistemas sejam eficientes com uma menor quantidade de módulos fotovoltaicos acoplada ao sistema, ou seja, com uma quantidade reduzida de materiais.

Visando a análise de uma possível solução para as questões expostas sobre o sistema solar fotovoltaico, referentes ao custo elevado e à redução na quantidade dos materiais descartados ao fim da vida útil do sistema, este trabalho tem por objetivo o estudo de viabilidade da aplicação de um dispositivo capaz de ampliar o sinal de tensão contínua proveniente de um painel solar. Com isso, tem-se a proposta de fazer com que o sistema fotovoltaico possa ser igualmente ou até mesmo mais eficiente com menos módulos introduzidos em seus arranjos. Dessa forma, com esse mecanismo de compensação de tensão contínua, espera-se tornar possível a diminuição mútua dos preços dos sistemas solares instalados, e da quantidade prevista, para os próximos anos, dos painéis solares que serão descartados ao meio ambiente, além da redução na emissão de gases poluentes na atmosfera.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo retratar a análise da possibilidade de implementação de um sistema de energia solar fotovoltaica com um custo mais acessível, e que acarrete em uma quantidade menor de materiais a serem descartados no final da vida útil do sistema. Isso será possível por meio da utilização de um circuito *booster* como compensador de tensão contínua, que possibilitará o acionamento do inversor *string* com o uso de menos módulos fotovoltaicos integrados ao sistema solar.

1.2 MOTIVAÇÃO

Fazer com que a aquisição de um sistema de energia solar fotovoltaica se torne financeiramente acessível à população menos favorecida do país, além de minimizar um possível problema de descarte inadequado, para os anos seguintes, dos módulos fotovoltaicos. Com isso, espera-se que haja um aumento significativo relacionado à implementação de sistemas fotovoltaicos, e que a sociedade possa se conscientizar sobre a importância ambiental de se investir nessa fonte de energia limpa e renovável.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Com a introdução do dispositivo juntamente com o sistema solar fotovoltaico, é possível o aumento no sinal de tensão advindo dos módulos, possibilitando a geração de energia com uma quantidade inferior de painéis solares. Dessa forma, o trabalho se justifica pela análise do impacto da diminuição na quantidade de placas solares, utilizadas no sistema fotovoltaico, devido a implementação desse dispositivo.

1.4 METODOLOGIA

Utilizou-se de catálogos de módulos e de inversores para buscar referências de valores de corrente e tensão. Foram efetuados testes laboratoriais utilizando componentes eletrônicos, tais como circuitos *booster*, fontes *DC* e cargas resistivas. Mais adiante nos ensaios, observou-se o comportamento do *booster* ao se utilizar, como fonte de alimentação, um transformador variador de tensão, visando simular a aplicação da tensão vinda de um módulo fotovoltaico sobre o sistema compensador. Por meio desses testes, foi possível analisar, de forma simplificada, uma situação

relativamente similar a um sistema solar real, obtendo-se informações referentes ao comportamento do circuito *booster*, sendo essas referências necessárias para o desenvolvimento da análise da viabilidade proposta.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho será dividido em 5 partes, sendo a primeira estabelecida pela “Introdução”, que será responsável pela abordagem dos objetivos e das justificativas dessa pesquisa, além de retratar os motivos que influenciaram para o seu desenvolvimento. Na segunda parte, tem-se a “Revisão Bibliográfica”, que apresentará os quesitos históricos da energia solar, a importância e a motivação da participação dessa fonte alternativa de energia na matriz elétrica brasileira, os equipamentos utilizados em um sistema fotovoltaico, e o funcionamento e a aplicabilidade do circuito *booster* para o seu uso juntamente com uma usina fotovoltaica. Na terceira parte, por meio do descritivo e da demonstração dos processos efetuados, será comentada a parte da “Metodologia”, evidenciando qual foi o desenvolvimento desse trabalho. No capítulo 4, tem-se os “Resultados e Discussão”, que servirá como base para a quinta e última parte, que é estabelecida pela “Conclusão”, cujo local será destinado para a análise da viabilidade do projeto em questão, podendo servir como sugestão para outros potenciais trabalhos que prossigam com essa pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados alguns fatos que foram significativos para a origem da energia solar, além de retratar a importância e a motivação da participação dessa fonte alternativa de energia na matriz elétrica brasileira. Também serão apresentados os equipamentos utilizados em um sistema solar fotovoltaico para a geração de energia elétrica, e o funcionamento e a aplicabilidade do circuito *booster* para o seu uso atrelado com uma usina fotovoltaica.

2.1 ORIGEM DA ENERGIA SOLAR

A origem da energia solar fotovoltaica ocorreu em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, após a análise e descoberta do efeito fotovoltaico, que foi ocasionado devido a exposição à radiação eletromagnética de uma célula eletroquímica, sendo observado a geração de uma diferença de potencial entre seus dois eletrodos. Desse modo, o efeito fotovoltaico denomina-se como sendo o processo de geração de tensão e corrente elétrica contínua em um material semicondutor quando o mesmo é submetido à luz.

A criação da primeira célula fotovoltaica, produzida de selênio revestido de ouro, ocorreu em 1883 por Charles Fritts, sendo instalada em um telhado na cidade de Nova York. (MARINGÁ SOLAR, 2022). No entanto, somente em 1954 foi que os painéis solares passaram a ser viáveis para as aplicações práticas, em consequência dos estudos e da patente de Russell Shoemaker Ohl perante a idealização da célula solar moderna. Com isso, foi instituída a primeira placa solar utilizando junções P-N de silício, resultando em uma maior eficiência comparada a célula anterior de selênio, além de estabelecer a noção do formato, que se tem atualmente, do módulo fotovoltaico. (PORTAL SOLAR, 2022).

O desenvolvimento da célula solar de silício, tornou-se possível devido aos estudos dos cientistas do laboratório Bell Labs (Calvin Fuller, Gerald Pearson e Daryl Chapin), que elaboraram a dopagem do silício e a estabilização da placa composta por esse mesmo elemento químico. Esses proveitos foram resultados de reações químicas provenientes do contato de uma junção P-N ou diodo com placas mergulhadas em lítio, gerando um comportamento fotovoltaico nesses materiais analisados. No ano de 1955, em Americus, na Geórgia nos Estados Unidos da

América, foi possível a instalação dos primeiros painéis solares, sendo utilizados como fonte de alimentação para redes telefônicas remotas, estando representado isso na figura 1.

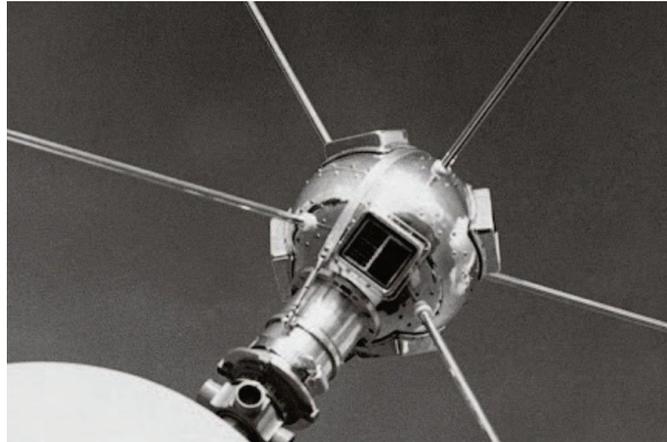
Figura 1 – Instalação das Primeiras Placas Solares de Silício.



Fonte: ENERGÊS: História da Energia Solar, 2020.

O início da utilização dos painéis solares se deu de forma impactante, já que em 1958, pouco tempo depois das primeiras placas instaladas, seis painéis solares, com capacidade instalada de 1 W cada, foram mandados ao espaço anexados ao satélite Vanguard I, servindo como fonte de alimentação para o funcionamento de seus dois transmissores de rádio durante a viagem, sendo ilustrado na figura 2. (CANAL SOLAR, 2021). Após esse marco histórico, surgiram os primeiros sistemas fotovoltaicos para residências, comércios, e para meios de transportes como aviões, ônibus e navios, além de novos estudos buscando aprimorar a eficiência adquirida, até o momento, das placas solares.

Figura 2 – Primeiro Satélite utilizando Painéis Solares.



Fonte: CANAL SOLAR: 63 anos do lançamento do primeiro satélite alimentado por energia solar, 2021.

A eficiência das placas solares, na geração de corrente elétrica contínua, começou em 1% com a criação da célula de selênio, sendo que após o desenvolvimento da primeira placa de silício, esse percentual alterou-se para 6%, designando esse aumento como um avanço esperado, diante do intervalo de tempo, de aproximadamente sete décadas, de uma inovação para a outra. Segundo dados do PORTAL SOLAR (2022), no ano de 1992, foi desenvolvida a célula de filme fino, estabelecendo um desempenho de conversão elétrica de 15,89%, sendo que após dois anos, em 1994, foi idealizada, pela NREL, a célula com maior eficácia alcançada até então, superando em 30% a eficiência de conversão, além de demonstrar o rápido progresso entre as tecnologias fotovoltaicas.

Devido aos avanços tecnológicos e a procura por novos meios de geração de energia elétrica, no ano de 1999, a energia solar fotovoltaica alcançou, no mundo inteiro, a capacidade de 1000 MW instalados. (MARINGÁ SOLAR, 2022). A produção anual mundial de painéis solares, elevou-se para 4200 MWp, em 2000, após a maioria dos países de Primeiro Mundo optarem pela utilização dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede da concessionária (*On-Grid*), com o intuito de demandar a energia gerada para a rede elétrica convencional. (PORTAL SOLAR, 2022).

A rápida expansão das fábricas na China, no ano de 2011, perante a fabricação dos equipamentos utilizados na instalação de um sistema solar fotovoltaico, desencadeou um crescimento mundialmente significativo nesse setor. (PORTAL SOLAR, 2022). Em decorrência da grande oferta de fabricantes no ramo solar, os custos de produção se tornaram mais acessíveis, o que, conseqüentemente,

possibilitou que as instalações desses sistemas, também, tivessem seus valores reduzidos, acarretando em novos projetos, apesar de que, mesmo com essa redução, esse tipo de instalação ainda apresenta um valor de alta importância monetária.

No Brasil, a energia solar fotovoltaica teve seu crescimento impulsionado em 2012, após a homologação da Resolução Normativa N° 482 (instituída pela ANEEL), que normatizou as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída em relação aos sistemas de distribuição e compensação de energia elétrica. (PORTAL SOLAR, 2022). Com isso, possibilitou a geração de energia elétrica por parte de qualquer consumidor, sendo concebível a conexão desse sistema, de energia renovável, na rede da concessionária, podendo resultar em um acúmulo de créditos energéticos mediante ao excedente de energia elétrica gerada. Com essa regulamentação, estipulou-se, inicialmente, que para uma potência instalada menor ou igual a 100 kW, tinha-se um sistema de microgeração distribuída, e para uma potência instalada acima de 100 kW e menor ou igual a 1 MW, tinha-se um sistema de minigeração distribuída. (BLUE SOL, 2020).

Com o intuito de aprimorar a regulamentação 482/2012, a Resolução Normativa N° 687, de 2015, determinou que os sistemas definidos como microgeração distribuída seriam aqueles com potência instalada menor ou igual a 75 kW, e os sistemas de minigeração distribuída, com potência instalada acima de 75 kW e menor ou igual a 3 MW para as fontes hídricas, e até 5 MW para as demais fontes de energia renováveis. Além disso, foi estabelecida, por essa regulamentação, melhorias em relação ao mercado da geração distribuída de energia, com a criação de algumas modalidades de participação do SCEE, tais como: múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada e autoconsumo remoto, acarretando para uma ampliação na busca pela autogeração de energia elétrica por parte dos consumidores. (BLUE SOL, 2020).

A atualização mais recente, até o momento, efetuada em termos normativos, foi a Resolução Normativa N° 1059, de 2023, cuja aplicação se estabelece às regras de MMGD, que foram modificadas pela ANEEL com base na Lei N° 14.300/2022, tendo como um dos objetivos o aprimoramento dos limites de potência instalada. Para essa nova regulamentação, foi definido que o conceito de microgeração distribuída se estabelece para a potência instalada inferior ou igual a 75 kW, sendo que para a minigeração distribuída, a potência instalada tem que ser superior a 75 kW e menor a 3 MW para as fontes não despacháveis, ou seja, que são impossibilitadas de armazenar a energia produzida, e menor ou igual a 5 MW para as fontes

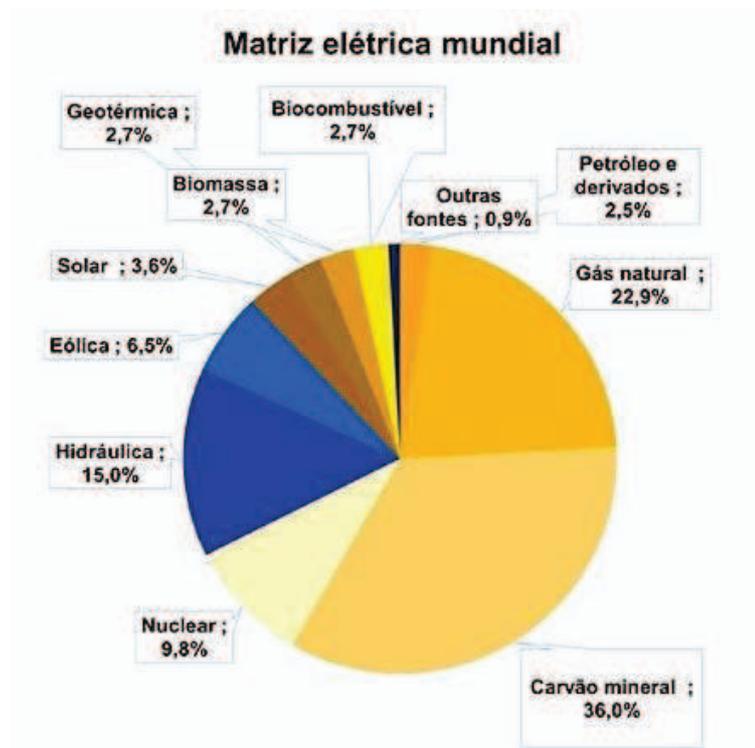
despacháveis, que possuem o controle sobre o armazenamento da energia elétrica gerada. (ANEEL, 2023).

2.2 MATRIZ ELÉTRICA

2.2.1 Matriz Elétrica Mundial

A matriz elétrica é constituída pelo conjunto de recursos disponíveis, em um país, estado ou região, cuja utilização está relacionada apenas para a geração de energia elétrica, sendo a matriz elétrica mundial composta, em sua maioria, por fontes de energia provenientes de elementos não renováveis, tendo o carvão mineral e o gás natural como principais fontes de energia, sendo representado isso na figura 3. Dessa forma, fica evidente a necessidade de implementação de mais fontes de energia renováveis no cenário da matriz elétrica mundial.

Figura 3 – Composição da Matriz Elétrica Mundial, 2021.



Fonte: PORTAL SOLAR: Matriz energética brasileira e matriz elétrica brasileira, 2022.

De acordo com os dados do PORTAL SOLAR (2022), no ano de 2021, a matriz elétrica mundial era formada em 72,1% por fontes de energia oriundas de

combustíveis fósseis e de reações nucleares, corroborando para o agravamento do efeito estufa por meio da liberação de gases poluentes na atmosfera. Os processos de combustão dessas fontes convencionais, como o petróleo e o carvão mineral, para a geração de energia elétrica, resultam na emissão desses poluentes. Ademais, há também uma preocupação em relação ao esgotamento dos recursos não renováveis, posto que esses não possuem a capacidade de renovação em um curto prazo de tempo, podendo ou não serem repostos na natureza após milhares de anos.

2.2.2 Matriz Elétrica Brasileira

Conforme dados da ABSOLAR (2023), 85,5% da composição da matriz elétrica do Brasil equivalem as fontes de energia renováveis, diferenciando-se do que foi analisado na matriz elétrica mundial, estando ilustrado na figura 4 o infográfico da matriz elétrica brasileira. Grande parte desse percentual é referente a hidráulica, acarretando para uma dependência em relação ao índice pluviométrico, o que causa uma apreensão no que se refere à escassez de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas, visto que isso pode ocasionar uma crise de energia elétrica no país, como evidenciada no ano de 2021 e em anos anteriores.

Figura 4 – Composição da Matriz Elétrica do Brasil, 2023.



Fonte: ABSOLAR, 2023.

Buscando meios alternativos para atenuar a centralização da geração de energia elétrica, atribuída as usinas hidrelétricas, e para a melhor distribuição na composição da matriz elétrica brasileira, encontra-se, dentre as fontes de energia renováveis, a energia solar fotovoltaica, cujo crescimento está se destacando, atualmente, na matriz elétrica do país. Dessa forma, percebe-se que o aumento na utilização da tecnologia fotovoltaica está se estabelecendo exponencialmente, representando a segunda fonte de energia com o maior percentual na capacidade gerada de energia elétrica do país.

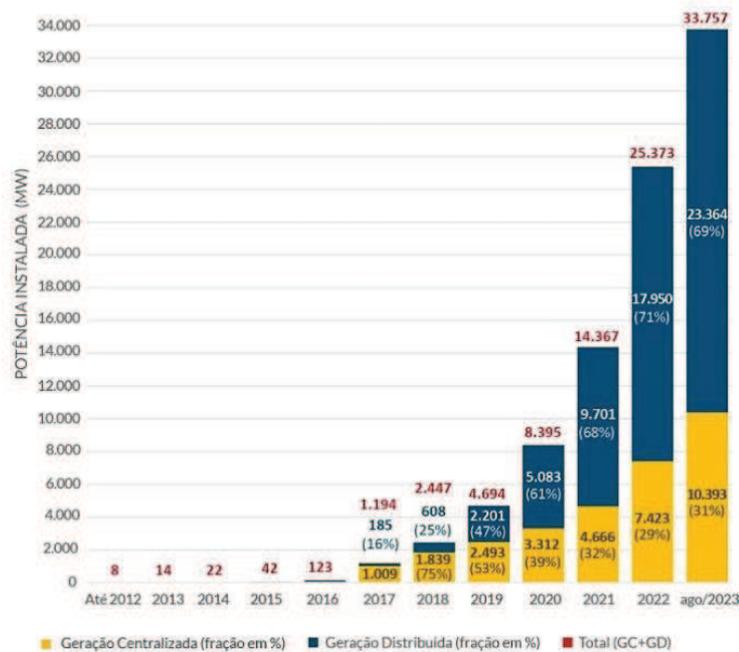
Um fator relevante para a instalação das usinas solares fotovoltaicas, é a condição privilegiada que o Brasil possui em relação aos elevados índices de radiação eletromagnética por todo o seu território, sendo isso possível devido a sua localização geográfica estar, relativamente, próxima da linha do Equador. Além disso, a energia solar e a energia eólica são consideradas as mais sustentáveis, já que são as menos nocivas para o meio ambiente, com impactos ambientais mínimos e com o fato de não emitirem gases poluentes na atmosfera, sendo consideradas limpas e renováveis. (ESFERA ENERGIA, 2022).

Com base nos estudos da ANEEL (2023) representados na figura 5, desde o ano de 2012, a partir da criação da Resolução Normativa 482, a energia solar fotovoltaica vem apresentando um comportamento de rápida ascensão no Brasil, sendo que cada vez mais essa inovação tecnológica cresce no país, haja vista que foram implementados incentivos fiscais para impulsionar essa expansão. Com isso, tornou-se possível transformar uma instalação fotovoltaica em algo financeiramente mais viável e com mais vantagens a serem adquiridas com o seu uso, tendo entre os privilégios concedidos a isenção do ICMS, o desconto no IPTU (em alguns municípios), a inclusão no programa do Governo “Minha Casa, Minha Vida”, a isenção de imposto de importação e a redução do imposto de renda sobre a venda do imóvel. (PORTAL SOLAR, 2023).

Figura 5 – Evolução da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.

Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.



Fonte: ABSOLAR, 2023.

2.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO

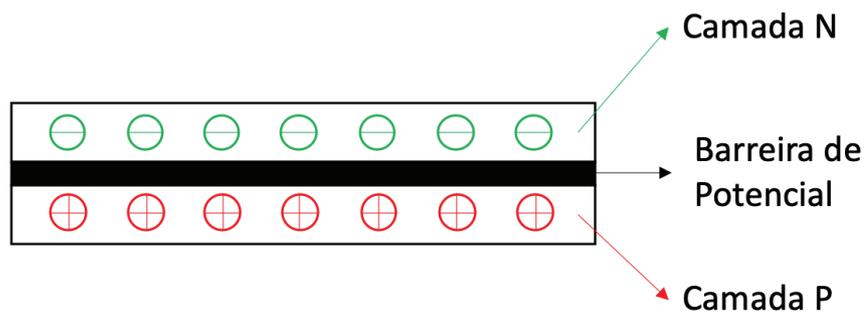
Os módulos fotovoltaicos, conhecidos popularmente por placas ou painéis solares, são os dispositivos responsáveis pela conversão da radiação eletromagnética em energia elétrica, sendo esse fenômeno denominado como efeito fotovoltaico, que ocorre nas células fotovoltaicas de um módulo. Os painéis solares mais modernos, possuem 60, 72 ou 144 células em sua composição, estando essas interligadas em série (*substrings*), uma vez que uma célula individual não seria suficiente para gerar a tensão necessária para o funcionamento da maioria das aplicações elétricas. Por meio desses equipamentos, viabiliza-se a expansão do uso de uma fonte de energia limpa e renovável para a geração de eletricidade, contribuindo para uma redução significativa dos impactos ambientais ocasionados pelo uso das fontes convencionais.

2.3.1 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são produzidas, principalmente, por meio de materiais semicondutores, os quais não se classificam como condutores ou isolantes, podendo

ter suas propriedades elétricas alteradas por meio de processos de dopagem, que consistem na adição de outros materiais em sua composição. A formação dessas células é determinada pela junção P-N, sendo estabelecida por duas camadas de material semicondutor que sofreram recombinação, gerando uma camada N (negativa) – que possui excesso de elétrons, e uma outra camada P (positiva) – que apresenta uma falta de elétrons. Com isso, ao colocar essas duas camadas em contato, evidencia-se a formação de um campo elétrico entre elas, o qual funciona como uma barreira de potencial, impossibilitando o fluxo de elétrons da camada N para a P, ou seja, não ocorre a circulação de corrente elétrica na célula, conforme apresentado na figura 6.

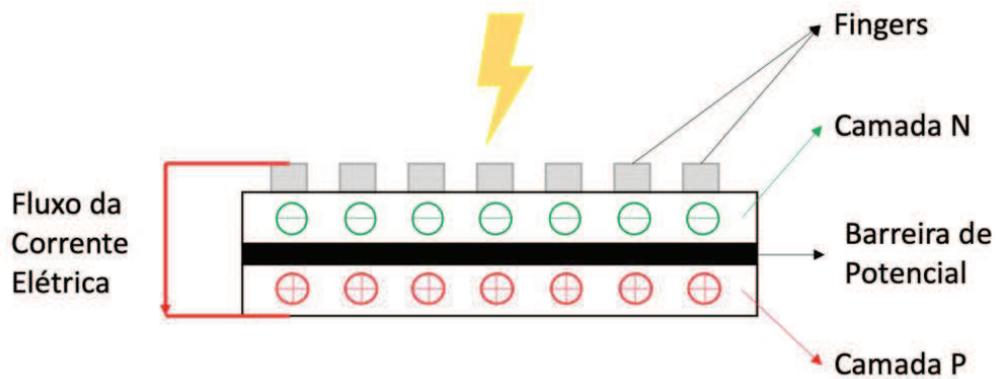
Figura 6 – Representação simplificada da composição da célula fotovoltaica.



Fonte: FOTUS, 2021.

Após a incidência da radiação solar sobre a célula fotovoltaica, ocorre a energização dos elétrons da camada N, possibilitando que os mesmos ultrapassem a barreira de potencial e consigam chegar até a camada P, acarretando para a formação de um fluxo ordenado de elétrons, ou melhor, de uma corrente elétrica contínua, como representado na figura 7 a seguir.

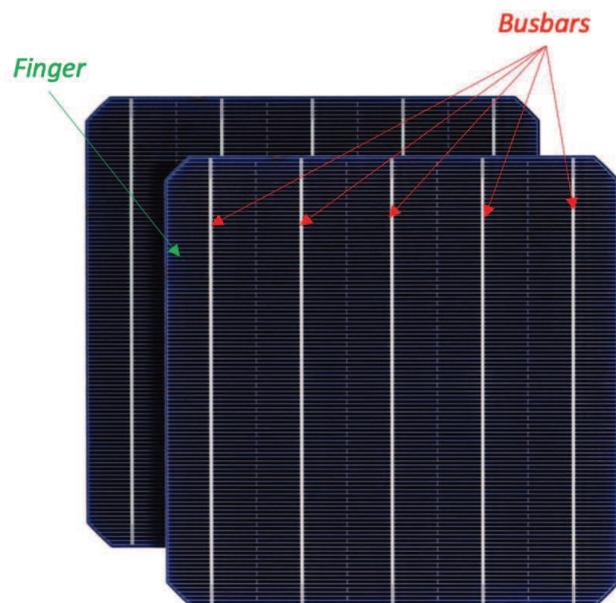
Figura 7 – Representação simplificada do comportamento da célula sob a luz solar.



Fonte: FOTUS, 2021.

A corrente elétrica contínua, gerada pela célula, é coletada por meio de eletrodos metálicos, denominados como *fingers*, sendo que, posteriormente, esse fluxo de elétrons, será encaminhado para as *busbars*, que são linhas metálicas cuja as funções são conectar as células e estabelecer o fluxo ordenado da corrente elétrica entre as mesmas, estando esses representados na figura 8. Dessa forma, define-se que o módulo fotovoltaico que possuir mais *busbars* em sua estrutura, apresentará menor perda por efeito Joule, posto que haverá mais percursos para a circulação de elétrons, não ocasionando perdas por aquecimento nesse painel solar.

Figura 8 – Indicação do *Finger* e das *Busbars* em uma célula.



Fonte: FOTUS, 2021.

Segundo as informações do FOTUS (2021), o material semiconductor mais utilizado para a fabricação dos painéis solares é o silício, uma vez que participa da fabricação de aproximadamente 95% de todas as células produzidas mundialmente. Apesar do Brasil possuir esse insumo de forma abundante e barata, grande parte da sua purificação é realizada em outros países, e, por conseguinte, a produção das células fotovoltaicas é, predominantemente, estabelecida fora do país.

Há dois tipos de células de silício que se destacam atualmente: as monocristalinas e as policristalinas, sendo que as células fotovoltaicas de silício monocristalino são feitas a partir de um único cristal de silício, formando uma estrutura homogênea, tornando-as mais eficientes, além de possuírem uma cor uniforme, o que facilita o reconhecimento dessas células. Já as células fotovoltaicas de silício policristalino, são feitas por meio de múltiplos cristais de silício de tamanhos diferentes, acarretando para uma estrutura heterogênea, o que as tornam menos eficientes, e as deixam com uma cor mesclada, em tom mais claro, em comparação às monocristalinas, sendo isso mostrado na figura 9. Ademais, em termos de custo de fabricação, a tecnologia de silício policristalino apresenta ser mais vantajosa, no entanto, é necessário considerar a discrepância que se estabelece em relação à eficiência.

Figura 9 – Diferenças das tecnologias de silício em uma placa solar.



Fonte: REVOLU SOLAR, 2021.

Compreende-se a eficiência de um determinado módulo fotovoltaico como sendo o potencial de conversão da irradiação solar em eletricidade por metro

quadrado, ou seja, o quanto, em porcentagem, de energia da luz do sol – captada pelo painel, é convertida em energia elétrica por m². (PORTAL SOLAR, 2022). Dessa forma, para o cálculo da eficiência de uma placa solar, é necessário ter conhecimento sobre a sua potência e as suas dimensões (altura e largura), uma vez que se utiliza da fórmula abaixo para obter o valor desse rendimento.

$$\eta_{\%} = \frac{P_p [Wp]}{S [W/m^2] \times A [m^2]} \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

A = Área do painel solar [Altura x Largura (m²)];

P_p = Potência do painel solar (Wp);

S = Irradiância solar em condições padrão de teste [1000 (W/m²)];

$\eta_{\%}$ = Rendimento percentual.

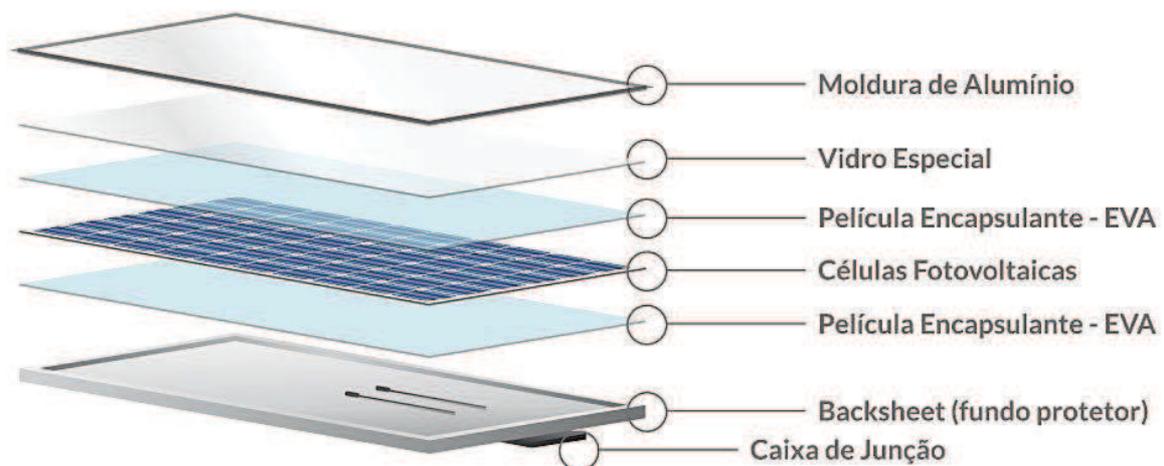
A composição das células fotovoltaicas dos painéis solares é, em sua maioria, de silício, estando sujeita à uma degradação progressiva – assim como ocorre em qualquer outro tipo de material, sendo esse desgaste resultante, sobretudo, dos fatores climáticos, tendo a exposição solar como o principal fator dentre esses. Com isso, segundo dados do PORTAL SOLAR (2022), tem-se que o sol, com o passar do tempo, ocasiona uma deterioração nos módulos fotovoltaicos, corroborando para o enfraquecimento das ligações químicas de suas células, impactando diretamente no desempenho de geração de energia elétrica das mesmas.

A vida útil de um módulo fotovoltaico é estimada, pela maioria dos fabricantes, em 25 anos, sendo esse o prazo estabelecido para a preservação de seu desempenho original em até, no mínimo, 80%, uma vez que, depois disso, poderá ocorrer uma queda nesse percentual. (PORTAL SOLAR). Os principais indicadores de deterioração dos painéis solares são: riscos e manchas em sua superfície, ressecamento, oxidação em fios e pontos metálicos, trincas e perda de eficiência. Dessa forma, alguns cuidados podem ser tomados para que os painéis solares possam alcançar o limite do período de garantia de desempenho, sendo eles: limpeza dos módulos com produtos adequados, acompanhamento dos dados da produção de energia e realização das manutenções preditivas e preventivas.

2.3.2 Outros Componentes dos Painéis Solares

As placas solares são constituídas também por moldura de alumínio, vidro temperado (tampa frontal), películas encapsulantes (responsáveis pela isolação elétrica entre as células e as partes metálicas do módulo), *backsheet* (proteção térmica traseira entre as células e a superfície em que o módulo será apoiado), e caixa de junção, conforme representado na figura 10. Esses componentes são fundamentais para a estruturação de um módulo fotovoltaico, servindo de proteção contra intempéries e assegurando uma sustentação mecânica para o mesmo. No caso da caixa de junção, uma de suas funções se estabelece em dar continuidade no circuito elétrico, interconectando os painéis solares quando estão na configuração de *strings* (módulos conectados em série), ou conectando as extremidades dessas séries ou painéis individuais ao inversor solar fotovoltaico.

Figura 10 – Componentes do Módulo Fotovoltaico.



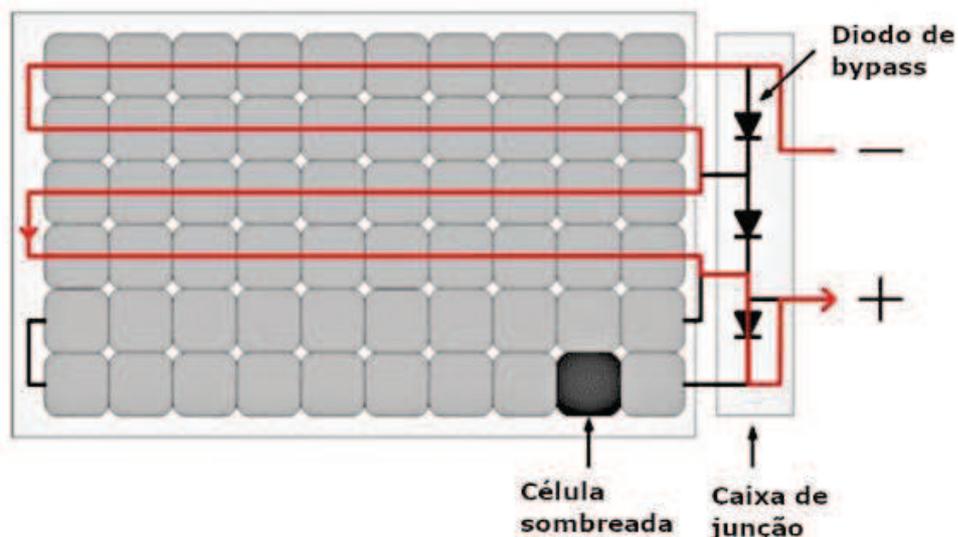
Fonte: FOTUS, 2021.

A caixa de junção também tem a finalidade de garantir a proteção dos módulos fotovoltaicos, visto que ela possui diodos de *by-pass*, sendo esses um dos componentes mais importantes que compõem os painéis solares, já que eles estabelecem a proteção direta contra a criação de *hot spots* (pontos quentes). Esses fenômenos ocorrem, principalmente, quando há um sombreamento parcial de alguma célula do painel solar, que ao receber um alto valor de corrente proveniente das demais células – por estarem conectadas em série no módulo, ocasiona o

aparecimento de uma tensão reversa sobre essa célula afetada. Com isso, a célula sombreada passa a consumir energia e, em função disso, a mesma começa a esquentar, podendo ser danificada permanentemente por conta desse fenômeno.

Os diodos de *by-pass* são posicionados em paralelo com as *substrings* (associações de células) do módulo, e são acionados quando há um distúrbio no valor da tensão gerada naquela associação, visto que as células estão em série, e algumas poucas células sombreadas, por meio da queda de tensão ocasionada por elas, já são o suficiente para impactar na tensão total. Uma vez acionado, a corrente passará pelo diodo *by-pass* ao invés de passar pela *substring* que possui células sombreadas, conforme ilustrado pela figura 11. Quando esse componente está em funcionamento, há uma diminuição parcial de geração naquele módulo em específico, por conta da desativação da *substring* em questão, ocasionando uma queda de geração no sistema ao todo, devido a operação da *MPPT* do inversor *string*. No entanto, a vantagem é que o módulo voltará a operar em sua total capacidade quando o sombreamento deixar de existir, estabelecendo, assim, a retomada do funcionamento pleno do sistema fotovoltaico.

Figura 11 – Fluxo de corrente com um diodo *by-pass* em funcionamento.



Fonte: CANAL SOLAR, 2019.

Quando se trata da utilização da energia solar fotovoltaica, percebe-se que existem diversas possibilidades, posto que suas aplicações estão presentes em quase todos os setores que fazem parte do cotidiano das pessoas, tais como: residência,

empresa e indústria, transporte, agronegócio e iluminação pública. Em relação à utilização da energia fotovoltaica em residências, empresas e indústrias, tem-se o seu uso voltado para amenizar o consumo de eletricidade advinda da concessionária local, ocasionando uma redução no custo da fatura de energia elétrica, sendo que, em algumas situações, também se utilizam dos sistemas solares para a alimentação de equipamentos específicos, os quais necessitam de uma alta demanda de energia.

Outra aplicação que está em fase de ascensão em alguns países, é o uso de sistemas fotovoltaicos acoplados em ônibus elétricos, sendo esses movidos, exclusivamente, por meio da energia fotovoltaica. Dessa forma, a utilização desses ônibus elétrico contribuirá para a substituição dos ônibus convencionais que são movidos por meio do motor de combustão, corroborando para a diminuição no uso do óleo diesel – produto derivado do petróleo, ou seja, dos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução na emissão de gases poluente e para uma viabilidade econômica, visto que a energia fotovoltaica é uma fonte sustentável, renovável e inesgotável.

Analisando o cenário do agronegócio, percebe-se que em diversas fazendas produtoras não há o acesso à rede da concessionária, podendo ser esse problema mitigado mediante à utilização de energia fotovoltaica, uma vez que a geração de eletricidade, por meio desses sistemas solares, poderá servir de alimentação para os equipamentos usados nas atividades desse ramo. Os sistemas fotovoltaicos também são aproveitados para beneficiar as comunidades remotas que possuem um acesso limitado à energia elétrica convencional, sendo essa situação análoga ao caso supracitado das inúmeras fazendas produtoras. É possível, ainda, a utilização de painéis solares para o fornecimento de energia elétrica para os pontos de iluminação pública, corroborando para a redução do cabeamento usado para conduzir a eletricidade até esses pontos, sendo representada na figura 12 essa aplicação.

Figura 12 - Utilização de painéis solares fotovoltaicos em pontos de iluminação.



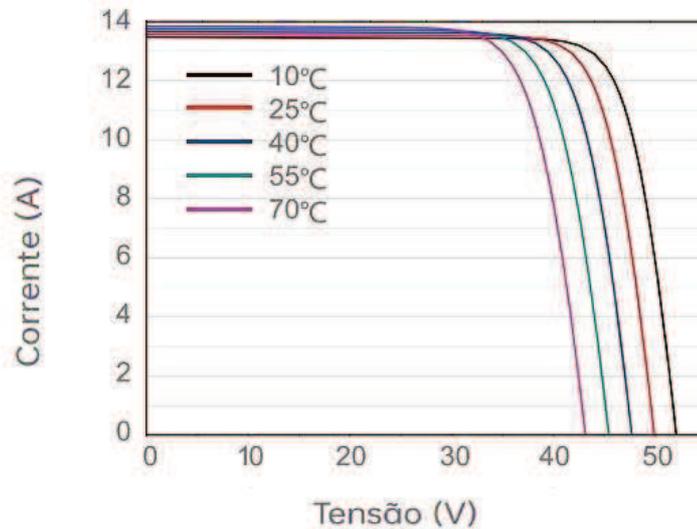
Fonte: OCA ENERGIA, 2021.

2.3.3 Curvas Características de um Módulo

As curvas características de um módulo fotovoltaico permitem a avaliação desse dispositivo, sendo a temperatura e a irradiação solar os critérios considerados para essa análise, visto que esses influenciam, respectivamente, na tensão e na corrente elétrica que serão geradas por esse equipamento.

Ao observar as curvas da corrente e tensão em diferentes temperaturas das células fotovoltaicas dos painéis solares, percebe-se que, normalmente, conforme a temperatura aumenta, a tensão tende a diminuir, tornando a temperatura nas células um fator relevante para a definição dos valores equivalentes de tensão do módulo fotovoltaico, visto que a tensão é inversamente proporcional a temperatura. A queda de tensão que ocorre em cada uma das células é ocasionada pela agitação de seus elétrons, devido à elevação da temperatura, dificultando a movimentação dos mesmos. Por outro lado, ao analisar o comportamento da corrente em relação ao aumento da temperatura nas células, nota-se que seus valores sofrem pequenas alterações, não sendo a temperatura um fator impactante para a determinação do valor resultante da corrente elétrica gerada em um painel solar, estando representadas essas curvas na figura 13 abaixo.

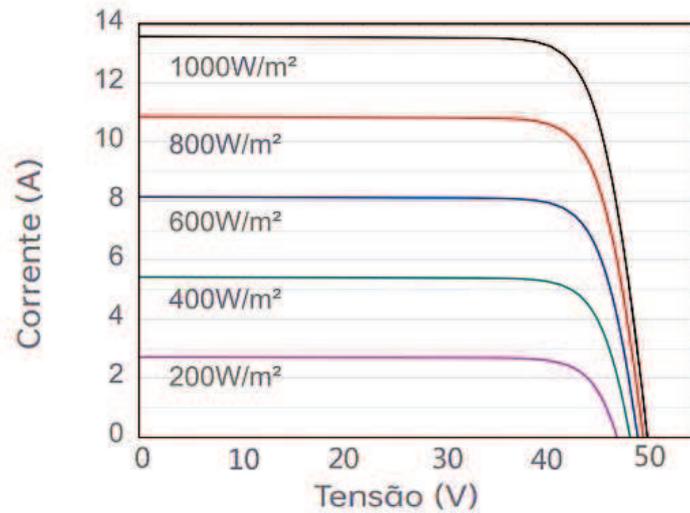
Figura 13 – Curvas da Corrente e Tensão em Diferentes Temperaturas.



Fonte: *Datasheet* da QN - SOLAR.

Analisando o comportamento das curvas da corrente e tensão em diferentes índices de irradiação solar nas células fotovoltaicas dos painéis solares, tem-se que, habitualmente, a corrente elétrica será a mais atingida pela diminuição da radiação solar incidente nesse painel, uma vez que a corrente é diretamente proporcional ao índice de irradiação solar. Isso se estabelece devido ao fato de que quanto mais energizados estão os elétrons das células, por meio da energia da luz do sol, maior é o fluxo de elétrons, ou seja, maior é a geração de corrente elétrica contínua. Em contrapartida, ao observar o comportamento da tensão em relação ao declínio da irradiação solar nas células, percebe-se que a mesma apresenta pequenas alterações em seus valores, não sendo o índice de irradiação solar um aspecto marcante para a determinação do valor resultante da tensão gerada em um painel solar, podendo ser notado isso por meio da exemplificação das curvas na figura 14 a seguir.

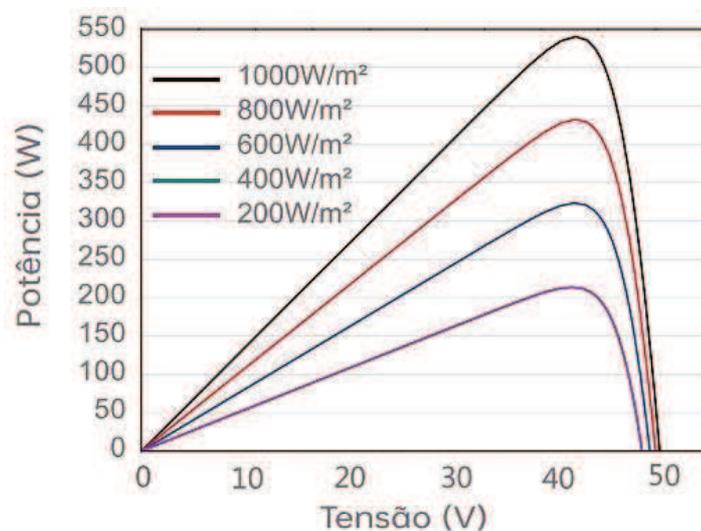
Figura 14 – Curvas da Corrente e Tensão em Diferentes Índices de Irradiação Solar.



Fonte: *Datasheet* da QN - SOLAR.

Com as alterações nos valores do índice de irradiação solar é possível analisar as curvas da potência e tensão de um módulo fotovoltaico, visto que a variação na quantidade de irradiação solar, por m^2 , influencia no valor resultante da corrente elétrica gerada em um painel solar, que, por sua vez, impacta no valor da potência, já que a mesma é determinada pela multiplicação entre a corrente e a tensão. Com isso, tem-se que com a diminuição da radiação solar incidente no painel, a potência também terá o seu valor reduzido, estabelecendo, assim, a proporcionalidade direta entre o índice de irradiação solar e a potência elétrica gerada em um módulo fotovoltaico, conforme mostrado na figura 15 abaixo.

Figura 15 – Curvas da Potência e Tensão em Diferentes Índices de Irradiação Solar.



Fonte: *Datasheet* da QN - SOLAR.

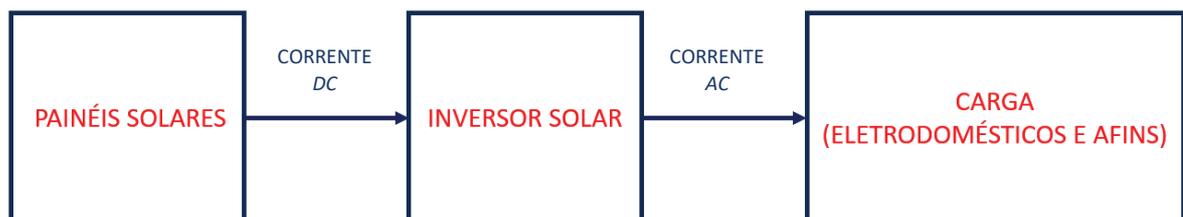
2.4 INVERSOR SOLAR FOTOVOLTAICO

Mediante ao efeito fotovoltaico que ocorre nas células de um painel solar, é possível a geração de tensão e corrente elétrica contínua, sendo necessário efetuar a conversão dessa corrente para corrente alternada. Essa conversão é necessária devido ao fato de que a corrente *AC* é considerada como sendo a eletricidade convencional, posto que a mesma apresenta melhores condições de transmissão em longas distâncias, contribuindo com perdas menores nesses processos, e, por isso, é a mais utilizada pelos equipamentos elétricos disponibilizados nas residências, comércios e indústrias. Para que seja feita essa conversão de corrente contínua em alternada, utiliza-se de inversores solares, que são responsáveis por essa conversão e, também, pela técnica de otimização de potência realizada em suas diferentes entradas de *MPPT*.

2.4.1 Definição de Inversor Solar

Os chamados inversores solares são dispositivos eletrônicos capazes de converter a corrente *DC*, gerada pelos módulos fotovoltaicos, em corrente *AC*, e, também, de otimizar a potência do sistema solar por meio da tecnologia do *MPPT*. As células fotovoltaicas, presentes nos painéis solares, absorvem a luz do sol, e, a partir disso, os seus elétrons começam a se movimentar em um fluxo ordenado, o que remete à geração de corrente *DC*. Essa corrente contínua é convertida em corrente alternada pelo inversor solar, sendo que, posteriormente, essa corrente *AC* convertida será usada para suprir a demanda proveniente de uma carga qualquer que esteja conectada ao sistema, conforme representado na figura 16.

Figura 16 – Ilustração das etapas de um sistema solar fotovoltaico.

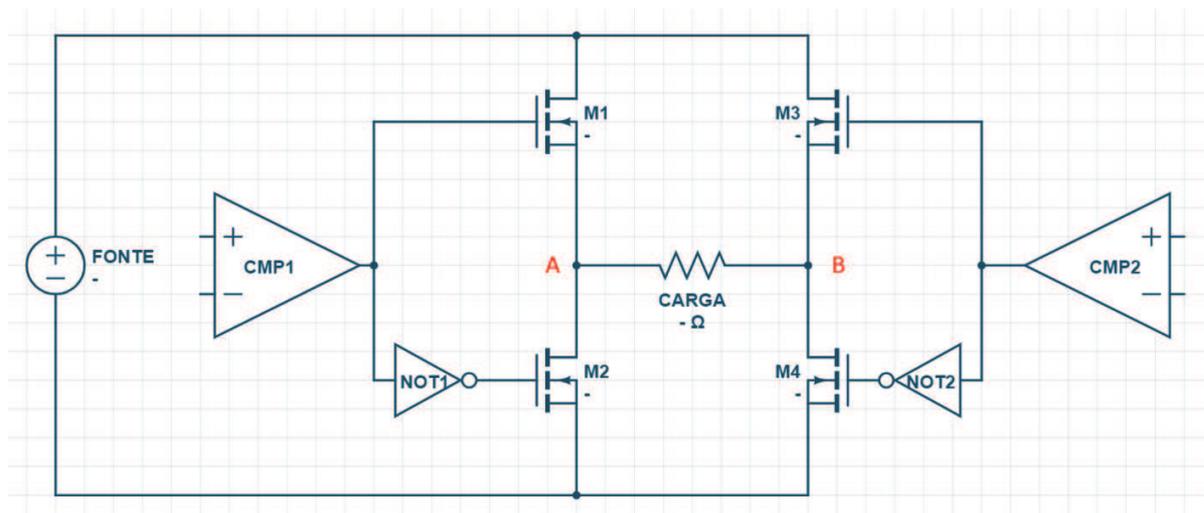


Fonte: Próprio autor.

2.4.2 Princípio de Funcionamento de um Inversor Solar

A principal função dos inversores em um sistema de geração de energia solar fotovoltaica é converter a corrente *DC* em corrente *AC*, sendo importante ressaltar que a forma de onda em sua saída é do tipo senoidal. Esse processo de conversão é dividido em duas etapas: geração dos pulsos e filtragem do sinal, sendo utilizado o valor médio de pulsos de diferentes larguras – conceito de *PWM (Pulse Width Modulation)*, para a criação da senoide a partir de uma onda contínua. Para exemplificar a forma como os inversores geram os pulsos, será utilizada a representação do circuito base da figura 17.

Figura 17 – Circuito base para a geração dos pulsos em um inversor solar.



Fonte: Próprio autor.

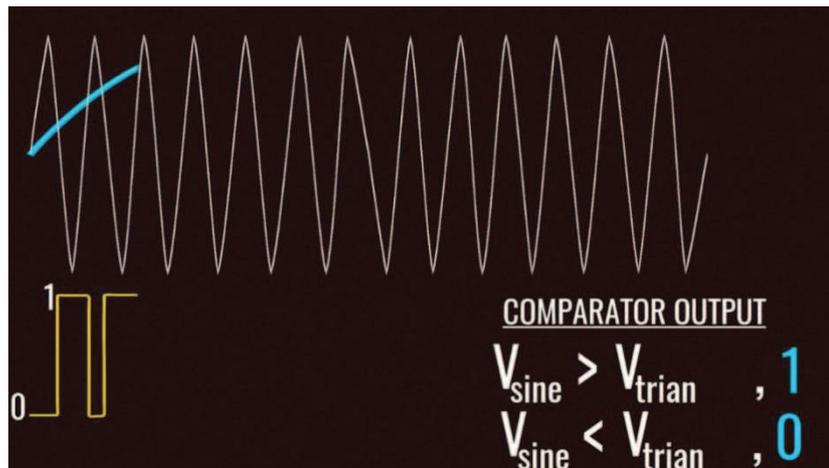
A princípio, dois comparadores (“CMP1” e “CMP2”) são utilizados para controlar os quatro transistores presentes no circuito (“M1”, “M2”, “M3” e “M4”), sendo esses transistores utilizados como chaves, visto que a obtenção da frequência necessária de chaveamento, para atingir os valores desejados, seria impossível de ser adquirida manualmente ou com chaves mecânicas convencionais.

Os comparadores possuem a função de comparar uma onda senoidal com ondas triangulares, sendo que um deles utiliza uma senoide regular como base, e o outro utiliza uma senoide invertida. Quando a tensão da senoide for maior que a tensão da onda triangular, a saída do comparador em questão terá nível lógico alto

(1), e quando a tensão da onda triangular for maior, o nível lógico da saída será baixo (0), conforme mostrado na figura 18.

As duas portas lógicas *NOT* (“NOT1” e “NOT2”) presentes no circuito, possuem a função de impedir que dois transistores do mesmo lado (“A” ou “B”) estejam em saturação no mesmo instante, o que acarretaria em um curto-circuito da fonte *DC*.

Figura 18 – Lógica de comparação dos comparadores “CMP1” e “CMP2”.

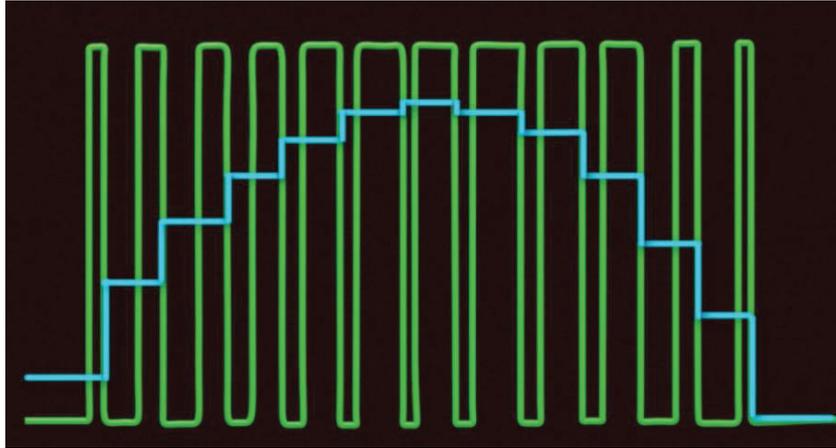


Fonte: LESICS ENGINEERS PVT LTD.

Pelo conceito de *PWM*, tem-se que quanto maior for o valor da amplitude da senoide necessária naquele instante, maior será a largura do pulso correspondente. A forma de onda senoidal é obtida por meio do sinal médio desses pulsos, sendo necessário ressaltar que quanto mais preciso for o sistema utilizado de controladores *PWM*, mais parecida com uma senoide pura esse sinal médio será, podendo ser observada na figura 19 a relação visual entre o sinal *PWM* e esse sinal médio.

Na prática, filtros passivos são usados para criar o sinal médio em forma senoidal a partir do *PWM*, sendo esses filtros classificados como elementos armazenadores de energia, os quais são utilizados para limitar a onda gerada no formato desejado, já que os capacitores possuem a função de atenuar a tensão, e os indutores a corrente.

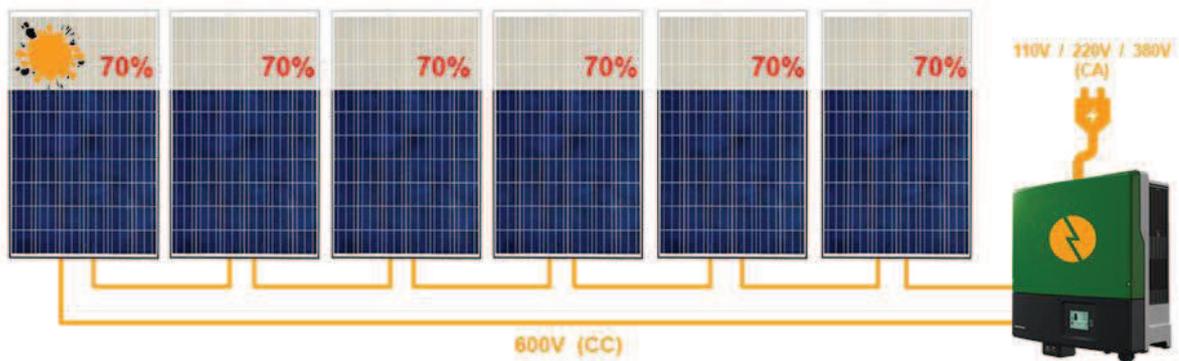
Figura 19 – Relação visual entre o sinal *PWM* e o sinal médio.



Fonte: LESICS ENGINEERS PVT LTD.

Uma outra função do inversor solar fotovoltaico é a otimização de potência, que é realizada por meio da tecnologia do *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*), cuja finalidade é estabelecer o rastreamento do ponto de máxima potência em cada entrada de *MPPT* do inversor, buscando garantir as melhores condições de funcionamento das placas solares pertencentes a essa entrada. Para a obtenção do ponto de máxima potência, é estabelecido que todos os painéis solares, da mesma *string* ou de *strings* pertencentes a mesma entrada de *MPPT* do inversor, possuam a mesma potência gerada, fazendo com que o módulo de menor rendimento desse conjunto defina o valor desse ponto. Dessa forma, ocasiões como o sombreamento parcial de um módulo fotovoltaico e a incompatibilidade dentro da própria *string* ou entre as *strings* de uma mesma entrada de *MPPT* – em relação ao modelo e a quantidade de módulos, estimulam o acionamento dessa função nos inversores solares, acarretando para perdas de geração de energia elétrica no sistema ao todo, sendo denominadas essas perdas como perdas por *mismatch*, estando demonstrado isso na figura 20.

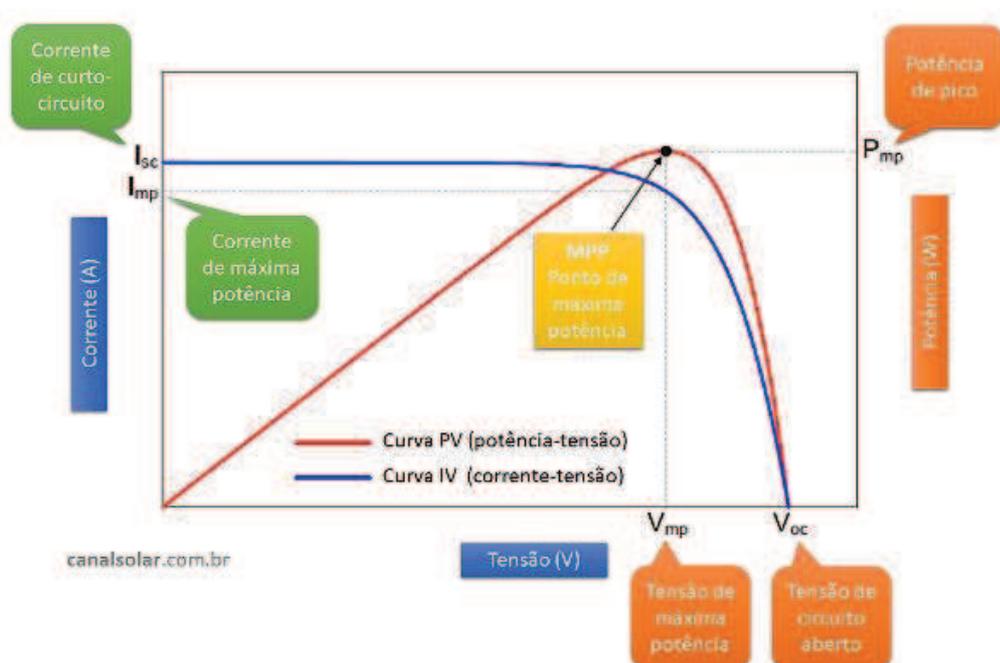
Figura 20 – Representação de uma *string* após o acionamento do *MPPT* do inversor.



Fonte: PORTAL SOLAR.

Há um ponto denominado como *MPP* (*Maximum Power Point*), que representa o ponto de máxima potência de um determinado módulo fotovoltaico, sendo que por meio da multiplicação entre o valor da sua tensão de máxima potência (V_{mpp}) e da sua corrente de máxima potência (I_{mpp}), obtém-se o valor desse ponto de máxima potência (P_{mpp}). Dessa forma, conclui-se que existe um valor específico de tensão e de corrente, em um determinado instante de tempo, que resulta no valor máximo de potência de um painel solar, sendo representado o conceito de *MPP* na figura 21 a seguir.

Figura 21 – Definição gráfica do *MPP* de um módulo fotovoltaico.



Fonte: CANAL SOLAR, 2019.

Com base no que foi supracitado na análise das curvas características de um módulo, tem-se que em um painel solar o valor da corrente gerada é diretamente relacionado com a incidência de luz solar sobre as suas células fotovoltaicas, e o valor da tensão gerada é determinado com base na temperatura das mesmas. Dessa forma, conforme ocorrem alterações nos valores de tensão e corrente de um painel solar, varia-se o valor do *MPP* do mesmo, o que acontece diversas vezes durante o dia, e são nesses momentos em que a tecnologia do *MPPT* entra em operação, analisando o ponto de máxima potência em comum entre os módulos de uma *string* e entre essas. O inversor que possui a função do *MPPT* é constituído de um circuito eletrônico com um algoritmo pré-programado para estimar o *MPP*, que, então, atua no controle do sistema, alterando o valor da corrente nos módulos que estão conectados na mesma *string*, visando igualar o valor de potência gerada entre os painéis solares, sendo utilizado, como referente, o valor fornecido pelo módulo com menor rendimento.

2.4.3 Tipos de Inversores Solares

Os sistemas solares fotovoltaicos podem ser classificados em *on-grid*, *off-grid* e híbridos, sendo que para cada tipo de instalação há um inversor específico, que é denominado conforme a classificação do sistema em que será utilizado, podendo ser nomeado como: inversor *on-grid* (ou *grid-tie*), inversor *off-grid* e inversor híbrido.

2.4.3.1 Inversor Solar *On-grid* (ou *Grid-tie*)

O inversor solar *on-grid*, também conhecido como *grid-tie*, é caracterizado por ser projetado para sincronizar tanto a sua frequência quanto a sua tensão de saída com os parâmetros presentes na rede da concessionária. Esse tipo de inversor está relacionado aos sistemas fotovoltaicos *on-grid*, os quais determinam que a energia elétrica gerada será injetada na rede da concessionária. Por meio da sua utilização, é possível detectar qualquer distúrbio de tensão ou variação de frequência que houver na rede elétrica, além de perceber quando há ocorrência de falta de energia, ocorrendo um desligamento automático nesse último caso, evitando, assim, riscos nos serviços de manutenção.

2.4.3.1.1 Inversor *String*

O inversor *string* é considerado um inversor solar *on-grid*, sendo o mais antigo e o mais utilizado nas instalações residências e comerciais de pequeno porte. Sua caracterização se estabelece por ele ser designado para os sistemas fotovoltaicos que fazem uso de painéis solares conectados em série, ou seja, em *strings*, sendo esse o motivo de sua denominação. O resultado dessa conexão, dos módulos em série, é encaminhado para uma entrada de *MPPT* do inversor, sendo que para cada entrada de *MPPT* há uma orientação, inclinação e quantidade de painéis solares que devem ser uniformizadas entre as *strings* que compõe essa entrada, ou seja, essas *strings* têm que ser iguais. Em um inversor *string* há, geralmente, duas ou quatro entradas de *MPPT*, tendo mais de uma *string* em cada entrada.

O processo de junção dos módulos em *strings* e a relação entre as *strings* diante dos critérios do *MPPT*, faz com que os painéis solares estejam correlacionados entre si, o que ocasiona a dependência entre eles, sendo impossível a otimização de potência e o monitoramento individualizados desses, posto que esses dados são analisados por entrada de *MPPT*. Dessa forma, podem ocorrer perdas de potência no sistema ao todo, visto que cada entrada de *MPPT* do inversor seguirá os parâmetros de geração de energia do painel solar de menor rendimento do seu conjunto, visando assegurar o funcionamento adequado do módulo em questão.

2.4.3.1.2 Microinversor Solar

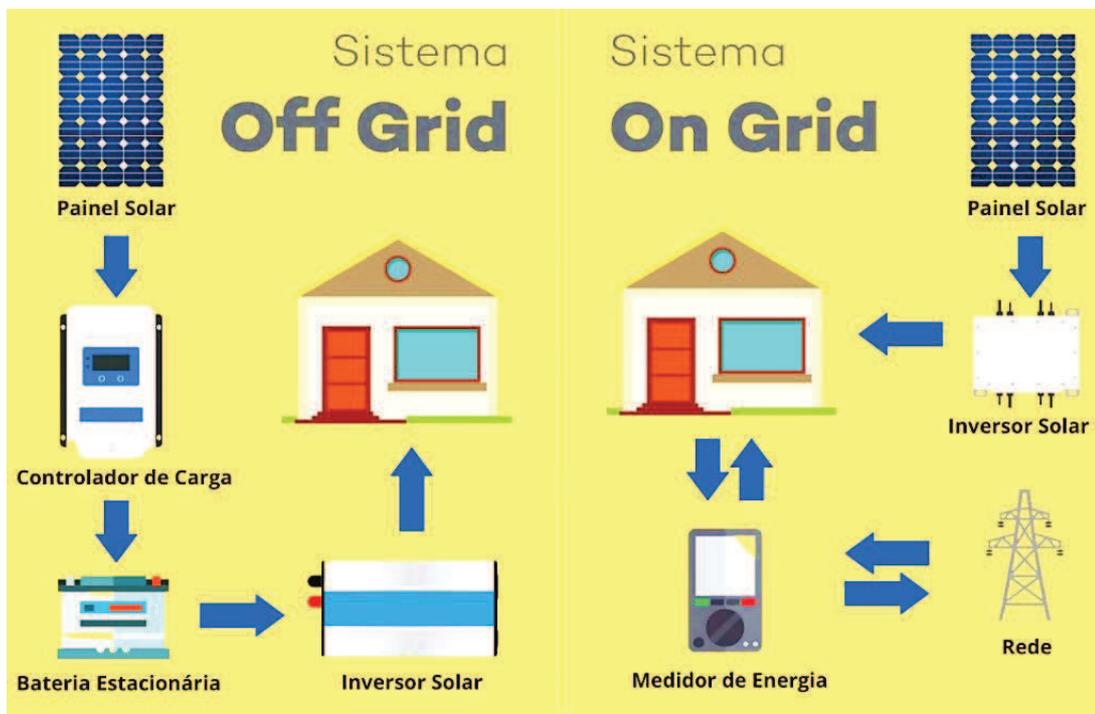
Com as mesmas funções de um inversor solar *on-grid*, o microinversor é tido como uma evolução tecnológica do inversor *string*, sendo ele projetado para operar com um único módulo fotovoltaico por *MPPT*. Com o tamanho e a potência inferiores comparados ao modelo de um inversor *string*, esse tipo de inversor fotovoltaico tem sido considerado mais eficiente em termos de rendimento do sistema, posto que há um melhor aproveitamento do potencial energético de cada módulo individual, evitando, assim, as perdas por sombreamento parcial ou *mismatch* que ocorrem entre os módulos fotovoltaicos conectados em série. Dependendo da potência do microinversor, o mesmo tem a capacidade de suportar até quatro *MPPTs*, ou seja, é capaz de atender um total de até quatro painéis solares, sendo que cada um desses será conectado em uma entrada diferente de *MPPT*. Devido a esse modo de ligação, esse equipamento oferece maior autonomia para os módulos, tratando-os de forma individualizada, o que possibilita que esses sejam instalados em orientações e

inclinações diferentes, sem que haja uma redução na geração de energia do conjunto instalado nesse microinversor.

2.4.3.2 Inversor Solar *Off-grid*

O inversor *off-grid*, diferentemente do inversor *on-grid*, não é conectado à rede da concessionária, sendo que, quando a geração é interrompida por conta da falta de irradiação solar nos painéis solares, a corrente convertida por ele é retirada de um banco de baterias estacionárias, que armazena a energia elétrica excedente gerada pelos módulos fotovoltaicos, sendo esse banco acionado para suprir a demanda de carga. O inversor *off-grid* é utilizado em sistemas isolados, denominados como sistemas fotovoltaicos *off-grid*, o que os tornam inviáveis para serem utilizados em sistemas *on-grid*, visto que esse tipo de inversor não possui a capacidade de interação com o sinal de corrente AC fornecido pela rede elétrica, podendo ocasionar uma explosão caso seja usado para esse fim. O fluxograma expresso na figura 22 ilustra a diferença na composição dos equipamentos utilizados em sistemas *on-grid* e *off-grid*.

Figura 22 – Diferença entre um sistema *on-grid* e um sistema *off-grid*.

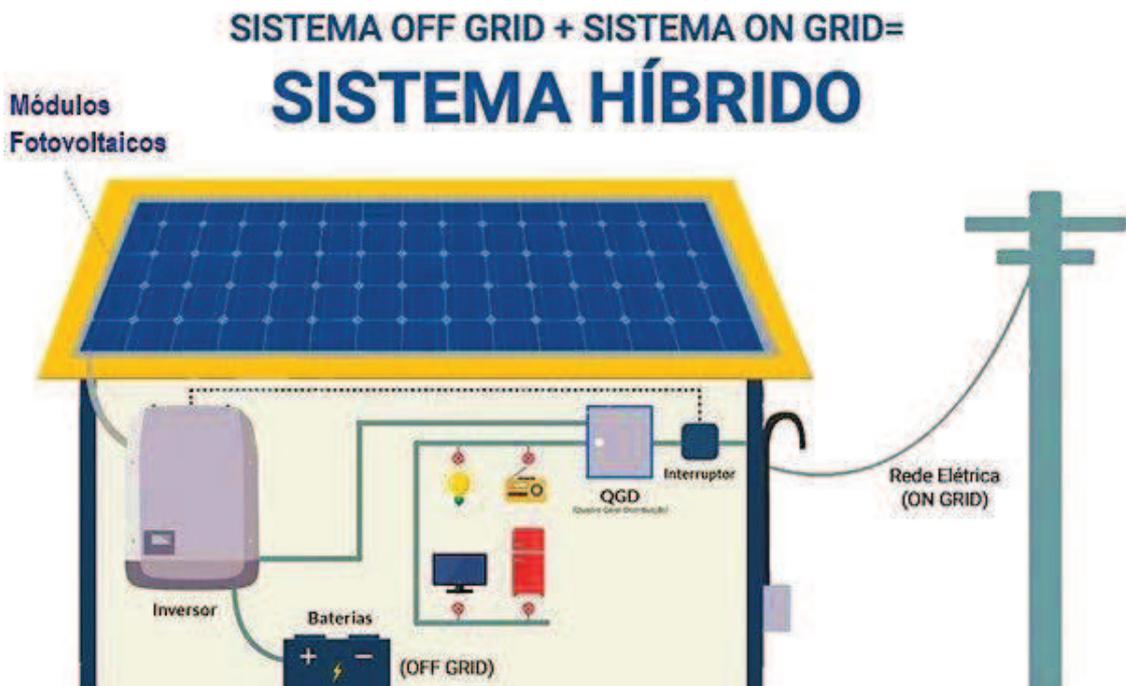


Fonte: EVS ENERGY, 2022.

2.4.3.3 Inversor Solar Híbrido

Este tipo de inversor é capaz de operar tanto em sistemas *on-grid* (conectado à rede da concessionária) quanto em sistemas *off-grid* (sem conexão à rede e conectado ao banco de baterias), por isso ele é conhecido como híbrido. A principal vantagem em se utilizar um sistema solar híbrido é o fato de que ele pode operar em ambas as condições, sendo possível configurá-lo para que ocorra o acionamento, no primeiro momento, das baterias estacionárias, após a constatação da falta de irradiação solar, e somente quando a carga do banco de baterias não for mais suficiente, é que irá se fazer uso da energia elétrica advinda da rede da concessionária. Com isso, faz com que a quantidade de eletricidade consumida da concessionária local seja consideravelmente baixa, sendo isso de forma análoga à questão da injeção de energia gerada pelo sistema na rede da concessionária, uma vez que há uma preferência em carregar o banco de baterias por primeiro, e, logo após, é que se direciona a energia gerada à rede da concessionária. A figura 23 ilustra a composição de equipamentos utilizados nesses sistemas híbridos.

Figura 23 – Ilustração dos componentes de um sistema solar híbrido.



Fonte: OCA ENERGIA, 2021.

2.5 CONVERSORES *DC-DC*

É chamado de Conversor *DC-DC* o tipo de circuito eletrônico conhecido por ser capaz de converter o valor de tensão de sua entrada em outro valor de tensão, porém com uma amplitude diferente, a qual pode ser maior ou menor que a fornecida pela fonte. Estes circuitos são amplamente utilizados no dia a dia de muitas pessoas, em situações em que a carga demanda um valor de tensão diferente das opções de alimentação *DC* disponíveis no momento, sejam elas: pilhas, baterias, retificadores ou similares.

Existem dois tipos de elementos presentes nos circuitos dos conversores *DC-DC* que fazem com que essa variação de tensão seja possível: os elementos armazenadores e os elementos comutadores.

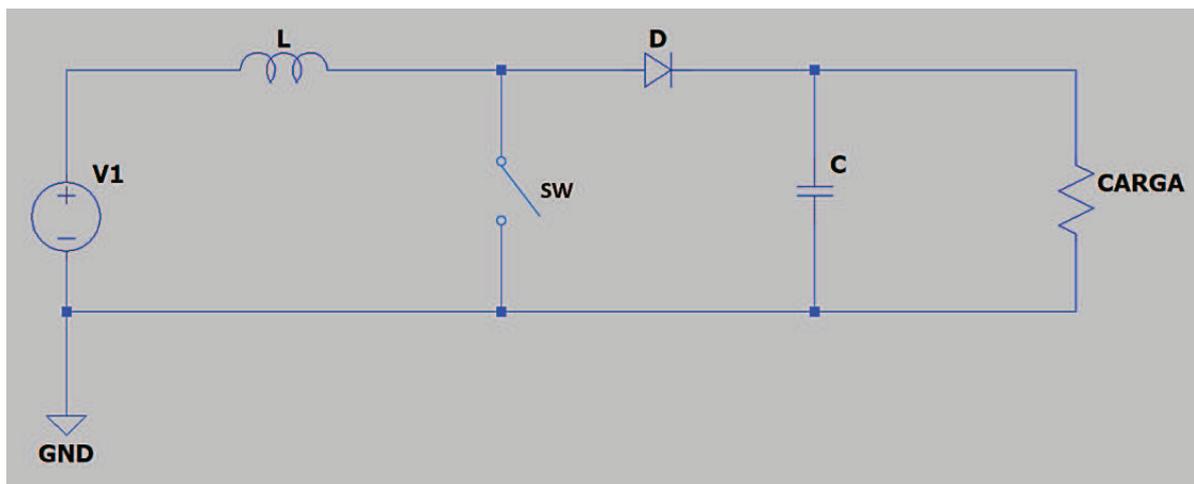
- Armazenadores – responsáveis pelo armazenamento de campo magnético (indutores) e de campo elétrico (capacitores), sendo estes que tornam possível a entrega de um valor de tensão diferente do fornecido inicialmente pela fonte à carga.
- Comutadores – responsáveis pelo chaveamento do circuito, onde os transistores e diodos são comumente utilizados.

É importante ressaltar que, como o próprio nome sugere, os conversores *DC-DC* não são capazes de criar energia, ou seja, obedecem à lei da conservação de energia, a qual afirma que a energia não é criada e nem destruída, ela só pode ser transformada de um tipo para outro. Estendendo esse princípio aos circuitos eletrônicos relacionados aos conversores em questão, é possível concluir que em um sistema ideal (de rendimento igual à 100%, logo, sem perdas por efeito Joule ou similares), a potência elétrica medida na entrada será a mesma potência elétrica medida na saída. Tendo em vista o fato de que a potência elétrica pode ser definida como sendo o produto da diferença de potencial pela corrente elétrica, se o valor de tensão na saída tiver sido modificado pelo conversor para que seja maior que o da entrada, o valor de corrente medido na saída será proporcionalmente menor.

2.5.1 Conversor *Step-up* (*Boost*)

O chamado Conversor *Step-up*, também conhecido como Conversor Aumentador ou Conversor *Boost*, é um tipo de conversor *DC-DC* capaz de aumentar o valor de tensão de sua saída em relação à sua entrada, porém, a diminuição proporcional do valor da corrente ocorre no processo, para que a potência elétrica seja mantida. É importante salientar que em um circuito real, a potência elétrica na saída jamais será igual à potência elétrica na entrada, em função das perdas presentes em seus componentes. O princípio de funcionamento do conversor *Step-up* será abordado com base na topologia apresentada na figura 24.

Figura 24 – Topologia Básica de um Conversor *Step-up*.



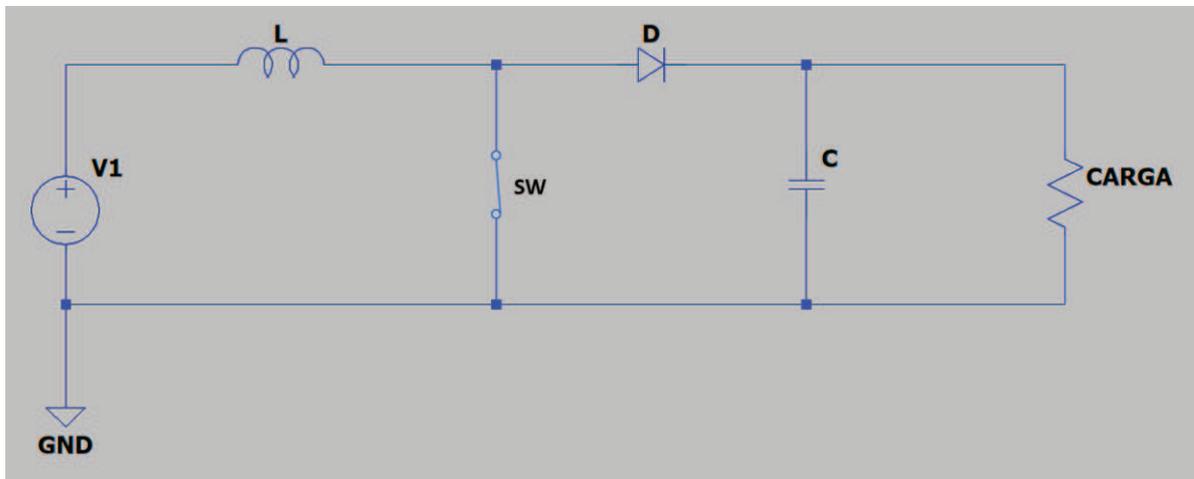
Fonte: Próprio autor.

O comportamento do circuito dá-se da seguinte forma: considerando a condição inicial da chave “SW”, que pode ser, por exemplo, um *MOSFET* conectado à um circuito de controle do tipo *PWM*, como sendo aberta (a fim de facilitar a análise), a corrente flui da fonte *DC* “V1” (que pode ser uma bateria ou uma pilha, por exemplo), passa pelo diodo “D”, carrega o capacitor “C” e então chega à carga. A intensidade da corrente circulando pelos componentes mencionados é baixa neste momento (em comparação à condição que será exposta mais adiante), em função da impedância elétrica, que nada mais é que a oposição à passagem de uma determinada corrente elétrica em um dado circuito, podendo ser expressa pela equação abaixo:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2)$$

Nota-se que em um segundo momento, com a chave “SW” fechada (condição apresentada na figura 25), a corrente flui pelo indutor “L”, e então, ao invés de seguir pelo diodo, passa pela chave em função do curto-circuito agora presente. É importante ressaltar que nesta condição, o valor da corrente é consideravelmente maior, pois os valores R e X_C não contribuem mais para a impedância total.

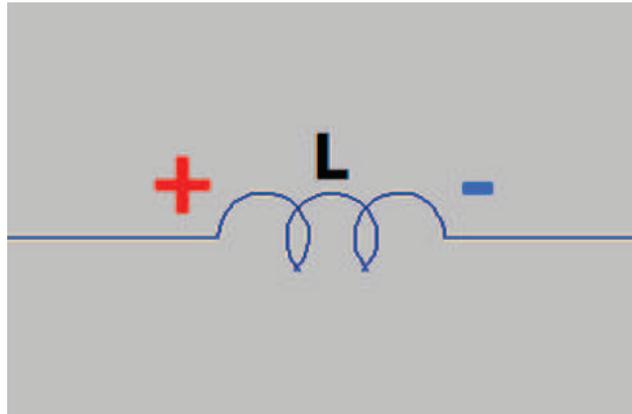
Figura 25 – Circuito de um Conversor *Step-up* com a chave SW fechada.



Fonte: Próprio autor.

Ao passo que o valor da corrente aumenta, o campo magnético do indutor “L” se expande, e neste processo, ele começa a armazenar energia. Uma vez que durante os instantes em que o indutor está armazenando energia ele ainda pode ser considerado como um consumidor, é possível afirmar que a sua polaridade se dá da seguinte forma: polo positivo à esquerda e polo negativo à direita, conforme ilustrado pela figura 26.

Figura 26 – Polarização do indutor enquanto atuando como consumidor de energia.



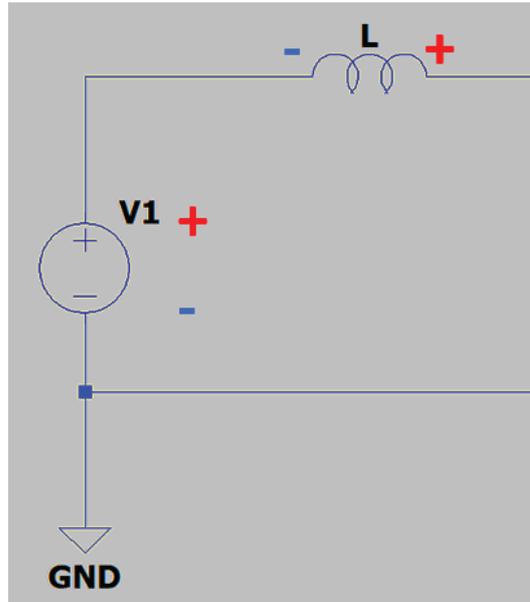
Fonte: Próprio autor.

Quando a chave “SW” é aberta novamente, visto que o curto-circuito não se faz mais presente, o valor da corrente abaixa, voltando ao valor original, que foi referenciado anteriormente como sendo relativamente baixo. Neste momento, o campo magnético do indutor colapsa e a energia armazenada será descarregada, ou seja, “L” será fornecedor, e não mais consumidor de energia, logo, a sua polarização se inverte, estando agora o polo positivo à direita e o polo negativo à esquerda, conforme mostrado na figura 27. Nesta configuração, o indutor encontra-se em série com a fonte “V₁”, e por conta disso, a tensão induzida por ele (em função da diminuição da corrente causada pela abertura da chave “SW”) será somada à da fonte, o que implica que a tensão medida na carga será maior que o valor observado quando somente a fonte atuava como fornecedor de energia. É importante salientar que a tensão no indutor (V_L) está diretamente relacionada com a taxa de variação da corrente e pode ser definida pela seguinte expressão:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

Nota-se que, pela equação acima, quanto maior for a taxa de variação da corrente, maior será a tensão induzida em “L”, sendo assim, é possível inferir que quanto maior for a frequência de abertura e fechamento da chave, maior será a tensão em questão.

Figura 27 - Polarização do indutor enquanto atuando como consumidor de energia e associação em série com a fonte.



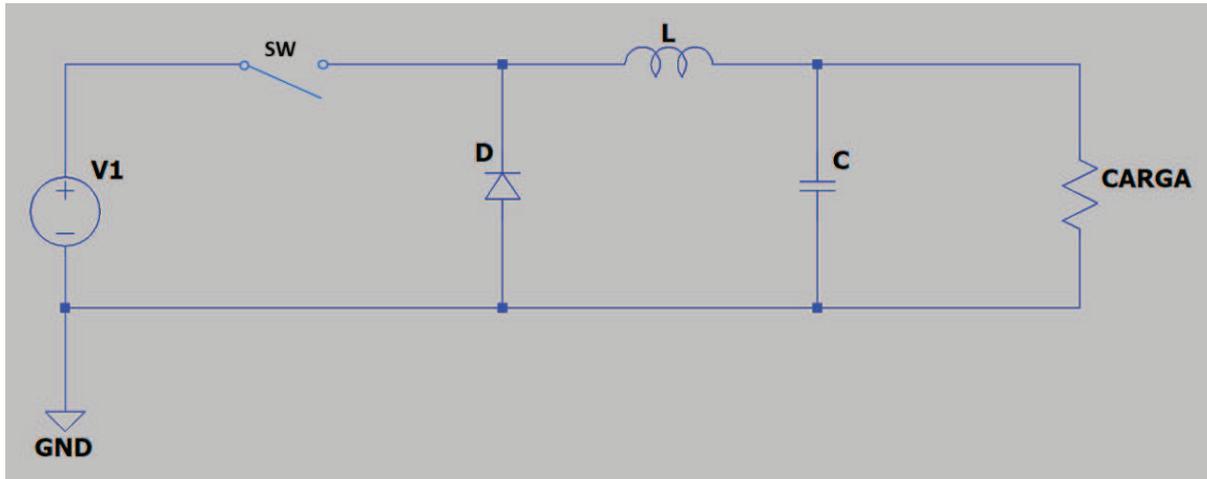
Fonte: Próprio autor.

Visto que o valor da tensão agora está maior, é possível carregar o capacitor com um valor maior que o original da fonte. Ao passo em que a chave vai passando por ciclos de abertura e fechamento durante o funcionamento do circuito, a tensão no capacitor continuará a subir em função do fornecimento de energia por parte do indutor, até que seja atingido um chamado “estado de equilíbrio”, que ocorre quando a frequência com que o indutor injeta tensão no capacitor se iguala com a frequência com que o capacitor descarrega na carga. Por fim, a função do diodo “D” é impedir que a tensão de descarga do capacitor chegue à fonte “ V_1 ”.

2.5.2 Conversor *Step-down* (*Buck*)

O circuito conhecido como *Step-down* (ou *Buck*), diferentemente do conversor *Step-up*, reduz a tensão de saída em relação à tensão da entrada (fonte). Existem diversos outros tipos de circuitos capazes de realizar esse processo, como por exemplos os divisores de tensão que utilizam dois resistores, ou até mesmo reguladores, que empregam o uso de diodos Zener. Porém, é interessante ressaltar que esses dois exemplos reduzem a tensão por meio da dissipação de energia em forma de calor, ao passo que o *Step-down* o faz por meio do aumento do valor de corrente, conservando a potência total (no caso de um circuito ideal). O seu princípio de funcionamento será abordado com base na topologia apresentada pela figura 28.

Figura 28 – Topologia Básica de um Conversor *Step-down*.



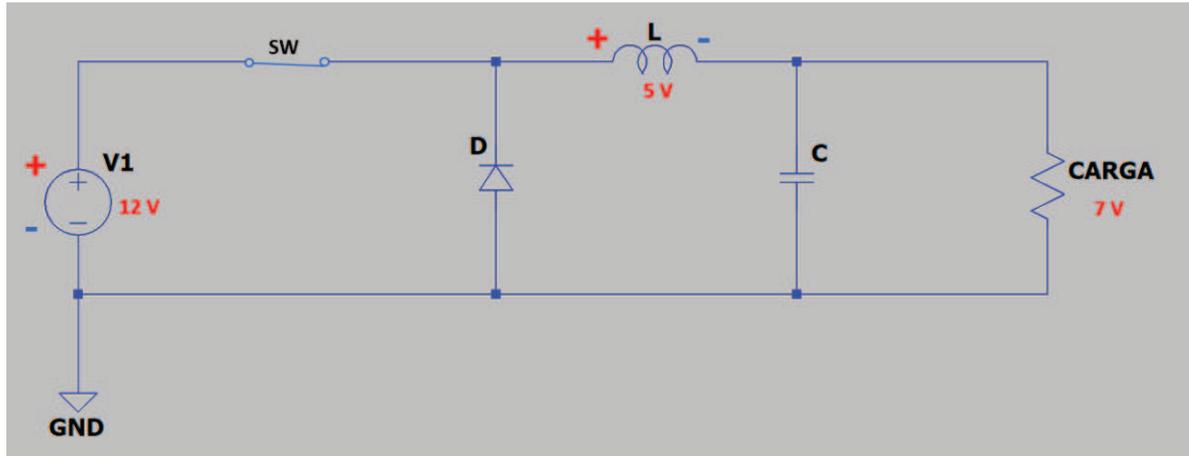
Fonte: Próprio autor.

O comportamento do circuito dá-se da seguinte forma: no instante zero, nada ocorre, visto que a chave “SW” está aberta. Ao fechar SW pela primeira vez, a corrente flui da fonte para o circuito. Ao passar pelo indutor “L”, ele começa a armazenar energia por meio do aumento de seu campo magnético, podendo ser considerado, neste momento, como consumidor de carga e de polaridade positiva à esquerda e negativa à direita. Enquanto consumidor, o indutor faz com que a queda de tensão no resistor da carga seja menor que o valor fornecido pela fonte. Por exemplo: num determinado momento, considera-se a tensão da fonte (V_{V1}) como sendo 12 V e a queda de tensão no indutor (V_L) como sendo 5 V, pode-se dizer que a tensão medida na carga (V_{CARGA}) é de 7 V, logo, com SW fechada:

$$V_{CARGA} = V_{V1} - V_L \quad (4)$$

A representação do circuito nesse instante de tempo está ilustrada na figura 29.

Figura 29 – Ilustração do funcionamento do circuito *Step-down* com SW fechada.



Fonte: Próprio autor.

Ao abrir SW novamente, a intensidade da corrente que flui pelo indutor começa a abaixar e, visto que o campo magnético do indutor é proporcional à quantidade de corrente que passa por ele, ele começa a colapsar, invertendo a polaridade de L, que se torna, a partir desse instante, fornecedor de energia – similarmente ao que ocorre no circuito *Step-up* quando a chave é aberta. Se a tensão do indutor for maior que a tensão no capacitor “C”, o indutor começará a carregá-lo neste momento, se forem iguais, ambos irão descarregar no resistor “CARGA”. Portanto, conclui-se que, quando SW está fechada, a carga recebe corrente vinda da fonte, e quando SW está aberta, a carga recebe corrente vinda de “L”. A soma do valor médio da corrente da fonte (I_{V1}) com SW fechada e do valor médio da corrente no indutor (I_L) com SW aberta é maior que o valor fornecido normalmente pela fonte, portanto, é assim que o circuito *Step-down* reduz o valor de tensão, aumentando o valor da corrente na saída. A função do capacitor é manter um valor relativamente estável de tensão na saída, e a do diodo é impedir que seja gerado um curto-circuito após o fechamento da chave.

3 METODOLOGIA

Nesta parte do trabalho serão retratados os procedimentos considerados para o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico *on-grid*, sendo abordado a análise da fatura de energia, a obtenção dos dados de irradiação solar com base nas coordenadas geográficas, as perdas consideradas para o cálculo do rendimento de um projeto solar, e as características essenciais para a determinação dos equipamentos utilizados em um sistema desse tipo. Além disso, serão apresentados os desenvolvimentos dos testes laboratoriais, fazendo-se uso de componentes eletrônicos (circuito *booster*, fontes e cargas resistivas), a fim de analisar a funcionalidade e a aplicabilidade do circuito *booster* acoplado a uma usina solar fotovoltaica.

3.1 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO *ON-GRID*

Para obter-se um projeto de energia solar fotovoltaica, inicialmente, é necessário adquirir informações sobre a unidade consumidora em que será conectada a usina solar após ser instalada, sendo esses dados transparecidos na fatura de energia disponibilizada pela concessionária local ao proprietário da instalação. Posteriormente, é preciso definir a energia de geração que o cliente pretende adquirir, podendo ser baseada na média do seu consumo mensal, ou ser considerada a média com um acréscimo de demanda reprimida, a qual será utilizada, em um futuro próximo, mediante ao aumento no consumo de eletricidade por parte da UC.

Ao definir a geração de energia elétrica desejada, espera-se estabelecer o tipo e a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para atender à exigência do sistema analisado, sendo que, subsequentemente, será avaliado qual inversor solar melhor se aplica para a potência, em kWp, da soma desses painéis solares e para a tensão equivalente de seus arranjos. Para calcular o valor da potência em kWp que será necessário para alcançar o objetivo proposto de geração, e visando a aquisição de um projeto que seja o mais próximo da realidade, é preciso considerar o tempo de exposição de irradiação solar do local em que será efetuada a instalação, e também o rendimento global do sistema, que é definido com base em algumas perdas esperadas.

3.1.1 Análise da Fatura de Energia

Observando uma fatura de energia, encontram-se informações sobre a unidade consumidora, tais como o grupo/subgrupo, classe/subclasse, modalidade tarifária, tipo de fornecimento e tensão nominal, sendo utilizados esses dados para definir os valores das tarifas cobradas por kWh consumido. Essas tarifas são definidas pela ANEEL em R\$/kWh, sendo classificadas em TE (Tarifa de Energia), que está relacionada com a energia mensal consumida, e TUSD (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição), que representa a tarifa sobre o uso da infraestrutura do sistema de distribuição.

Quando os reservatórios das usinas hidrelétricas (fonte principal de energia do Brasil) estão abaixo do nível adequado, torna-se necessário a utilização das usinas termoelétricas, ocasionando um encarecimento na geração de energia elétrica no país, sendo aplicada uma outra tarifa em decorrência disso, a qual é denominada como Bandeira Tarifária. Essa tarifa é definida conforme a situação vigente da escassez de água nos reservatórios, sendo classificada em verde, amarela e vermelha.

Ao considerar as tarifas aplicadas em uma fatura de energia, deve-se considerar os tributos estabelecidos sobre as mesmas, sendo eles definidos em PIS, COFINS e ICMS. Em relação a esfera federal, tem-se o PIS (Programa de Integração Social) e a COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social), estando o primeiro relacionado com o financiamento do seguro desemprego, e o segundo com os gastos perante as áreas da saúde, previdência e assistência social, sendo que ambos possuem a finalidade de atender aos programas sociais do Governo. As alíquotas, para esses tributos, são definidas de forma não cumulativa, sofrendo alterações mensais, para mais ou para menos, com base em seus valores fixos determinados por leis, estando fixados em 1,65% para o PIS e 7,6% para o COFINS.

No aspecto estadual, encontra-se o ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), que é estabelecido sobre qualquer tipo de produto comercializado ou de prestação de serviços, sendo aplicado, na fatura de energia, em relação ao fornecimento de energia elétrica para o cliente. O valor desse imposto é definido com base na faixa de consumo e no tipo de consumidor, além de variar entre os estados do país. (FOTUS, 2021).

Analisando uma fatura de energia, observa-se que uma parcela de seu valor final é constituída por meio da soma dos resultados das multiplicações entre o consumo em kWh e as tarifas TE e TUSD, sendo embutidos os tributos do PIS, COFINS e ICMS nessas tarifas, e, também, na tarifa da Bandeira Tarifária quando se está vigente. Ademais, é cobrada na fatura de energia a CIP (Contribuição de Iluminação Pública), sendo um valor definido pelos municípios e isento dos tributos e impostos já mencionados.

Utiliza-se da fórmula abaixo para calcular o valor das tarifas com a aplicação dos tributos supracitados.

$$\text{Tarifa com impostos} = \frac{\text{Valor da tarifa determinada pela ANEEL}}{(1 - \text{ICMS}) \times [1 - (\text{PIS} + \text{COFINS})]} \quad (5)$$

Outra questão importante é o custo de disponibilidade, que é determinado pelo tipo de fornecimento de acordo com a ligação do padrão de entrada de energia, definindo um consumo mínimo mensal para ser cobrado do cliente, sendo estabelecido para os sistemas trifásicos um consumo igual a 100 kWh, para os bifásicos igual a 50 kWh e para os monofásicos igual a 30 kWh.

Observando uma fatura de energia, é possível encontrar um histórico de consumo, em kWh, que evidencia o registro de consumo dos últimos 12 meses, podendo ser realizada a média desses valores, adquirindo-se um consumo médio mensal, sendo essa informação fundamental para o dimensionamento inicial de um sistema solar fotovoltaico. Dessa forma, considerando o consumo mínimo da UC mediante ao seu tipo de fornecimento, é possível obter a geração de energia elétrica necessária do sistema solar, posto que essa geração é determinada pela diferença entre o consumo médio mensal e o consumo mínimo, buscando, assim, atender ao consumo dessa UC

Realizando a média do consumo referente aos últimos 12 meses do histórico de faturamento exposto na figura 30, encontra-se um consumo médio de, aproximadamente, 383,33 kWh/mês. Levando em conta que o tipo de fornecimento da UC analisada seja bifásico, tem-se um consumo mínimo de 50 kWh/mês, que deverá ser subtraído desse consumo médio para a determinação da quantidade de

energia que o sistema solar fotovoltaico terá que gerar, sendo obtido, para o caso em questão, o valor de 333,33 kWh/mês.

Figura 30 – Histórico de consumo em uma fatura de energia.

Histórico de Faturamento		
Mês / Ano	kWh	R\$
05/21	277	238,76
04/21	526	440,66
03/21	456	388,89
02/21	518	432,68
01/21	594	504,12
12/20	377	331,09
11/20	204	170,80
10/20	563	454,81
09/20	346	279,50
08/20	236	187,12
07/20	226	179,37
06/20	277	216,26
05/20	283	219,41
04/20	444	343,34

Maiores detalhes estão disponíveis em www.edponline.com.br

Fonte: FOTUS, 2021.

3.1.2 Dados do CRESESB de Irradiação Solar

Visando oferecer uma ferramenta de apoio para a elaboração dos projetos de energia solar fotovoltaica, o site do CRESESB estabelece uma base de referências sobre a irradiação solar em qualquer lugar do território brasileiro. Para que seja possível a obtenção desses dados, é necessário fornecer as coordenadas geográficas do local onde se pretende instalar o sistema. Após preencher o site com a localização, em graus decimais, de latitude e longitude, o mesmo disponibiliza os resultados da irradiação solar diária média, ou seja, do tempo médio por dia em que os módulos fotovoltaicos ficarão submetidos à exposição dos raios solares, sendo esse resultado um dos critérios principais para o dimensionamento de um projeto solar fotovoltaico. Com isso, é viável a estimativa anual de geração de energia elétrica de um sistema solar, posto que essa plataforma disponibiliza uma média diária de radiação solar incidente para cada mês, possibilitando os cálculos conforme as mudanças das

estações do ano, sendo essa estimativa baseada na localização da instalação e no rendimento global do sistema proposto.

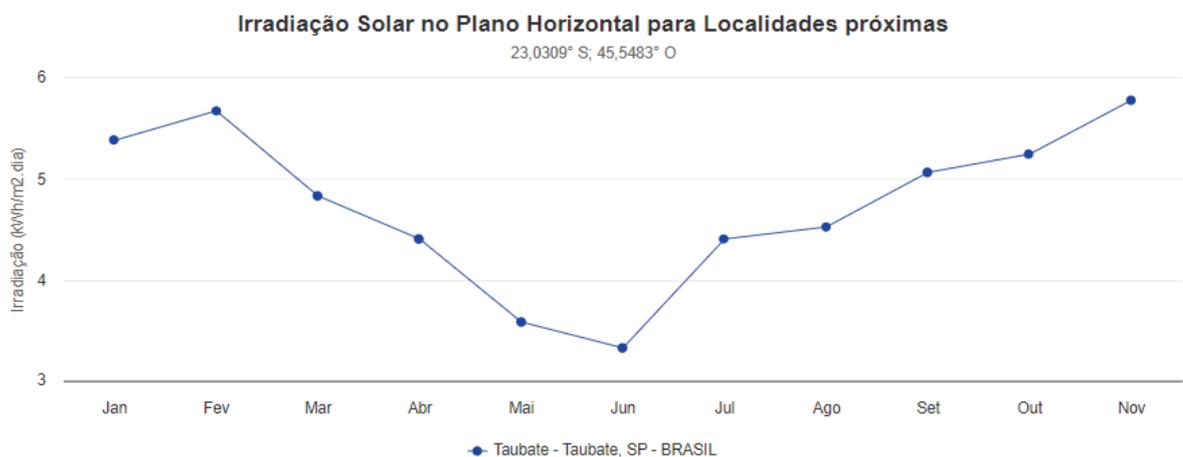
Extraindo os dados obtidos pelo gráfico e pela tabela da figura 31, tem-se que, para a cidade de Taubaté - SP, o tempo médio de exposição solar diária é de 4,64 h.

Figura 31 – Irradiação Solar Média para a cidade de Taubaté – SP por dia.

Localidades próximas

Latitude: 23,0309° S
Longitude: 45,5483° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]												Média	Delta			
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set			Out	Nov	Dez
<input checked="" type="checkbox"/>	Taubate	Taubate	SP	BRASIL	23° S	45,549° O	3,4	5,38	5,68	4,83	4,41	3,58	3,33	3,45	4,41	4,53	5,07	5,25	5,78	4,64	2,46
<input type="checkbox"/>	Taubate	Taubate	SP	BRASIL	23,101° S	45,549° O	7,8	5,56	5,81	4,92	4,41	3,57	3,34	3,47	4,38	4,51	5,12	5,33	5,86	4,69	2,52
<input type="checkbox"/>	Pindamonhangaba	Pindamonhangaba	SP	BRASIL	23° S	45,449° O	10,7	5,56	5,80	4,91	4,46	3,65	3,42	3,48	4,45	4,57	5,13	5,31	5,86	4,72	2,44



Fonte: CRESESB, 2023.

3.1.3 Fatores que Influenciam no Rendimento do Sistema Fotovoltaico

Ao avaliar o rendimento de um sistema solar fotovoltaico, é fundamental analisar os fatores que influenciam para a sua determinação, sendo que em uma instalação desse tipo ocorrem perdas diversas, estando elas correlacionadas aos equipamentos, cabeamentos e a manutenção do sistema, impactando diretamente na eficiência energética da usina solar.

Considerando um dos motivos das perdas ocasionadas nos sistemas solares, tem-se as perdas por temperatura, que influenciam na condutividade dos componentes elétricos do projeto, acarretando para uma queda de tensão nesses, principalmente nos painéis solares, inviabilizando a geração em torno de 7% a 18%. (FOTUS, 2021). Além disso, há também a perda por incompatibilidade elétrica, que é

caracterizada principalmente pelas conexões dos condutores e pela compatibilidade entre inversor e módulo, podendo corresponder de 1% a 2%.

Uma outra perda é em relação ao cabeamento CC, sendo ocasionada devido as quedas de tensão ao longo desses cabos, podendo ser evitada no dimensionamento adequado do sistema, representando uma perda de 0,5% a 1,0%. Essa faixa percentual também se aplica para a perda relacionada ao cabeamento CA, sendo definida pelo mesmo motivo da perda nos cabos CC, no entanto, o valor da corrente alternada é mais elevado do que a da contínua, necessitando de uma atenção maior referente a distância percorrida e as bitolas dos cabos utilizados, sendo essas as principais causas dessas perdas.

As perdas nos circuitos internos do inversor também contribuem para a diminuição da capacidade de geração de um sistema solar, sendo essa contribuição de 2,5% a 5%, posto que não há dispositivo algum que seja totalmente eficiente, ou seja, que possua um rendimento de 100%, haja vista que existem perdas nesses aparelhos. Essas informações sobre esses equipamentos fotovoltaicos são obtidas por meio dos *datasheets* (folhas de dados), que são fornecidos pelos fabricantes desses produtos.

Um outro fator que corrobora para as perdas no rendimento de um sistema solar, é o acúmulo de sujeira sobre a superfície do módulo fotovoltaico, posto que isso acarreta para o surgimento de pequenas sombras em suas células, ocasionando uma menor absorção de irradiação solar. Com isso, há uma redução na geração de corrente elétrica no painel solar afetado, e, conseqüentemente, isso é refletido em uma quantidade maior de módulos, visto que esses, por estarem conectados em série, possuem o mesmo valor de corrente elétrica, causando perdas de 1% a 8% sobre o rendimento total desse sistema.

Baseando-se nas faixas percentuais aplicadas às perdas mencionadas anteriormente, tem-se o valor médio referente a cada uma dessas, estando esses valores representados no quadro1, sendo que eles serão utilizados, posteriormente, para a obtenção dos rendimentos parciais correspondentes a cada perda em um projeto fotovoltaico, conforme calculado no quadro 2. Com isso, partindo do princípio de que o acontecimento dessas perdas, em muitas das vezes, é inevitável em uma instalação, torna-se viável a aquisição de um valor estimado para o rendimento global de um sistema desse tipo, sendo esse valor resultante da multiplicação entre os valores dos rendimentos parciais.

Quadro 1 – Valor Médio das Perdas em um Sistema Solar Fotovoltaico.

Perdas	Faixa Aplicada	Valor Médio
Temperatura	7% a 18%	12,50%
Incompatibilidade Elétrica	1% a 2%	1,50%
Cabeamento CC	0,5% a 1%	0,75%
Cabeamento CA	0,5% a 1%	0,75%
Inversor	2,5% a 5%	3,75%
Acúmulo de Sujeira	1% a 8%	4,50%

Fonte: Próprio autor.

Quadro 2 – Valores dos Rendimentos Parciais.

Perda	Cálculo	Rendimento Parcial
Temperatura	$(100\% - 12,5\%) = 1 - 0,1250 = 0,8750$	87,50%
Incompatibilidade Elétrica	$(100\% - 1,50\%) = 1 - 0,0150 = 0,9850$	98,50%
Cabeamento CC	$(100\% - 0,75\%) = 1 - 0,0075 = 0,9925$	99,25%
Cabeamento CA	$(100\% - 0,75\%) = 1 - 0,0075 = 0,9925$	99,25%
Inversor	$(100\% - 3,75\%) = 1 - 0,0375 = 0,9625$	96,25%
Acúmulo de Sujeira	$(100\% - 4,50\%) = 1 - 0,0450 = 0,9550$	95,50%

Fonte: Próprio autor.

Com base nos valores obtidos para os rendimentos parciais, tem-se o cálculo do rendimento global, sendo demonstrado a seguir o valor adquirido para o mesmo.

$$\text{Rendimento global} = 0,8750 \times 0,9850 \times 0,9925 \times 0,9925 \times 0,9625 \times 0,9550$$

$$\therefore \text{Rendimento global} \cong 0,7804 = 78,04\%$$

(6)

3.1.4 Cálculo da Potência em kWp

A potência em kWp é definida como sendo o total das potências dos módulos considerados no sistema fotovoltaico, e, por isso, ela é essencial para a determinação da quantidade de painéis solares que será necessária em um projeto desse tipo, sendo esse quantitativo estabelecido por meio da potência individual do módulo escolhido.

Para efetuar o cálculo da potência em kWp, utiliza-se da seguinte expressão:

$$\text{Potência Total (kWp)} = \frac{\text{Energia de Geração (kWh/mês)}}{\text{Tempo de exposição (h/dia)} \times \text{Rendimento} \times 30 \text{ (dias)}} \quad (7)$$

Compreendendo-se a definição de energia como sendo uma unidade de potência multiplicada pelo tempo, tem-se que a potência em kWp multiplicada pelo tempo de exposição diária dos módulos, resulta no valor da energia de geração em kWh/dia. Além disso, também está sendo considerado o rendimento global estimado do projeto no cálculo da potência em kWp, assegurando que os valores previstos de geração sejam os mais próximos daqueles obtidos em um sistema fotovoltaico já em funcionamento.

3.1.5 Definição da Quantidade de Módulo e do Inversor

Após obter-se o equivalente das potências dos módulos em kWp, por meio dos valores definidos para a energia de geração, tempo de exposição e rendimento global, torna-se possível, com base na potência individual e no modelo, a escolha dos painéis solares que serão utilizados no sistema. Dessa forma, ao se ter a potência por módulo e a soma dessas potências, encontra-se a quantidade necessária desse equipamento por meio da fórmula abaixo.

$$\text{Quantidade de Módulos (un)} = \frac{\text{Potência Total dos Módulos (Wp)}}{\text{Potência por Módulo (Wp)}} \quad (8)$$

Ao se definir o quantitativo de painéis solares que irão compor o sistema fotovoltaico, é preciso determinar qual inversor solar possui a potência adequada para o sistema, sendo isso decidido de acordo com a potência total dos módulos em kWp. Em relação a potência resultante das placas solares, em *STC (Standard Test Conditions)*, considera-se que a mesma deve ser próxima do valor da potência de entrada do inversor, sendo recomendado que seja aplicada uma tolerância de até 30% acima ou abaixo desse valor, evitando, assim, um sobredimensionamento ou um subdimensionamento no inversor, preservando o seu funcionamento pleno. Além disso, é preciso analisar a tensão de partida e a tensão máxima de entrada por *MPPT* desse inversor, uma vez que essas informações são essenciais para se definir a

quantidade mínima e máxima de módulos em cada entrada de *MPPT*. Ademais, é necessário verificar se esse inversor atende as características elétricas da UC, como o tipo de fornecimento e a tensão nominal, buscando, assim, analisar a possibilidade e a simplificação da conexão do sistema no quadro geral de distribuição ou no padrão de entrada da UC.

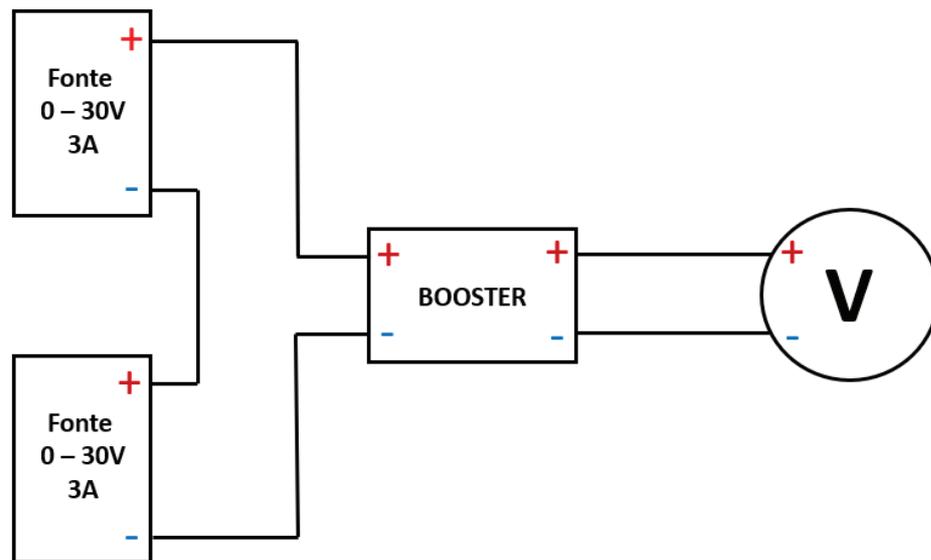
3.2 TESTES DO CIRCUITO *BOOSTER* EM LABORATÓRIO

O objetivo dos testes realizados em laboratório foi verificar o funcionamento do circuito *booster*, por meio de variações nos terminais de entrada e saída (com e sem carga), explorando os limites impostos pelas informações do fornecedor do componente, e então, a partir daí, construir uma base para a análise de sua viabilidade, no que se refere à possibilidade de aplicação em sistemas de geração de energia que possuam como princípio básico de funcionamento o efeito fotovoltaico, que é causado pela incidência de luz do sol em um painel solar.

3.2.1 Testes Funcionais sem Carga

Inicialmente, adotando-se a configuração ilustrada pela figura 32, o circuito foi submetido a duas condições de teste diferentes, a fim de se obter parâmetros referentes tanto a sua funcionalidade quanto a sua precisão e constância de regulagem. O critério de aceitação adotado para os ensaios a seguir foi o seguinte – o componente deve ser capaz, mediante à energização sem carga na saída, de regular valores diversos e estáveis na saída, independente da tensão de entrada, isto é, desde que ela esteja dentro do intervalo de valores de operação especificado pelo fornecedor do componente (verificar APÊNDICE A – Características do *Step-up* utilizado nos testes em laboratório). Para a visualização do registro fotográfico do circuito físico e de algumas das medições realizadas nesta etapa, verificar o APÊNDICE C – Registros Fotográficos dos Ensaios em Laboratório.

Figura 32 – Ilustração da configuração utilizada para os testes sem carga.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.1 Condição 1 – Entrada Fixa e Variação da Tensão de Saída

Neste primeiro teste, a entrada foi mantida fixa em 12, 24, 36 e 48 V e o ajuste da saída foi realizado por meio dos *trimpots* de regulação de tensão presentes no circuito *booster* utilizado (verificar APÊNDICE A – Características do *Step-up* utilizado nos testes em laboratório). Os valores obtidos estão representados nos quadros 3, 4, 5 e 6.

Quadro 3 – Resultados da condição 1 – entrada em 12 V e variação da saída pelos *trimpots*.

TENSÃO – ENTRADA [V]	CORRENTE – ENTRADA [mA]	SAÍDA [V]
12	20	12
12	20	24
12	30	36
12	40	48
12	50	60
12	60	70

Fonte: Próprio autor.

Quadro 4 – Resultados da condição 1 – entrada em 24 V e variação da saída pelos *trimpots*.

TENSÃO – ENTRADA [V]	CORRENTE – ENTRADA [mA]	SAÍDA [V]
24	30	36
24	30	48
24	30	60
24	30	70

Fonte: Próprio autor.

Quadro 5 – Resultados da condição 1 – entrada em 36 V e variação da saída pelos *trimpots*.

TENSÃO – ENTRADA [V]	CORRENTE – ENTRADA [mA]	SAÍDA [V]
36	30	36
36	30	48
36	30	60
36	30	70

Fonte: Próprio autor.

Quadro 6 – Resultados da condição 1 – entrada em 48 V e variação da saída pelos *trimpots*.

TENSÃO – ENTRADA [V]	CORRENTE – ENTRADA [mA]	SAÍDA [V]
48	30	48,4
48	40	60
48	40	70

Fonte: Próprio autor.

3.2.1.2 Condição 2 – Saída fixa e Variação da Tensão de Entrada

Para o segundo teste realizado, a saída foi mantida fixa em 24 V e a variação da tensão de entrada foi feita por meio das fontes reguláveis. A ideia dessa segunda condição foi verificar até que ponto a regulagem da saída se manteria fixa mediante à variação na tensão de entrada do circuito *booster*, sendo mostrado os valores obtidos no quadro 7.

Quadro 7 – Resultados da condição 2 – saída fixa em 24 V e variação da entrada pela fonte.

TENSÃO – ENTRADA [V]	SAÍDA [V]
12	24
20	24
26	25,3

Fonte: Próprio autor.

3.2.1.3 Conclusão dos Testes sem Carga

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o circuito em questão apresentou uma constância no que se refere à precisão e confiabilidade de sua regulagem, visto que mesmo ao considerar, em sua entrada, o valor mínimo aceitável de tensão (12 V) – segundo as informações do fabricante, foi possível realizar o ajuste da tensão de saída em até 70 V sem dificuldade. É importante ressaltar que a pequena variação na corrente de entrada da fonte não foi intencional, ou seja, não foi resultado de algum tipo de intervenção na configuração do experimento. Observou-se, também, por meio dos resultados da condição 2, que desde que o valor de tensão na entrada seja menor que o valor para o qual a saída foi ajustada, ela se manterá fixa. Por fim, o componente pôde ser considerado como apto para a realização de testes com carga.

3.2.2 Testes Funcionais com Carga

Visto que o *booster* utilizado apresentou resultado satisfatório durante os testes funcionais realizados até o momento, viu-se a necessidade de conexão de cargas, a fim de possibilitar a verificação de seu comportamento em uma configuração mais próxima da qual o circuito seria submetido caso fosse utilizado em um sistema de geração real. Os resultados desta seção serão importantíssimos para a análise de aplicabilidade e viabilidade a ser realizada mais adiante.

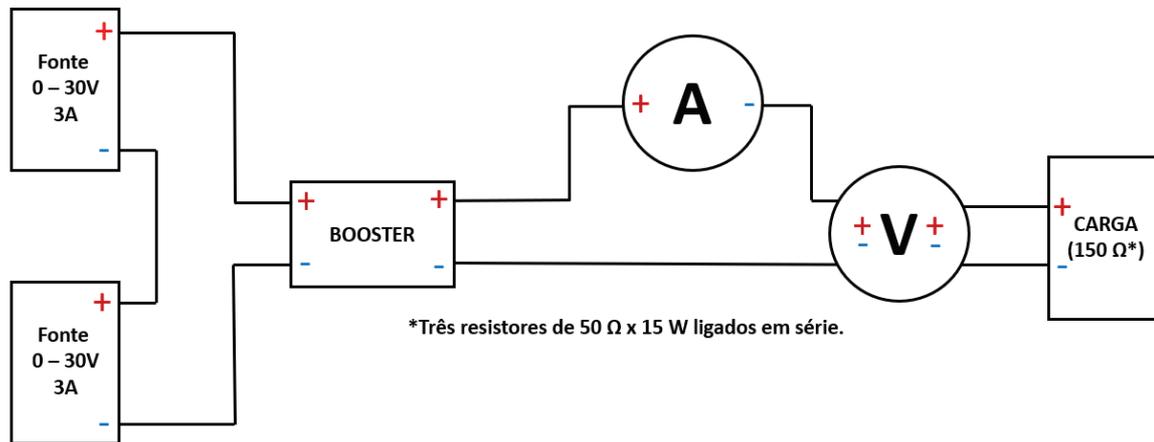
3.2.2.1 Condição 1 – Primeiro Teste de Operação com Carga

A configuração adotada para a realização deste teste foi bem similar a dos testes anteriores, porém, na saída do *booster* foram adicionados três resistores de 50 Ω ligados em série, totalizando 150 Ω , além de um amperímetro para que pudesse ser medida a corrente à jusante do mesmo, conforme ilustrado na figura 33.

O objetivo deste teste, em específico, foi verificar qual seria o comportamento do circuito perante à uma tensão de entrada próxima da tensão real de operação de um painel solar, a qual se aproxima de 40 V, sendo considerado também uma corrente próxima da necessária para que o painel atinja a sua tensão de operação, ou seja, por

volta de 1 A. Para a visualização do registro fotográfico do circuito físico e de algumas das medições realizadas nesta etapa, verificar o APÊNDICE C – Registros Fotográficos dos Ensaio em Laboratório.

Figura 33 – Ilustração da configuração utilizada para a condição 1 dos testes com carga.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados das medições realizadas durante esta etapa podem ser encontrados no quadro 8.

Quadro 8 – Resultados da condição 1 dos testes com carga.

TENSÃO – ENTRADA [V]	CORRENTE – ENTRADA [A]	TENSÃO – SAÍDA [V]	CORRENTE – SAÍDA [A]
39,9	1,02	75,25	0,47

Fonte: Próprio autor.

É possível expressar o rendimento do sistema de conversão (η) por meio da razão entre a potência de saída (S_{out}) e a potência de entrada (S_{in}). Utilizando os valores do quadro acima, obtém-se, por meios dos cálculos abaixo, os valores das potências de entrada e saída, e, posteriormente, o valor para o rendimento do sistema de conversão.

- Potência de entrada:

$$S_{in} = V_{in} \times I_{in}$$

(9)

$$\therefore S_{in} = 39,90 \times 1,02 = 40,6980 \text{ W}$$

- Potência de saída:

$$S_{out} = V_{out} \times I_{out}$$

(10)

$$\therefore S_{out} = 75,25 \times 0,47 = 35,3675 \text{ W}$$

- Rendimento do sistema de conversão:

$$\eta = \frac{S_{out}}{S_{in}}$$

(11)

$$\therefore \eta = \frac{35,3675}{40,6980} = 0,8690 \text{ (86,90\%)}$$

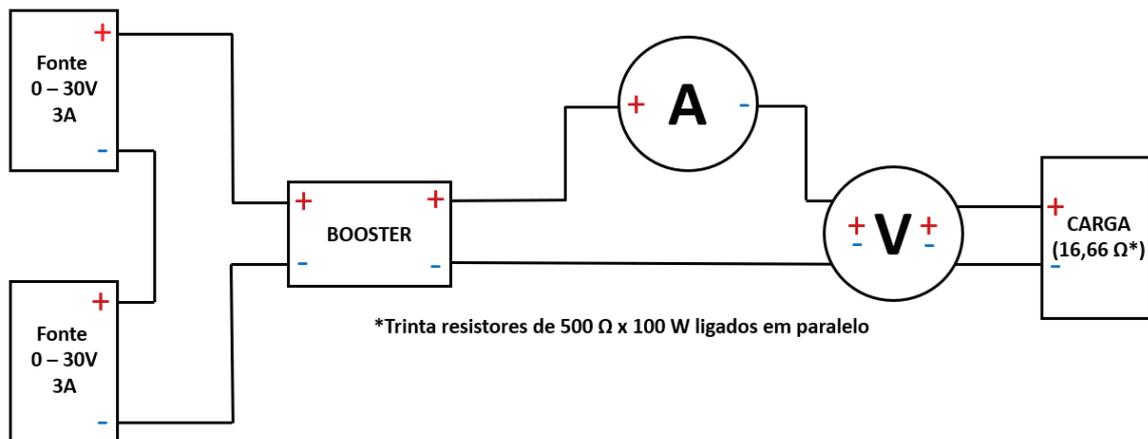
A eficiência de 86,90% foi considerada como aceita, posto que não há valor mínimo especificado pelo fabricante, somente o máximo de 95% (verificar APÊNDICE A – Características do *Step-up* utilizado nos testes em laboratório). O circuito foi considerado como apto para seguir com os testes da condição 2, haja vista que, em termos gerais e para fins de estudo e avaliação, um rendimento acima de 85% é satisfatório.

3.2.2.2 Condição 2 – Segundo Teste de Operação com Carga

O circuito *Set-up* foi levemente alterado, em relação aos demais, como ilustrado na figura 34 – o objetivo desta segunda condição dos testes com carga também foi verificar o comportamento do circuito, porém com valores maiores de corrente de entrada e com tensão próxima à de operação de um painel solar real. Sabendo que, neste caso, a corrente de entrada está diretamente relacionada à carga, optou-se pelo uso de um banco de resistores, composto por trinta unidades de 500 Ω associadas

em paralelo, totalizando aproximadamente $16,66 \Omega$, sendo que esse foi o valor obtido que mais se aproximou do ideal de 3Ω - resistência elétrica de um módulo de 550 W . Após a energização do circuito, os reguladores de tensão e corrente das fontes foram posicionados no fim de curso, com o intuito de alimentar o conversor com a sua capacidade máxima. É importante ressaltar que os *trimpots* de regulação de tensão e corrente do *booster* também foram configurados para a capacidade máxima de fornecimento na saída. Para a visualização do registro fotográfico do circuito físico e de algumas das medições realizadas nesta etapa, verificar o APÊNDICE C – Registros Fotográficos dos Ensaio em Laboratório.

Figura 34 – Ilustração da configuração utilizada para o segundo teste de operação com carga.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados das medições realizadas, durante esta etapa, podem ser encontrados no quadro 9.

Quadro 9 – Resultados da condição 2 dos testes com carga.

TENSÃO – ENTRADA [V]	CORRENTE – ENTRADA [A]	TENSÃO – SAÍDA [V]	CORRENTE – SAÍDA [A]
10,40	3,06	22	1,20

Fonte: Próprio autor.

Partindo do mesmo princípio utilizado na seção 3.2.2.1 para o cálculo do rendimento obtido, tem-se, aplicando os valores dessa medição, o seguinte rendimento:

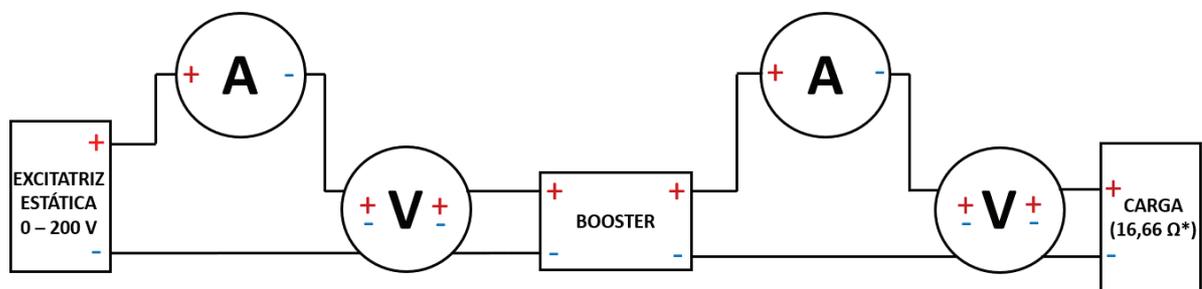
$$\eta_2 = \frac{26,4000}{31,8240} = 0,8296 \text{ (82,96\%)} \quad (12)$$

Notou-se, a partir dos resultados obtidos, que as fontes utilizadas, mesmo em sua capacidade máxima, não foram capazes de fornecer a variedade de valores de entrada desejada para uma verificação satisfatória do funcionamento do *booster* com a nova carga de $16,66 \Omega$. Sendo assim, houve a necessidade de substituição dessas fontes a fim de se prosseguir com os testes com carga.

3.2.2.3 Condição 3 – Terceiro Teste de Operação com Carga (após substituição das fontes)

Para a terceira e última condição, em adição à substituição das fontes por uma excitatriz estática, capaz de fornecer valores de tensão de até 200 V DC , foram inseridos mais dois medidores (um voltímetro e um amperímetro) entre a fonte e a entrada do *booster*. A excitatriz, diferente das fontes utilizadas até o momento, não possui *displays* ou indicadores dos valores de tensão e corrente integrados, não sendo possível saber, com precisão, os parâmetros de entrada do circuito sem o auxílio dos medidores. O circuito *Set-up*, após a substituição das fontes, pode ser verificado por meio da ilustração presente na figura 35. Para a visualização do registro fotográfico do circuito físico e de algumas das medições realizadas nesta etapa, verificar o APÊNDICE C – Registros Fotográficos dos Ensaio em Laboratório.

Figura 35 – Ilustração da configuração utilizada para o terceiro teste de operação com carga.



*Trinta resistores de $500 \Omega \times 100 \text{ W}$ ligados em paralelo.

Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, com os *trimpots* de regulagem do *Step-up* totalmente fechados, o circuito foi energizado e foi dado início aos testes dessa etapa. Com a tensão de entrada igual a 10 V, iniciou-se o processo de abertura gradativa dos *trimpots* até o seu limite, e então, após isso, ocorreu a elevação da tensão de entrada para os valores de aproximadamente 20, 30 e 40 V. Os resultados dessas medições efetuadas podem ser verificados no quadro 10.

Quadro 10 – Resultados da condição 3 dos testes com carga.

TENSÃO – ENTRADA [V]	CORRENTE – ENTRADA [A]	TENSÃO – SAÍDA [V]	CORRENTE – SAÍDA [A]
10	1,8	17,1	0,92
10	3,0	22,6	1,23
10	3,8	25,1	1,37
10	4,8	27,9	1,53
10	5,9	31,9	1,74
10	6,8	34,6	1,89
10	7,7	38,1	2,09
20	8,2	52,4	2,88
32	7,6	67,1	3,68
41	7,0	73,5	4,03

Fonte: Próprio autor.

Partindo do mesmo princípio utilizado na seção 3.2.2.1 para o cálculo do rendimento obtido, e aplicando-o em cada umas das medições realizadas, chegou-se a um valor de eficiência médio de 0,8635 (86,35%). É interessante notar que esse rendimento teve um valor próximo dos valores obtidos para os testes das condições 1 e 2, sendo esses, respectivamente, de 86,90% e de 82,96%, se aproximando mais do valor do rendimento adquirido na condição 1.

3.2.2.4 Cálculo do Rendimento Médio Geral e Conclusão dos Testes com Carga

A partir dos três valores de rendimento obtidos nos diferentes cenários dos testes realizados nas seções 3.2.2.1, 3.2.2.2 e 3.2.2.3, o rendimento médio geral do circuito *Step-up* foi obtido por meio da seguinte expressão:

$$\eta_T = \frac{(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)}{3} = \frac{(0,8690 + 0,8296 + 0,8635)}{3} = 0,8540 \text{ (85,40\%)} \quad (13)$$

Após a obtenção do valor do rendimento médio geral do sistema de conversão e dos parâmetros desejados, dá-se como encerrada a etapa de testes com carga do circuito *booster*. Dessa forma, conclui-se que os resultados apresentaram uma consistência considerável, e que, por isso, podem ser tidos como aceitos para serem utilizados futuramente como referência para as análises que serão realizadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será analisado o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico considerando os dispositivos que serviram como base para os testes laboratoriais, sendo estes: módulo de 550 W e inversor *string* de 1 kW. Após essa análise, será avaliada a estimativa de geração, economia, custos e descarte de materiais para o projeto supracitado. Posteriormente, será realizada a substituição de um painel solar por um circuito *booster*, ou seja, por um sistema compensador de tensão contínua, estabelecendo um estudo comparativo entre esses sistemas solares. Dessa forma, será possível analisar, mediante aos gastos com os equipamentos e a geração de energia elétrica de cada projeto, se essa modificação resulta em uma viabilidade econômica, e em uma maior responsabilidade ambiental ao diminuir-se o quantitativo de materiais fotovoltaicos descartados ao término de sua vida útil.

4.1 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR CONSIDERANDO OS DISPOSITIVOS EM ANÁLISE

Em um estudo de dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico, uma informação importante é qual módulo será utilizado no projeto, sendo definido mediante ao somatório da potência necessária em kWp. Após se obter o tipo e o quantitativo de placas solares que serão usadas no sistema, são analisadas as suas características elétricas (tensão, corrente e potência) para se determinar o inversor solar que apresenta uma maior compatibilidade elétrica com esses painéis solares. Com o auxílio do *datasheet* do módulo fotovoltaico, torna-se possível coletar os valores atribuídos às suas propriedades elétricas, sendo essas informações fornecidas por meio de duas formas de análise: *STC*, cujos valores são referentes às condições padrão de teste, e *NOCT* (em torno de 25% a menos na potência Wp), que estabelece os valores com base na temperatura nominal de operação da célula fotovoltaica, se aproximando das grandezas alcançadas em um sistema em funcionamento.

Para exemplificar o dimensionamento de um sistema solar, foram analisadas, na figura 36, as características elétricas do módulo fotovoltaico de 550 W, sendo observados esses dados na forma de análise *STC*, uma vez que foi considerado, posteriormente, o valor sobredimensionado da potência nominal de entrada do

inversor (*Oversize*), ou seja, um acréscimo de 30% sobre esse valor, podendo chegar em até 50%, aumentando a capacidade que o inversor suporta de módulos, visto que, segundo dados do PORTAL SOLAR (2020), os painéis solares raramente produzem energia elétrica conforme a sua potência nominal descrita em *STC*. Além disso, levando em consideração as possíveis perdas na instalação solar, foi considerado o rendimento global do sistema nos cálculos de geração estimada do projeto, assegurando que os resultados obtidos fossem próximos daqueles que seriam evidenciados após a instalação desse sistema fotovoltaico.

Figura 36 – *Datasheet* do Módulo Fotovoltaico de 550 W da marca Honor Solar.

Electrical Specification (STC*)						
Maximum Power	P _{max} [W]	530	535	540	545	550
Maximum Power Voltage	V _{mp} [V]	40.74	40.88	41.01	41.15	41.28
Maximum Power Current	I _{mp} [A]	13.01	13.09	13.17	13.24	13.32
Open Circuit Voltage	V _{oc} [V]	49.26	49.40	49.53	49.67	49.80
Short Circuit Current	I _{sc} [A]	13.69	13.77	13.85	13.93	14.01
Module Efficiency	(%)	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3
Power Output Tolerance	[W]					±5%
Open Circuit Voltage	[V]					±3%
Short Circuit Current	[A]					±4%
* Irradiance 1000W/m ² , Module Temperature 25°C, Air Mass 1.5						
Electrical Specification (NOCT*)						
Maximum Power	P _{max} [W]	394	398	402	406	410
Maximum Power Voltage	V _{mp} [V]	37.92	38.05	38.19	38.32	38.46
Maximum Power Current	I _{mp} [A]	10.40	10.46	10.52	10.58	10.64
Open Circuit Voltage	V _{oc} [V]	46.50	46.63	46.75	46.88	47.00
Short Circuit Current	I _{sc} [A]	11.06	11.12	11.19	11.25	11.32
* Irradiance 800W/m ² , Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s						

Fonte: *Datasheet* da HONOR SOLAR, 2021.

Observando os dados apresentados na ficha de especificações técnicas do módulo fotovoltaico da marca Honor Solar (modelo HY-M10/144), percebeu-se que a potência máxima a ser considerada para o painel solar era de 550 Wp, sendo a sua tensão máxima de 41,28 V e a sua corrente máxima de 13,32 A. Com isso, foi possível definir o inversor solar que melhor atendesse as características desse módulo, sendo

representado na figura 37 os dados referentes ao inversor que foi considerado na análise deste trabalho.

Figura 37 – *Datasheet* do Inversor Solar de 1 kW da marca Solis.

Folha de Dados							
Modelo	S6-GR1P0,7K-M	S6-GR1P1K-M	S6-GR1P1,5K-M	S6-GR1P2K-M	S6-GR1P2,5K-M	S6-GR1P3K-M	S6-GR1P3,6K-M
Entrada CC							
Potência máxima de entrada recomendada	1.19 kW	1.7 kW	2.55 kW	3.4 kW	4.25 kW	5.1 kW	6.12 kW
Tensão máx de entrada				600 V			
Tensão nominal		200 V			330 V		
Tensão de partida		60 V			90 V		
Intervalo de tensão MPPT		50-500 V			80-500 V		
Corrente máx de entrada				14 A			19 A
Corrente máx de curto-circuito				22 A			30 A
MPPTs / Número de Entradas				1/1			1/2
Saída CA							
Potência nominal de saída	0.7 kW	1 kW	1.5 kW	2 kW	2.5 kW	3 kW	3.6 kW
Potência máx de saída aparente	0.8 kVA	1.1 kVA	1.7 kVA	2.2 kVA	2.8 kVA	3.3 kVA	3.6 kVA
Potência máx de saída	0.8 kW	1.1 kW	1.7 kW	2.2 kW	2.8 kW	3.3 kW	3.6 kW
Tensão nominal da rede				1/N/PE, 220 V / 230 V			
Frequência nominal da rede				50 Hz / 60 Hz			
Corrente nominal de saída da rede	3.2 A / 3.0 A	4.5 A / 4.3 A	6.8 A / 6.5 A	9.1 A / 8.7 A	11.4 A / 10.9 A	13.6 A / 13 A	16 A
Corrente máx de saída	4.4 A	5.2 A	8.1 A	10.5 A	13.3 A	15.7 A	16 A
Fator de potência				> 0,99 (0,8 inicial - 0,8 atrasado)			
Harmônicas (THDi)				<3%			

Fonte: *Datasheet* da SOLIS.

Notou-se que pelas informações apresentadas na folha de dados do inversor solar da marca Solis (modelo S6-GR1P1K-M) de 1 kW, foi obtida, na parte de entrada CC, a potência máxima que ele suporta (acrescida em 70%), além dos indicativos de tensão de partida (tensão mínima para o seu funcionamento) e tensão máxima de entrada (tensão máxima permitida por *MPPT*). Ademais, uma outra referência fornecida foi a quantidade de entrada de *MPPT* que o equipamento possui, sendo que, para esse inversor, há uma única entrada de *MPPT*, a qual contém somente uma *string*. Baseando-se nesses critérios, obteve-se a quantidade de módulos fotovoltaicos de 550 Wp que esse inversor é capaz de comportar, sendo considerado um acréscimo de 30% sobre a sua potência nominal, conforme recomenda-se os especialistas.

$$N^{\circ} \text{ M\acute{a}ximo de M\acute{o}dulos (un)} = \frac{\text{Pot\^encia M\acute{a}xima Entrada Inversor (Wp)}}{\text{Pot\^encia por M\acute{o}dulo (Wp)}}$$

$$\therefore N^{\circ} \text{ M\acute{a}ximo de M\acute{o}dulos (un)} = \frac{1300}{550} = 2 \text{ un} \quad (14)$$

Definido a quantidade de painéis solares que o inversor suporta, teve-se o próximo parâmetro para ser avaliado, que foi referente a tensão equivalente das entradas de *MPPT*, sendo definida por meio do número de placas solares conectadas em série nas *strings* consideradas de uma dessas entradas. O inversor que foi analisado possui apenas uma *string*, o que significa que o mesmo poderia ter somente um arranjo de módulos em seu *MPPT*, podendo ter uma tensão resultante de no mínimo 60 V e no máximo de 600 V. Considerando que cada módulo fotovoltaico de 550 Wp tem uma tensão igual a 41,28 V, em *STC*, chegou-se ao número mínimo e máximo de painéis solares que poderiam ser conectados em série nesse arranjo. Dessa forma, o quantitativo de módulos permitidos por esse inversor na mesma e única *string*, com base em seus limites de tensão, foi de 2 a 14 painéis solares, sendo isso considerado na configuração do circuito em série, na qual a tensão equivalente é igual ao somatório da tensão em cada módulo.

Um outro parâmetro a ser analisado foi a corrente máxima fornecida pelo módulo e pelo inversor, sendo que em uma ligação em série a corrente elétrica se torna a mesma em todos os elementos do circuito, não sofrendo acréscimo em seu valor ao longo do percurso. Quando ocorre um sombreamento parcial em uma placa solar, a sua corrente elétrica é afetada, sofrendo uma diminuição em seu valor, e por esse painel estar conectado em série com outros, a corrente total do sistema também é reduzida, passando a ser determinada pelo valor da corrente gerada por esse módulo que está com menor incidência solar, ou seja, com menor rendimento. O conceito de que a corrente elétrica é diretamente proporcional à radiação solar incidente sobre a superfície das placas, é evidenciado em situações de sombreamento sobre os painéis. Para os equipamentos em análise, o valor de corrente do módulo escolhido estava dentro do limite estabelecido pelo inversor.

4.1.1 Geração Estimada do Projeto Solar Fotovoltaico

Ao realizar o dimensionamento de um projeto de energia solar fotovoltaica e avaliar as fichas de especificações técnicas dos dispositivos considerados, é possível estimar para esse sistema a sua geração mensal, anual e durante a vida útil dos equipamentos utilizados. Baseando-se na análise adquirida no item 4.1, e considerando que o projeto fotovoltaico em questão iria possuir a quantidade máxima definida anteriormente de módulos, em termos de potência, para o inversor, ou seja,

2 placas solares de 550 Wp – resultando em 1,10 kWp, teve-se as gerações estimadas (mensal, anual e durante a vida útil) do sistema fotovoltaico proposto, sendo demonstradas a seguir. Para estes cálculos de geração, foram considerados o tempo de exposição médio da radiação solar para a cidade de Taubaté - SP, e o valor de rendimento do sistema solar, conforme foram obtidos, respectivamente, nas seções 3.1.2 e 3.1.3 deste trabalho.

- Geração estimada mensal:

Energia Geração mensal (kWh/mês) = Potência Total (kWp) × Tempo exp. médio (h/dia) × Rendimento × 30 {dias}

$$\therefore \text{Energia Geração mensal} = 1,10 \times 4,64 \times 0,7804 \times 30 \cong 119,50 \text{ (kWh/mês)} \quad (15)$$

- Geração estimada anual:

Energia Geração anual (kWh/ano) = Energia Geração mensal (kWh/mês) × 12 {meses}

$$\therefore \text{Energia Geração anual} = 119,50 \times 12 = 1434 \text{ (kWh/ano)} \quad (16)$$

- Geração estimada durante a vida útil dos módulos (25 anos):

Energia Geração vida útil (kWh) = Energia Geração anual (kWh/ano) × 25 {anos}

$$\therefore \text{Energia Geração vida útil} = 1434 \times 25 = 35850 \text{ (kWh)} = 35,85 \text{ (MWh)} \quad (17)$$

Para obter-se o equivalente estimado de geração de energia elétrica correspondente para cada mês do ano, foram utilizadas as mesmas expressões evidenciadas acima, sendo considerados os valores do tempo de exposição médio de radiação solar de cada mês, estando esses dados disponíveis no site do CRESESB. Além disso, foi possível adquirir uma estimativa da quantidade que seria evitada na emissão de CO₂, em kg, na atmosfera, sendo que isso foi viável devido aos valores

médios mensais do fator de emissão de CO₂ da geração de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional do Brasil, estando essa informação acessível no site do Ministério da Ciência e Tecnologia (ano base de 2022). A quantidade em kWh/mês de eletricidade gerada e a quantia em kg de CO₂ evitada para o sistema proposto, podem ser analisadas no quadro 11 abaixo.

Quadro 11 – Resultados de geração e de emissão evitada de CO₂ do sistema proposto.

Geração do Sistema Solar Fotovoltaico (1,10 kWp)				
Mês	Tempo de exposição médio (h/dia) - CRESESB	Geração estimada kWh/mês	Fator de emissão médio kgCO₂/kWh (ano 2022)	Quantidade evitada de CO₂ em kg
Janeiro	5,38	138,55	0,5226	72,41
Fevereiro	5,68	146,28	0,4883	71,43
Março	4,83	124,39	0,4060	50,50
Abril	4,41	113,57	0,2159	24,52
Maio	3,58	92,20	0,2803	25,84
Junho	3,33	85,76	0,4404	37,77
Julho	3,45	88,85	0,4186	37,19
Agosto	4,41	113,57	0,4566	51,86
Setembro	4,53	116,66	0,4894	57,09
Outubro	5,07	130,57	0,4670	60,98
Novembro	5,25	135,20	0,4034	54,54
Dezembro	5,78	148,85	0,2937	43,72
Total anual		1.434,45	-	587,85

Fonte: Próprio autor.

Com esses resultados, foi possível se ter uma base do quanto de geração de eletricidade o sistema de energia solar fotovoltaica em questão iria ofertar por mês, ano e durante a vida útil de seus painéis solares, tendo valores mais próximos da realidade ao se considerar o tempo de exposição médio mensal, ou seja, ao realizar uma análise da produção por mês, conforme demonstrado no quadro 11. Ademais, a quantidade evitada de dióxido de carbono também teve essa estimativa pela mesma noção de tempo estabelecida para a geração, sendo que, durante a vida útil dos equipamentos, estimou-se que esse sistema solar seria capaz de evitar uma quantidade equivalente a 14,70 toneladas de CO₂ emitidos na atmosfera.

4.1.2 Economia Adquirida durante a Vida Útil dos Equipamentos

Mediante aos resultados obtidos para as estimativas de geração mensal, anual e durante a vida útil dos módulos fotovoltaicos, foi viável a dedução da economia advinda por meio dessa fonte de energia limpa, e, por isso, considerando as tarifas e os tributos retratados na seção 3.1.1, foi realizada uma análise estimada dos valores monetários economizados, em função do tempo, para o projeto fotovoltaico discutido.

Considerando que, sem o sistema fotovoltaico, o consumo médio mensal da UC fosse igual a somatória entre a geração estimada mensal calculada anteriormente no projeto solar proposto, e o consumo mínimo determinado pelo tipo de fornecimento da unidade consumidora, obter-se-ia que, para essa UC, com o fornecimento bifásico (custo de disponibilidade definido em 50 kWh), o consumo médio mensal seria estabelecido em 169,50 kWh/mês.

As alíquotas do ICMS têm seus valores designados com base na classe e na faixa de consumo, sendo esses percentuais disponibilizados e cobrados pela concessionária local, e, posteriormente, repassados integralmente para o Governo Estadual, sendo que, para a cidade de Taubaté-SP, a EDP SP se responsabiliza em fornecer e cobrá-los. A figura 38 abaixo representa o valor da alíquota do ICMS que foi atribuída à UC em questão, visando calcular o preço que seria pago em relação a esse imposto, considerando que essa UC se apresentaria na classe residencial, possuindo uma faixa de consumo mensal entre 91 e 200 kWh.

Figura 38 – Alíquotas do ICMS fornecidas pela EDP SP, 2023.

ICMS		
Classe	Faixa de consumo (kW/h)	Alíquota (%)
Residencial	0 à 90	ISENTO
	91 à 200	12,00%
	Maior que 201	18,00%

Fonte: EDP SP, 2023.

Com base na fórmula abaixo, foi possível obter os valores das tarifas com os respectivos tributos, sendo necessário realizar esses cálculos para a TE, TUSD e

Bandeira Tarifária (quando aplicável) – estabelecida em verde, amarelo e vermelha 1 e vermelha 2, estando essas tarifas baseadas nos valores, determinados pela ANEEL, das mesmas sem tributos, como podem ser analisadas nas figuras 39 e 40. Considerando a alíquota para o ICMS igual a 12%, e para o PIS e a COFINS iguais e fixadas em, respectivamente, 1,65% e 7,6%, sendo essas definidas em aspecto federal – apuradas de forma não cumulativa (sofrem alterações mensais), teve-se, para as tarifas supracitadas, os valores com impostos a seguir.

- Fórmula utilizada para calcular as tarifas com tributos:

$$\text{Tarifa com impostos} = \frac{\text{Valor da tarifa determinada pela ANEEL}}{(1 - \text{ICMS}) \times [1 - (\text{PIS} + \text{COFINS})]} \quad (18)$$

Figura 39 – Tarifas sem tributos definidas pela ANEEL, 2023.

SUBGRUPO/CLASSE/SUBCLASSE	TUSD	Tarifa de Energia (TE)
	R\$/kWh	R\$/kWh
B1 - RESIDENCIAL	0,37743	0,27614
B1 - RESIDENCIAL BAIXA RENDA (*)	0,25383	0,27614
B2 - RURAL	0,35478	0,25957
B2 - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL	0,35478	0,25957
B2 - SERVIÇO PÚBLICO DE IRRIGAÇÃO	0,34723	0,25405
B3 - DEMAIS CLASSES	0,37743	0,27614
B4 - ILUMINAÇÃO PÚBLICA	-	-
B4a - Rede de Distribuição	0,20758	0,15188
B4b- Bulbo de Lâmpada	0,22646	0,16568

Fonte: EDP SP, 2023.

Figura 40 – Alterações Tarifárias por Bandeira, 2023.



Fonte: EDP SP, 2023.

- TE:

$$\text{Tarifa com impostos} = \frac{0,27614}{(1-0,12) \times [1-(0,0165+0,076)]} \cong \text{R\$ } 0,34578 \quad (19)$$

- TUSD:

$$\text{Tarifa com impostos} = \frac{0,37743}{(1-0,12) \times [1-(0,0165+0,076)]} \cong \text{R\$ } 0,47261 \quad (20)$$

- Bandeira Tarifária (considerada amarela para fins de cálculo):

$$\text{Tarifa com impostos} = \frac{0,02989}{(1-0,12) \times [1-(0,0165+0,076)]} \cong \text{R\$ } 0,03743 \quad (21)$$

Após a aquisição dos valores das tarifas com os tributos, tornou-se possível a obtenção dos custos resultantes de cada tarifa perante à quantidade de kWh consumida no mês. Além disso, foi considerada, também, a contribuição municipal, sendo estipulada em um valor de R\$ 5,00 reais. Com isso, foi definido o preço final da fatura de energia dessa análise hipotética de UC.

Quadro 12 – Valores correspondentes de cada tarifa com tributos.

Descrição	Consumo Médio Mensal (kWh/mês)	Valor da Tarifa com Tributos (R\$)	Valor na Fatura de Energia (R\$)
TE	169,5	0,34578	58,61
TUSD	169,5	0,47261	80,11
Bandeira Tarifária (Amarela)	169,5	0,03743	6,34
CIP	-	-	5,00
Total (R\$)			150,06

Fonte: Próprio autor.

Com a instalação do sistema solar fotovoltaico – considerando que a geração proveniente dele foi consumida em modo instantâneo, ou seja, sem ser injetada na rede da concessionária e, por isso, não ocasionou tributos a serem pagos sobre o

consumo, estimou-se que o consumo médio mensal foi igual ao consumo mínimo do custo de disponibilidade, sendo designado em 50 kWh, proporcionando a isenção do imposto do ICMS sobre as tarifas.

Quadro 13 – Valor da fatura de energia após a instalação do sistema fotovoltaico.

Descrição	Consumo Médio Mensal (kWh/mês)	Valor da Tarifa com Tributos (R\$)	Valor na Fatura de Energia (R\$)
TE	50	0,30429	15,21
TUSD	50	0,41590	20,80
Bandeira Tarifária (Amarela)	50	0,03294	1,65
CIP	-	-	5,00
Total (R\$)			42,66

Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, notou-se uma diferença monetária, na fatura de energia, em relação ao valor pago antes e depois da instalação do sistema solar fotovoltaico, estando demonstrado abaixo o montante economizado no mês, ano e durante a vida útil dos painéis solares, com base nas tarifas calculadas anteriormente, sendo desconsiderados os possíveis aumentos nos impostos e tributos.

Quadro 14 – Economia adquirida em função do tempo.

	Valor Fatura sem Energia Solar FV	Valor Fatura com Energia Solar FV
R\$	150,06	42,66
Economia Mensal (R\$)	107,40	
Economia Anual (R\$)	1288,80	
Economia Durante a Vida Útil (R\$)	32220,00	

Fonte: Próprio autor.

Observando a estimativa de economia mensal, anual e durante a vida útil dos módulos fotovoltaicos, percebeu-se que houve uma redução significativa no valor pago da fatura de energia, o que acarretaria em uma economia financeira considerável, sendo que mesmo com esse projeto hipotético possuindo um consumo baixo, ou seja, necessitando de um sistema solar de menor proporção, as vantagens

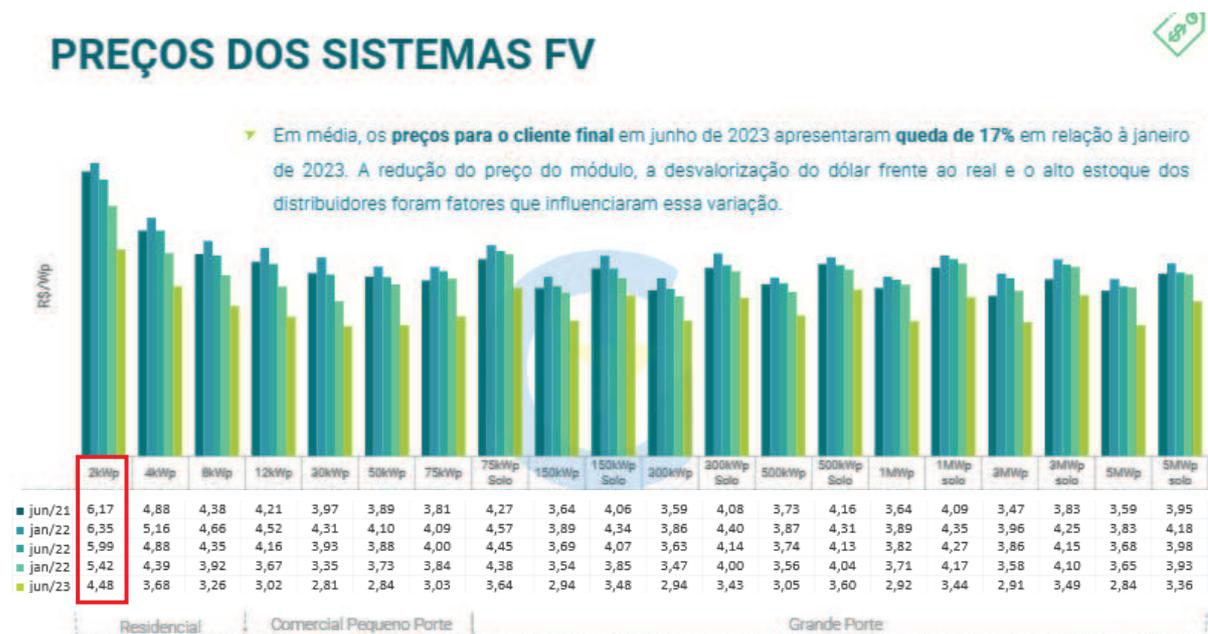
econômicas foram evidentes em função do tempo de funcionamento do sistema fotovoltaico.

4.1.3 Custos Gerais do Sistema Fotovoltaico

Diante da pretensão de se adquirir um sistema solar fotovoltaico, torna-se necessário ter a noção do quantitativo monetário que será investido nesse projeto, sendo obtida mediante à análise da composição do valor total do sistema fotovoltaico. Os custos de um projeto solar são definidos por meio das parcelas referentes ao kit fotovoltaico (módulos, inversor, cabos solares, conectores MC4, estruturas de fixação das placas, etc), aos materiais para a infraestrutura da parte CA e aos serviços de integração correspondentes à instalação e homologação junto à concessionária local.

Por meio da empresa de consultoria do mercado de energia solar fotovoltaica, a GREENER, foi possível obter um valor por Wp instalado referente à um sistema desse tipo, sendo isso viável por meio da realização de um estudo com algumas organizações integradoras que ofertam os serviços supracitados. Com isso, teve-se uma estimativa de custo, com base na potência em kWp, do sistema fotovoltaico proposto, sendo obtido esse valor por meio da figura 41 a seguir.

Figura 41 – Preços dos Sistemas Fotovoltaicos definidos pela GREENER, 2023.



Fonte: GREENER, 2023.

Considerando o projeto hipotético analisado nas seções anteriores deste trabalho, teve-se um valor de kWp igual a 1,1, sendo que a potência que mais se aproxima dele, na referência de valores ilustrados na figura 41, foi a de um sistema de 2 kWp. Com isso, baseando-se no projeto solar de 2 kWp, obteve-se um preço de R\$ 4,48 reais por Wp instalado (ano base de 2023), ocasionando um custo correspondente à R\$ 4928 reais, sendo esse montante referente ao valor total investido no sistema fotovoltaico. Dessa forma, analisando a composição dos valores dos sistemas, notou-se, segundo dados da GREENER, que em torno de 35% a 40% desses são designados aos serviços de integração (instalação e homologação), sendo o restante correlacionado aos materiais, tanto do kit fotovoltaico quanto da parte de infraestrutura CA.

Como na seção 4.1.2 foi estimada a economia obtida mensal, anual e ao longo da vida útil dos módulos fotovoltaicos para o sistema em análise (desconsiderando as possíveis variações nas tarifas e nos tributos), pôde-se obter o *payback* para o mesmo, ou seja, foi possível encontrar a relação, em intervalo de tempo, em que a economia proveniente do projeto solar seria suficiente para recuperar o capital inicial investido para a sua aquisição.

Utilizando-se da expressão abaixo, tornou-se viável a obtenção estimada do *payback*.

$$Payback = \frac{\text{Investimento Inicial (R\$)}}{\text{Ganho no Período (R\$/ano)}} \quad (22)$$

$$\therefore Payback = \frac{4928}{1288,80} \cong 3,82 \text{ anos}$$

4.1.4 Estimativa de Resíduos Gerados com o Sistema Solar

Analisando a ascensão do sistema solar fotovoltaico, com inúmeros novos sistemas sendo instalados cotidianamente, tem-se a questão do descarte desses módulos e inversores ao final de sua vida útil ou em caso de danos, sendo necessária a substituição desses. Apesar da procura por essa fonte de energia limpa ser algo recente, principalmente no Brasil, e, por isso, ainda não ser tão atual a experiência com o descarte desses materiais, empresas como a IRENA estão realizando estudos

para estimar o montante de resíduos que serão gerados futuramente em decorrência do aumento da implementação da energia solar fotovoltaica.

Mesmo ao considerar que 90% dos insumos utilizados na composição dos equipamentos fotovoltaicos são recicláveis e que, devido a isso, a energia solar fotovoltaica se torna a fonte com maior responsabilidade ambiental, tem-se, segundo dados da IRENA (2016), que em torno de 550 mil toneladas de painéis solares deverão ser descartadas no Brasil até o ano de 2050, sendo refletido isso, para o mundo inteiro, em aproximadamente 78 milhões de toneladas referente ao acúmulo de todos os equipamentos fotovoltaicos.

Com base na pesquisa realizada pela GREENER (2023), existem três formas aplicáveis legalmente para o descarte desses equipamentos: aterros sanitários, empresas especializadas em descarte e descarte sustentável, sendo esses dois últimos fins tidos como os mais apropriados. No entanto, a preocupação está relacionada ao descarte inapropriado, o qual corrobora para a emersão de um impacto negativo ao meio ambiente.

Considerando a possibilidade de um desvio no destino correto de descarte dos dispositivos utilizados em um sistema fotovoltaico, tem-se, em alguns países europeus, regulações que preveem a remediação desse risco por meio de medidas que prezam a aplicação da reciclagem dos materiais elétricos e eletrônicos, englobando, assim, os de uso fotovoltaico. Avaliando as decisões tomadas pelo Brasil em relação a isso, percebeu-se que ainda não existem registros da criação de uma legislação que assegure o descarte correto desses equipamentos, no entanto, a Lei 12.305/2010 institui a PNRS (Política Nacional dos Resíduos Sólidos), que estabelece a existência, por parte dos setores públicos e privados, de uma gestão de resíduos sólidos, proporcionando que esses sejam destinados corretamente aos centros de coletas seletivas e aos de reciclagens. (GREENER, 2023).

Observando o *datasheet* do módulo fotovoltaico de 550 W (verificar ANEXO A – *Datasheet* do Módulo Fotovoltaico de 550 W – Honor Solar), notou-se que é atribuído um valor de 26,9 kg para o peso de uma placa solar desse modelo, sendo que, para o sistema em análise das seções anteriores, foram considerados 2 módulos, resultando em um peso equivalente a 53,8 kg. Ao considerar o *datasheet* do inversor solar utilizado (verificar ANEXO B – *Datasheet* do Inversor *String* - Solis), tem-se que o seu peso corresponde a 7,4 kg. Com isso, tornou-se possível calcular o quantitativo

em kg de equipamentos fotovoltaicos que seriam usados no sistema solar em questão, sendo esse igual a 61,2 kg.

Avaliando que o sistema supracitado não tenha uma aplicação tão usual, posto que a sua proporção é relativamente pequena, sendo o seu peso diretamente proporcional a sua dimensão, acredita-se que, do ponto de vista ambiental, o impacto causado por esse sistema, caso fosse realizado o seu descarte inapropriado, seria de pouca relevância. Entretanto, ao se observar inúmeros sistemas fotovoltaicos, cujo tamanho corresponde a centenas de módulos, o prejuízo para o meio ambiente será consideravelmente maior, visto que o descarte inadequado desses equipamentos se enquadrará na ordem de milhares de toneladas, contribuindo para um acúmulo de resíduos inutilizados, sendo esses prejudiciais ao meio ambiente, podendo causar danos irreversíveis à flora e à fauna do planeta Terra.

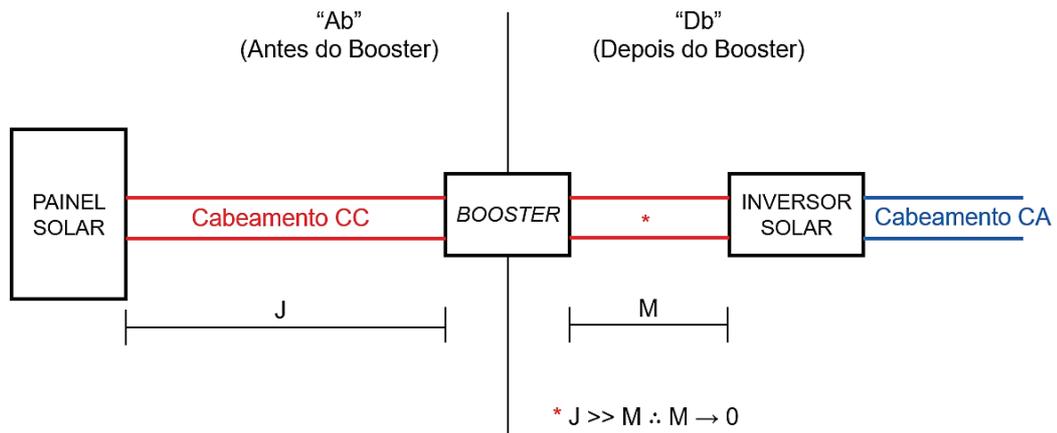
4.2 RECÁLCULO DO SISTEMA SOLAR CONSIDERANDO O CIRCUITO *BOOSTER*

Uma vez finalizado o dimensionamento do sistema solar com os dois módulos fotovoltaicos (vide seção 4.1), para dar seguimento ao processo de análise de viabilidade da utilização de um circuito *booster*, nesta seção os cálculos serão refeitos, sendo considerado apenas um painel e o *booster*, que como já provado durante os testes em laboratório relatados na seção 3.2, é capaz de fornecer o valor de tensão necessário para excitar o inversor solar escolhido.

4.2.1 Cálculo do Novo Rendimento Global

O primeiro passo é a definição do novo valor de rendimento global, considerando o rendimento de 85,40 % do *Step-up* obtido por meio dos testes em laboratório (vide seção 3.2.2.4). A forma com que esse novo valor foi obtido é um pouco diferente da desenvolvida na seção 3.1.3 – uma vez instalado o *booster*, o sistema foi dividido em duas partes, para fins de análise localizada de perdas, denominadas “Ab” (antes do *booster*) e “Db” (depois do *booster*), conforme ilustrado pela figura 42.

Figura 42 – Ilustração da separação do circuito em duas partes.



Fonte: Próprio autor.

Baseando-se na divisão do sistema, foi necessário avaliar quais perdas, originalmente expostas no quadro 1 da seção 3.1.3, estavam relacionadas com cada uma das partes descritas, podendo ser observadas as relações de distribuição nos quadros 15 e 16, estando em seguida, apresentado nos quadros 17 e 18, o rendimento parcial de cada uma delas.

Quadro 15 – Valor Médio das Perdas de “Ab”.

Perdas da parte “Ab”	Faixa Aplicada	Valor Médio
Temperatura	7% a 18%	12,50%
Incompatibilidade Elétrica	0,5% a 1%	0,75%
Cabeamento CC	0,5% a 1%	0,75%
Acúmulo de Sujeira	1% a 8%	4,50%

Fonte: Próprio autor.

Quadro 16 – Valor Médio das Perdas de “Db”.

Perdas da parte “Db”	Faixa Aplicada	Valor Médio
Incompatibilidade Elétrica	0,5% a 1%	0,75%
Cabeamento CA	0,5% a 1%	0,75%
Inversor	2,5% a 5%	3,75%

Fonte: Próprio autor.

Quadro 17 – Valores dos Rendimentos Parciais de “Ab”.

Perda	Cálculo	Rendimento Parcial
Temperatura	$(100\% - 12,5\%) = 1 - 0,1250 = 0,8750$	87,50%
Incompatibilidade Elétrica	$(100\% - 0,75\%) = 1 - 0,0075 = 0,9925$	99,25%
Cabeamento CC	$(100\% - 0,75\%) = 1 - 0,0075 = 0,9925$	99,25%
Acúmulo de Sujeira	$(100\% - 4,50\%) = 1 - 0,0450 = 0,9550$	95,50%

Fonte: Próprio autor.

Quadro 18 – Valores dos Rendimentos Parciais de “Db”.

Perda	Cálculo	Rendimento Parcial
Incompatibilidade Elétrica	$(100\% - 0,75\%) = 1 - 0,0075 = 0,9925$	99,25%
Cabeamento CA	$(100\% - 0,75\%) = 1 - 0,0075 = 0,9925$	99,25%
Inversor	$(100\% - 3,75\%) = 1 - 0,0375 = 0,9625$	96,25%

Fonte: Próprio autor.

Uma vez que as perdas e os rendimentos parciais foram devidamente separados, foi necessário definir um valor de eficiência parcial para cada uma das partes, o qual foi utilizado mais adiante, durante os cálculos de geração do sistema.

Sendo assim, tem-se:

$$\text{Eficiência de "Ab"} = 0,875 \times 0,9925 \times 0,9925 \times 0,955 = 0,8231 \text{ (82,31 \%)} \quad (23)$$

$$\text{Eficiência de "Db"} = 0,9925 \times 0,9925 \times 0,9625 = 0,9481 \text{ (94,81 \%)} \quad (24)$$

Considerando a retirada de um módulo fotovoltaico e, posteriormente, o acoplamento de um circuito *booster* ao sistema em questão, foi possível analisar que o *booster* se tornaria a nova fonte de alimentação do inversor. Com isso, acarretaria para que o valor da eficiência de “Ab” fosse aplicado somente sobre a potência em kWp resultante do outro painel solar, sendo empregado também, após isso, o rendimento do próprio *booster*, o qual foi estabelecido em laboratório como sendo igual a 85,40 %. Dessa forma, o novo rendimento global do sistema, tendo o *booster* como fonte, seria o mesmo valor supracitado da eficiência de “Db”, ficando estabelecido conforme a expressão abaixo.

$$\text{Novo rendimento global} = \text{Eficiência de "Db"} = 0,9481 \text{ (94,81 \%)} \quad (25)$$

4.2.2 Cálculo da Nova Geração Mensal, Anual e Durante a Vida Útil

Em posse do novo rendimento global, se fez necessário calcular os novos valores de geração estimada mensal, anual e total do projeto analisado. É importante notar que ao se remover um dos painéis solares fotovoltaicos de 550 Wp, para a instalação do circuito *booster*, a potência total do sistema foi reduzida pela metade, sofrendo uma alteração de 1,1 kWp para 0,55 kWp. Além disso, levando em consideração o valor de eficiência definido para "Ab" (82,31 %) e a eficiência do próprio *booster* (85,40 %), o novo valor de potência, em kWp, total do sistema foi definido de acordo com o cálculo a seguir.

$$\text{Nova potência total} = (0,55 \text{ kWp} \times 0,8231) \times 0,8540 \cong 0,3866 \text{ kWp} \quad (26)$$

Uma vez obtido o valor da nova potência total, seguiu-se com os cálculos das projeções de geração de energia elétrica do sistema:

- Geração estimada mensal:

Energia Geração mensal (kWh/mês) = Potência Total (kWp) × Tempo exp. médio (h/dia) × Rendimento × 30 {dias}

$$\therefore \text{Energia Geração mensal} = 0,3866 \times 4,64 \times 0,9481 \times 30 \cong 51,02 \text{ (kWh/mês)} \quad (27)$$

- Geração estimada anual:

Energia Geração anual (kWh/ano) = Energia Geração mensal (kWh/mês) × 12 {meses}

$$\therefore \text{Energia Geração anual} = 51,02 \times 12 = 612,24 \text{ (kWh/ano)} \quad (28)$$

- Geração estimada durante a vida útil dos módulos (25 anos):

Energia Geração vida útil (kWh) = Energia Geração anual (kWh/ano) × 25 {anos}

$$\therefore \text{Energia Geração vida útil} = 612,24 \times 25 = 15306 \text{ (kWh)} \cong 15,31 \text{ (MWh)} \quad (29)$$

4.2.3 Dedução do Consumo Médio da Ventoinha

Segundo as especificações técnicas do fabricante do circuito *booster* considerado, quando a corrente do sistema ultrapassa o valor de 6 A, é necessária a utilização de ventilação forçada para resfriar esse componente, sendo que o consumo resultante do elemento resfriador, nesse caso a ventoinha (verificar APÊNDICE B – Características da Ventoinha considerada na análise), deverá ser subtraído dos valores estimados de geração de energia elétrica obtidos na seção 4.2.2, uma vez que parte da energia gerada pelo sistema será utilizada para a alimentação dessa ventoinha.

Sendo assim, com base nas características técnicas da ventoinha em questão, tem-se o consumo da ventoinha em operação em função do tempo:

- Consumo médio mensal da ventoinha:

$$C_{\text{mmed}} \text{ (Wh/mês)} = \text{Potência Ventoinha (W)} \times \text{Tempo exp. médio (h/dia)} \times 30 \text{ {dias}}$$

$$\therefore C_{\text{mmed}} = 0,84 \times 4,64 \times 30 \cong 116,93 \text{ (Wh/mês)} \cong 0,12 \text{ (kWh/mês)} \quad (30)$$

- Consumo médio anual da ventoinha:

$$C_{\text{amed}} \text{ (Wh/ano)} = C_{\text{mmed}} \text{ (Wh/mês)} \times 12 \text{ {meses}}$$

$$\therefore C_{\text{amed}} = 116,93 \times 12 = 1403,16 \text{ (Wh/ano)} \cong 1,40 \text{ (kWh/ano)} \quad (31)$$

- Consumo médio da ventoinha durante a vida útil dos módulos (25 anos):

$$C_{\text{tmed}} (\text{Wh}) = C_{\text{amed}} (\text{Wh/ano}) \times 25 \{\text{anos}\}$$

$$\therefore C_{\text{tmed}} = 1403,16 \times 25 = 35079 (\text{Wh}) \cong 35,08 (\text{kWh}) \quad (32)$$

Das informações contidas na seção 4.2.2 referentes à geração de energia estimada, tem-se:

$$\text{Energia Geração mensal} \cong 51,02 (\text{kWh/mês})$$

$$\text{Energia Geração anual} = 612,24 (\text{kWh/ano})$$

$$\text{Energia Geração vida útil} = 15306 (\text{kWh}) \cong 15,31 (\text{MWh})$$

A partir dos dados acima, os valores estimados de geração a serem considerados foram obtidos a partir de:

$$\text{Energia Geração mensal} = 51,02 - C_{\text{mmed}} = 51,02 - 0,12 = 50,90 (\text{kWh/mês}) \quad (33)$$

$$\text{Energia Geração anual} = 612,24 - C_{\text{amed}} = 612,24 - 1,40 = 610,84 (\text{kWh/ano}) \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{Energia Geração vida útil} &= 15306 - C_{\text{tmed}} = 15306 - 35,08 = 15270,92 (\text{kWh}) \cong \\ &15,27 (\text{MWh}) \end{aligned} \quad (35)$$

4.2.4 Recálculo da Geração Estimada do Sistema Solar Fotovoltaico

Fazendo uso das mesmas expressões demonstradas acima, foi possível obter os novos valores mensais de geração estimada, sendo considerado o tempo de exposição médio de radiação solar para cada um dos meses, semelhante ao que foi realizado na seção 4.1.1. Os resultados dos cálculos podem ser observados no quadro 19.

Quadro 19 – Resultados de geração e de emissão evitada de CO₂ do sistema proposto.

Geração do Sistema Solar Fotovoltaico (0,55 kWp)				
Mês	Tempo de exposição médio (h/dia) - CRESESB	Geração estimada kWh/mês	Fator de emissão médio kgCO₂/kWh (ano 2022)	Quantidade evitada de CO₂ em kg
Janeiro	5,38	59,16	0,5226	30,92
Fevereiro	5,68	62,46	0,4883	30,50
Março	4,83	53,11	0,4060	21,56
Abril	4,41	48,49	0,2159	10,47
Maio	3,58	39,37	0,2803	11,03
Junho	3,33	36,62	0,4404	16,13
Julho	3,45	37,94	0,4186	15,88
Agosto	4,41	48,49	0,4566	22,14
Setembro	4,53	49,81	0,4894	24,38
Outubro	5,07	55,75	0,4670	26,04
Novembro	5,25	57,73	0,4034	23,29
Dezembro	5,78	63,56	0,2937	18,67
Total anual		612,48	-	251,00

Fonte: Próprio autor.

4.2.5 Recálculo do Consumo Médio da Ventoinha para cada mês segundo o Tempo de Exposição Médio

Visto que o tempo de exposição médio de radiação solar, segundo as informações do site do CRESESB, varia conforme o mês, os valores de consumo médio da ventoinha expressos no APÊNDICE B – Características da Ventoinha considerada na análise, também precisam ser ajustados a fim de serem utilizados, posteriormente, para ajustar os resultados do quadro 19. Esse ajuste foi realizado da seguinte maneira – o valor de potência média da ventoinha (0,84 W) foi multiplicado pelo tempo de exposição médio diário de cada um dos meses, obtendo-se o novo consumo médio por dia de cada mês, que quando foi multiplicado pelo número de dias do mês em questão, resultou no consumo médio mensal da ventoinha.

Sendo assim:

- Novo consumo médio diário da ventoinha:

$$NC_{dmed} \text{ (Wh/dia)} = \text{Pot. Média Ventoinha (W)} \times \text{Tempo exp. médio (h/dia)} \quad (36)$$

- Novo consumo médio mensal da ventoinha:

$$NC_{mmed} \text{ (Wh/mês)} = NC_{dmed} \text{ (W/dia)} \times 30 \text{ {dias}} \quad (37)$$

Os resultados dos cálculos podem ser observados no quadro 20.

Quadro 20 – Consumo médio da ventoinha em função do tempo de exposição médio de cada mês.

Mês	Tempo de exposição médio (h/dia) - CRESESB	Potência média da ventoinha (W) - Fabricante	Consumo médio diário da ventoinha (Wh)	Consumo médio mensal da ventoinha (Wh)
Janeiro	5,38	0,84	4,52	135,60
Fevereiro	5,68	0,84	4,77	143,10
Março	4,83	0,84	4,06	121,80
Abril	4,41	0,84	3,70	111,00
Maio	3,58	0,84	3,01	90,30
Junho	3,33	0,84	2,80	84,00
Julho	3,45	0,84	2,90	87,00
Agosto	4,41	0,84	3,70	111,00
Setembro	4,53	0,84	3,81	114,30
Outubro	5,07	0,84	4,26	127,80
Novembro	5,25	0,84	4,41	132,30
Dezembro	5,78	0,84	4,86	145,80

Fonte: Próprio autor.

4.2.6 Dedução dos Valores de Geração Mensal Estimada após a Retirada dos Valores do Consumo Médio Mensal da Ventoinha

A partir dos resultados expressos no quadro 20, foi necessário realizar o ajuste dos valores, similarmente ao que foi realizado na seção 4.2.3, para que o consumo da ventoinha fosse abatido do valor estimado de geração, visto que, conforme já discutido anteriormente, a tensão de alimentação para o seu funcionamento advém do próprio sistema de geração de energia. Dessa vez, o ajuste foi realizado por meio da subtração dos valores dos consumos mensais, descritos no quadro 20, dos valores

estimados de geração expressos no quadro 19. Os resultados podem ser observados no quadro 21.

Quadro 21 – Novos resultados de geração e de emissão evitada de CO₂ do sistema proposto (após a dedução do consumo mensal da ventoinha).

Geração do Sistema Solar Fotovoltaico (0,55 kWp)						
Mês	Tempo de exposição médio (h/dia) - CRESESB	Geração estimada kWh/mês	Consumo médio mensal da ventoinha kWh/mês	Nova geração estimada kWh/mês	Fator de emissão médio kgCO₂/kWh (ano 2022)	Quantidade evitada de CO₂ em kg
Janeiro	5,38	59,16	0,14	59,02	0,5226	30,84
Fevereiro	5,68	62,46	0,14	62,32	0,4883	30,43
Março	4,83	53,11	0,12	52,99	0,4060	21,51
Abril	4,41	48,49	0,11	48,38	0,2159	10,45
Mai	3,58	39,37	0,09	39,28	0,2803	11,01
Junho	3,33	36,62	0,08	36,54	0,4404	16,09
Julho	3,45	37,94	0,09	37,85	0,4186	15,84
Agosto	4,41	48,49	0,11	48,38	0,4566	22,09
Setembro	4,53	49,81	0,11	49,70	0,4894	24,32
Outubro	5,07	55,75	0,13	55,62	0,4670	25,97
Novembro	5,25	57,73	0,13	57,60	0,4034	23,24
Dezembro	5,78	63,56	0,15	63,41	0,2937	18,62
Total anual		612,48	-	611,09	-	250,41

Fonte: Próprio autor.

4.2.7 Recálculo do Valor de cada uma das Tarifas com Tributos em função do Novo Consumo Médio Mensal

Com o novo valor de consumo médio mensal de 100,90 kWh/mês, obteve-se os novos preços atrelados as tarifas diante da quantidade de kWh considerada como consumida no mês, sendo que esses valores foram dispostos no quadro 22. Esse consumo médio mensal foi obtido por meio do somatório entre a geração mensal estimada para o novo sistema proposto – após a retirada do consumo mensal da ventoinha, e o custo de disponibilidade da UC, fazendo-se uso do mesmo raciocínio e considerações utilizados na seção 4.1.2.

Quadro 22 – Novos valores correspondentes de cada tarifa com tributos.

Descrição	Consumo Médio Mensal (kWh/mês)	Valor da Tarifa com Tributos (R\$)	Valor na Fatura de Energia (R\$)
TE	100,90	0,34578	34,89
TUSD	100,90	0,47261	47,69
Bandeira Tarifária (Amarela)	100,90	0,03743	3,78
CIP	-	-	5,00
Total (R\$)			91,36

Fonte: Próprio autor.

4.2.8 Recálculo da Economia do Sistema em função do Novo Consumo Médio Mensal

Em posse do novo valor da fatura de energia definido no item anterior, foi possível aplicá-lo no cálculo da economia tanto mensal quanto anual e total do projeto, similarmente ao que foi realizado na seção 4.1.2. Os resultados obtidos podem ser observados no quadro 23. É importante ressaltar que a modificação da composição do sistema não foi relevante o suficiente para fazer com que os valores do quadro 14 fossem alterados de forma considerável, sendo que a quantia referente ao valor da fatura de energia com o sistema solar fotovoltaico instalado (R\$ 42,66) continuou válido para a definição dos novos valores de economia do sistema modificado, e houve uma redução no consumo médio mensal, o que acarretou para uma diminuição proporcional no valor da fatura de energia sem o sistema solar fotovoltaico.

Quadro 23 – Nova economia adquirida em função do tempo.

	Valor Fatura sem Energia Solar FV	Valor Fatura com Energia Solar FV
R\$	91,36	42,66
Economia Mensal (R\$)	48,70	
Economia Anual (R\$)	584,40	
Economia Durante a Vida Útil (R\$)	14610,00	

Fonte: Próprio autor.

4.2.9 Recálculo do Tempo de *Payback* do Sistema

Por fim, o último passo foi a aplicação do valor da economia anual obtida na fatura de energia com o sistema solar fotovoltaico, visando definir a partir de quanto tempo após a instalação do sistema modificado, o mesmo resultaria em lucro para o proprietário. Considerando que o investimento inicial para esse sistema foi igual ao somatório entre o valor equivalente em Wp instalado para esse sistema, resultando em R\$ 2464 reais com base nos dados da GREENER, e o valor gasto para a aquisição do circuito *booster*, de R\$ 130,00 reais, teve-se um custo inicial de R\$ 2594 reais, acarretando para a obtenção do tempo de retorno do investimento, em anos, abaixo.

$$Payback = \frac{\text{Investimento Inicial (R\$)}}{\text{Ganho no Período (R\$/ano)}} \quad (38)$$

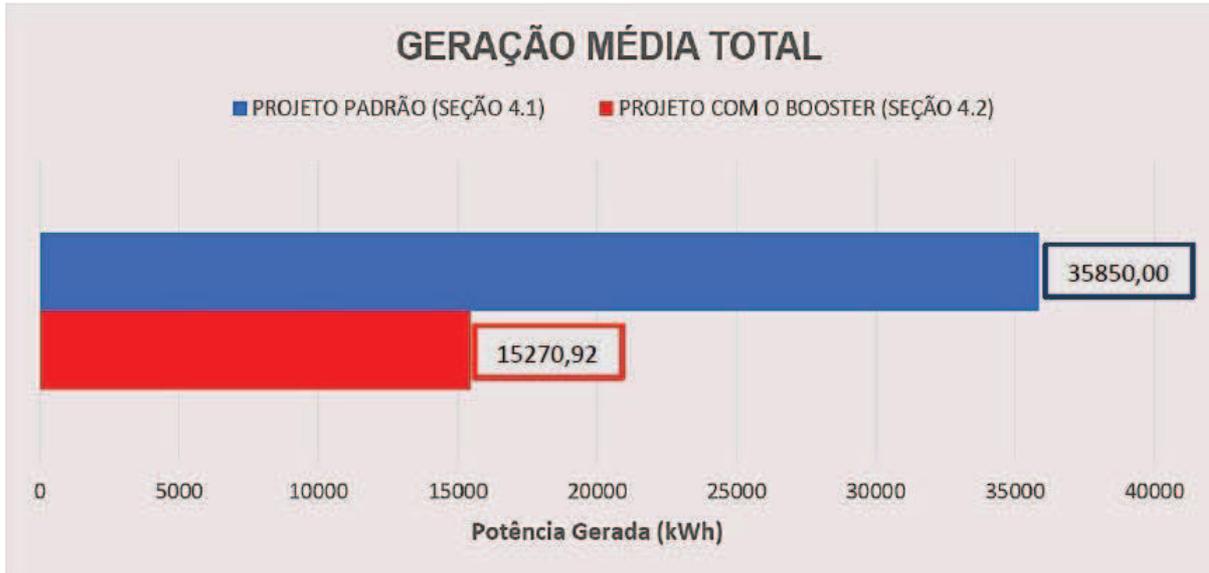
$$\therefore Payback = \frac{2594}{584,40} \cong 4,44 \text{ anos}$$

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROJETOS ELABORADOS

A fim de fornecer as informações necessárias para a conclusão da análise de viabilidade da utilização do circuito *Step-up*, foi necessário a comparação entre os resultados obtidos dos projetos elaborados nas seções 4.1 e 4.2. Os gráficos representados nas figuras 43, 44, 45 e 46 trazem as principais comparações entre os dois projetos, buscando definir se a ideia da utilização de um circuito *booster* acoplado a um sistema solar fotovoltaico é proveitosa ao se considerar uma quantidade menor de painéis solares para o sistema em análise. Nos gráficos abaixo estão expressas as informações comparativas, entre os dois projetos, relacionadas à geração total de energia elétrica, economia, emissão de CO₂ e ao tempo de *payback*.

Nota-se, pelo gráfico da figura 43, que a potência total gerada ao longo da vida útil estimada para os projetos (25 anos), foi reduzida de 35850 kWh para 15270,92 kWh, tendo uma redução de 20579,08 kWh, ou seja, de aproximadamente 20,58 MWh, ao se substituir um dos painéis solares pelo circuito *booster* em questão.

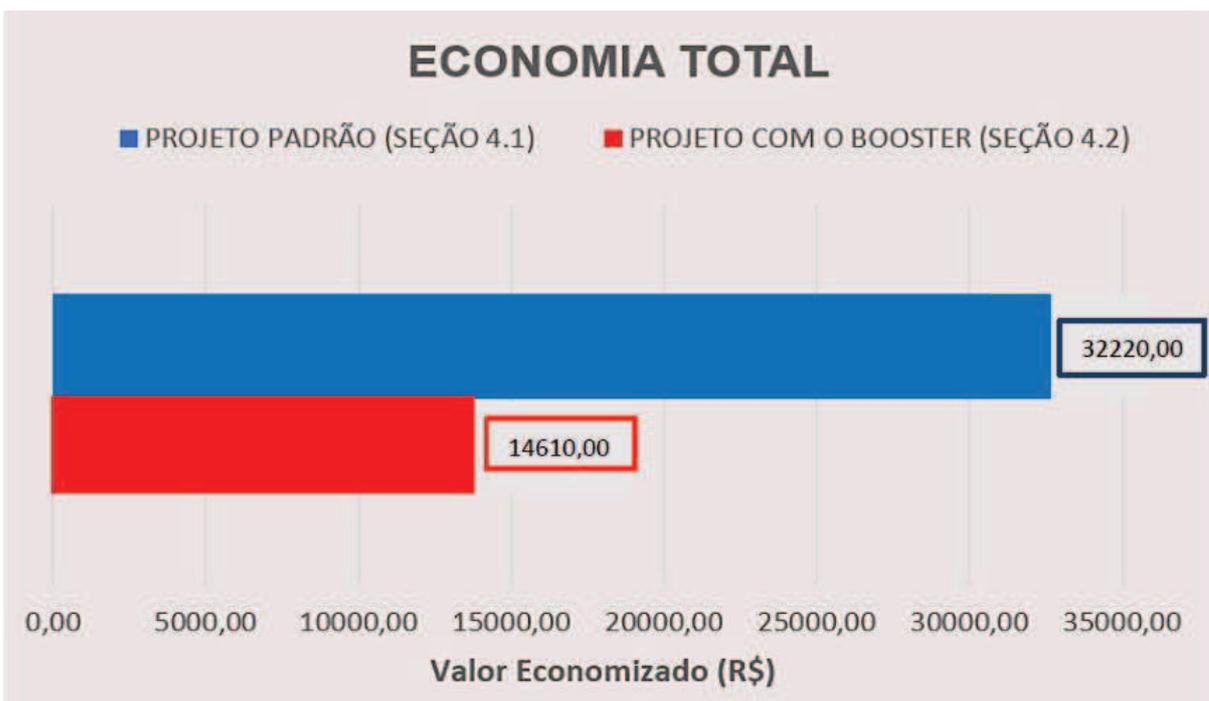
Figura 43 – Gráfico de comparação da geração média total ao longo da vida útil de ambos os projetos.



Fonte: Próprio autor.

Analisando o gráfico da figura 44 é possível observar um declínio no valor total, em R\$, da economia durante a vida útil estimada para os projetos, sendo que o valor constatado apresentou uma queda de R\$ 17610,00 reais, visto que, após o emprego do *booster*, o montante foi de R\$ 32220,00 reais para R\$ 14610,00 reais.

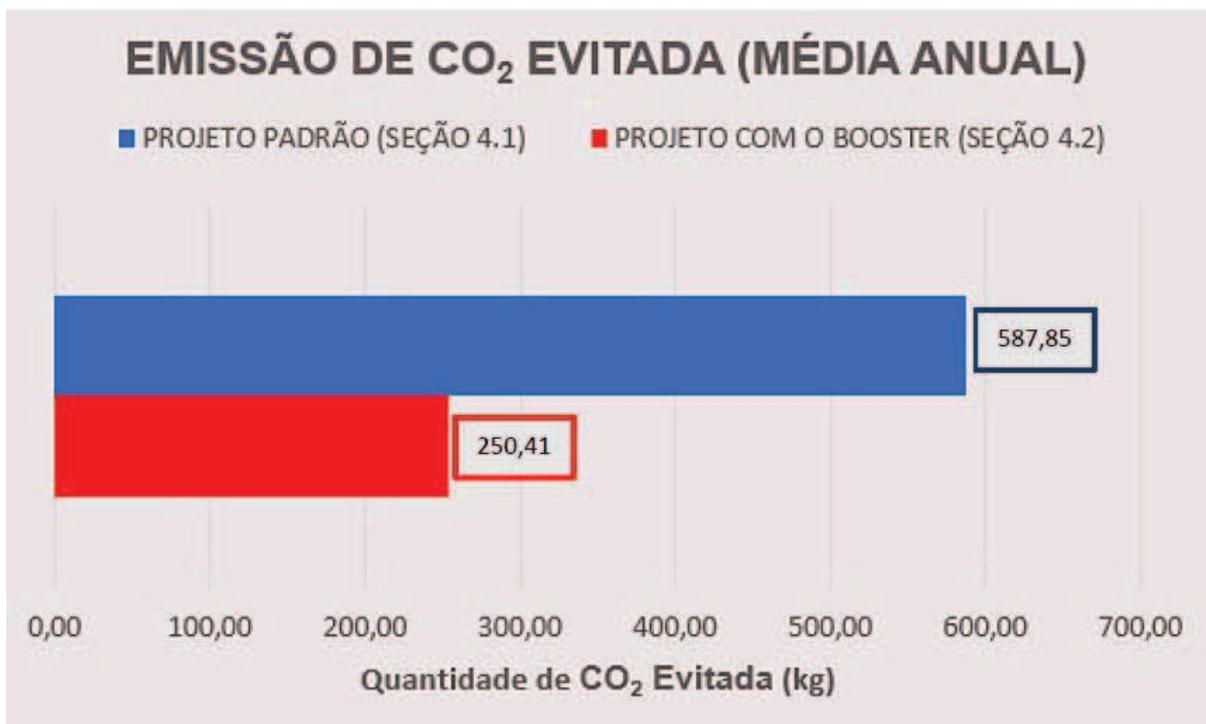
Figura 44 - Gráfico de comparação da economia total (ao longo da vida útil) de ambos os projetos.



Fonte: Próprio autor.

Tendo em vista as informações contidas no gráfico da figura 45, percebe-se que a emissão anual de CO₂ evitada na atmosfera, após a inclusão do circuito *Step-up* no projeto do sistema fotovoltaico, foi de, aproximadamente, 2,35 vezes menor do que a quantidade evitada no primeiro sistema apresentado, sendo que no sistema inicial foi apresentada uma quantia de 587,85 kg de CO₂ evitada, e no segundo sistema proposto esse valor foi de 250,41 kg.

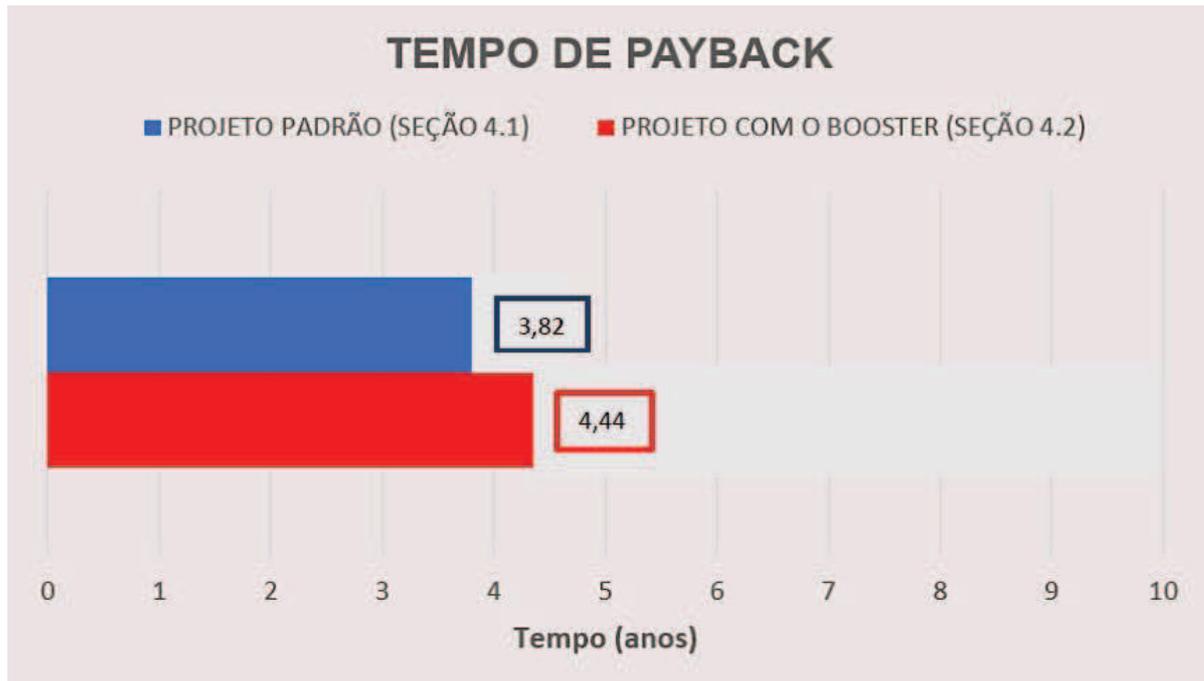
Figura 45 - Gráfico de comparação da média anual de emissão de CO₂ evitada de ambos os projetos.



Fonte: Próprio autor.

Por meio do gráfico da figura 46, é possível analisar que o tempo necessário para que o segundo sistema solar proposto – o qual utiliza o circuito *booster*, comece a dar lucro para o proprietário, é de, aproximadamente, 1,16 vezes maior do que o tempo calculado para o sistema padrão (primeiro sistema apresentado), sendo constatado um aumento em torno de 7 meses no tempo de *payback* ao se considerar a retirada de um módulo fotovoltaico e a implementação do componente *booster*, alterando de 3,82 anos para 4,44 anos.

Figura 46 - Gráfico de comparação do tempo de *payback* de ambos os projetos.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Mediante às análises comparativas feitas na seção 4.3 entre os dois projetos dimensionados nas seções 4.1 e 4.2, que tiveram como base de elaboração os conceitos abordados previamente na seção 2 – “Revisão Bibliográfica”, e os resultados e procedimentos descritos na seção 3 – “Metodologia”, foi possível extrair que o acoplamento de um circuito conversor *DC-DC* do tipo *booster* em um sistema solar possui pontos negativos altamente relevantes. Esses pontos estão relacionados à eficiência, economia e sustentabilidade, sendo esses, normalmente, tidos como os aspectos positivos perante à utilização de um circuito *booster*.

Analisando a geração de energia elétrica dos dois projetos, observou-se que a geração estimada, durante a vida útil dos módulos, para o novo sistema fotovoltaico, ao se fazer uso do circuito *booster*, apresentou uma perda de mais de 40 % em relação ao projeto anterior, no qual foi considerada a quantidade máxima suportada de painéis solares, sem o uso desse conversor *DC-DC* acoplado nesse sistema em questão. Com isso, percebeu-se que ao sistema solar em que houve a implementação do *booster* e que teve a sua quantidade de módulos fotovoltaicos reduzida, atribuiu-se a classificação de “ineficaz” ao se comparar a eficiência obtida nos dois sistemas.

Referindo-se a economia adquirida com os sistemas em análise, teve-se um resultado desfavorável para o novo sistema proposto, posto que a baixa eficiência observada em suas projeções, implicaram em uma perda significativa na sua economia total – durante a vida útil, em comparação ao que se obteve no primeiro sistema apresentado, sendo a economia diretamente proporcional à eficiência. Dessa forma, considerou-se que as modificações feitas no projeto inicial, tornaram o novo projeto inadequado ao se equiparar a economia proveniente desses, constatando-se, também, um aumento de aproximadamente 16 % no tempo de *payback* obtido para o novo sistema proposto, tornando-o precário em termos de obtenção do retorno do investimento realizado para a aquisição de um sistema desse tipo.

Em termos de sustentabilidade dos sistemas, mesmo que o montante final de resíduos gerados pelo projeto seja menor com a utilização do *Step-up* e com a diminuição na quantidade de módulos fotovoltaicos – sendo essa última colocação a causa resultante da redução no quantitativo em kg dos materiais descartados ao final de sua vida útil, tem-se que a quantidade de CO₂ evitada, em função da geração de energia elétrica por meio de um sistema fotovoltaico, teve o seu valor reduzido em

mais da metade ao ser comparado com o valor obtido para o projeto inicial analisado. Com isso, observando o quesito de sustentabilidade, percebe-se que a aplicação do novo sistema apresentado não é recomendada para o intuito de sustentabilidade em questão, uma vez que ao se diminuir a quantidade de resíduos que serão proporcionados por esse sistema, quando se considerar uma quantidade menor de painéis solares, reduz também a geração do sistema, a qual está proporcionalmente relacionada à quantidade de CO₂, em kg, evitada na atmosfera, que, por sua vez, está atrelada à sustentabilidade.

Por fim, uma vez que o principal objetivo de realizar um dimensionamento adequado de um projeto de energia solar fotovoltaica para a geração de energia elétrica, é assegurar que o sistema seja, dentro do possível, o mais eficiente, econômico e sustentável, conclui-se, neste trabalho, a inviabilidade da utilização de um conversor *DC-DC* de topologia *booster* no projeto considerado em questão. Essa conclusão se deu mediante aos resultados expressos por meio dos cálculos e análises desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Aneel: Matriz elétrica brasileira cresce mais de 1,2 GW em agosto.** São Paulo, SP. 18 set. 2023. Disponível em:

<https://www.absolar.org.br/noticia/aneel-matriz-eletrica-brasileira-cresce-mais-de-12-gw-em-agosto/>. Acesso em: 25 set. 2023.

ABSOLAR. **Energia solar responde por 15% da matriz elétrica brasileira.** São Paulo, SP. 07 set. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-responde-por-15-da-matriz-eletrica-brasileira/>. Acesso em: 25 set. 2023.

ABSOLAR. **Geração solar centralizada ultrapassa 5% da matriz elétrica brasileira.** São Paulo, SP. 12 set. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-solar-centralizada-ultrapassa-5-da-matriz-eletrica-brasileira/>. Acesso em: 25 set. 2023.

AKIO TV. **MPPT explained (AKIO TV).** 07 dez. 2021. 1 vídeo (05:11 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9dNukdwBfoQ>. Acesso em: 22 out. 2023.

ALDO SOLAR. **Inversor Solar Off Grid.** Disponível em: <https://www.aldo.com.br/categoria/energia-solar/produtos/inversor-solar/inversor-solar-off-grid>. Acesso: 14 out. 2023.

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída.** 29 ago. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida#:~:text=Denomina%2Dse%20microgera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADda%20a,do%20Par%C3%A1grafo%20%C3%9Anico%20do%20art.> Acesso em: 10 out. 2023.

ANEEL. **Primeiro semestre de 2023 tem crescimento de 5,1 GW na matriz elétrica brasileira.** 05 jul. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/primeiro-semester-de-2023-tem-crescimento-de-5-1-gw-na-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 09 out. 2023.

BLUE SOL. **Origem da Energia Solar: uma Breve História do Sol como Fonte Energética do Mundo.** 10 ago. 2023. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/origem-da-energia-solar/>. Acesso em: 13 set. 2023.

BV INSPIRA. **Qual é a durabilidade do painel solar? Veja 5 dicas para cuidar dele!.** Disponível em: <https://www.bv.com.br/bv-inspira/financiamento-para-energia-solar/durabilidade-painel-solar#:~:text=Indo%20direto%20ao%20ponto%2C%20a,pode%20ultrapassar%20os%2040%20anos.> Acesso em: 22 out. 2023.

CANAL ENERGIA. **Entenda os inversores com múltiplos MPPT.** 14 jul. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/inversores-com-multiplos-mppt/>. Acesso em: 12 out. 2023.

CANAL ENERGIA. **Solar passa eólica e é segunda maior fonte no Brasil.** 03 jan. 2023. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53234514/energia-solar-se-torna-a-segunda-maior-fonte-na-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 25 set. 2023.

CANAL SOLAR. **63 anos do lançamento do primeiro satélite alimentado por energia solar.** 16 mar. 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/63-anos-do-lancamento-do-primeiro-satelite-alimentado-por-energia-solar/>. Acesso em: 25 set. 2023.

CASARIN, R. Conheça os incentivos fiscais para energia solar no Brasil. **PORTAL SOLAR.** 04 set. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/geracao-distribuida/conheca-os-incentivos-fiscais-para-energia-solar-no-brasil>. Acesso em: 02 out. 2023.

CASARIN, R. Matriz elétrica brasileira ganha 5,63 GW nos primeiros sete meses de 2023. **PORTAL SOLAR.** 11 ago. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/oem/matriz-eletrica-brasileira-ganha-5-63-gw-nos-primeiros-sete-meses-de-2023>. Acesso em: 09 out. 2023.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0.** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 23 out. 2023.

DEL PUPPO, F. I.; FRANK, T. W. 7 Passos Fáceis para Dimensionar um Projeto Fotovoltaico do Grupo B. **FOTUS.** 25 nov. 2021. Disponível em: <https://fotus.com.br/blog/7-passos-faceis-para-dimensionar-um-projeto-fotovoltaico-do-grupo-b/>. Acesso em: 23 out. 2023.

DINÂMICA AMBIENTAL. **Quais são as melhores fontes de energia limpa?** Disponível em: <https://dinamicambiental.com.br/blog/meio-ambiente/quais-sao-as-melhores-fontes-de-energia-limpa/#:~:text=Energia%20solar,em%20energia%20est%C3%A1%20em%20alta>. Acesso em: 23 set. 2023.

ECORI ENERGIA SOLAR. **Diodo de Bypass - Efeitos em condições de sombreamento.** 15 maio 2018. 1 vídeo (12:19 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=d8N70Rryn1k>. Acesso em: 22 out. 2023.

EDP. **ICMS, PIS e COFINS.** Disponível em: <https://www.edp.com.br/icms-pis-e-cofins/>. Acesso em: 23 out. 2023.

EDP. **Tarifas vigentes.** Disponível em: <https://www.edp.com.br/tarifas-vigentes/>. Acesso em: 23 out. 2023.

ENERGÊS. **Desmistificando as Fontes de Energia.** 02 jun. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/fontes-de-energia/>. Acesso em: 25 set. 2023.

ENERGÊS. **Diferença entre Matriz Energética e Matriz Elétrica.** 12 jan. 2021. Disponível em: <https://energes.com.br/diferenca-entre-matriz-energetica-e-eletrica/>. Acesso em: 25 set. 2023.

ENERGÊS. **Entendendo a Fatura de Energia – 3.** 23 jun. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/entendendo-a-fatura-de-energia-3/#:~:text=Por%20exemplo%3A%20Suponha%20o%20custo,25%20%3D%20R%24125%2C00>. Acesso em: 23 out. 2023.

ENERGÊS. **História da Energia Solar.** 05 maio 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/historia-da-energia-solar/>. Acesso em: 11 set. 2023.

ENERGÊS. **Novos Limites de Potência Instalada nos Sistemas de Energia Solar.** 11 out. 2022. Disponível em: <https://energes.com.br/limite-de-potencia/>. Acesso em: 10 out. 2023.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 23 set. 2023.

ESFERA ENERGIA. **Conheça Exemplos Das Principais Fontes De Energia Limpa.** 14 out. 2022. Disponível em: <https://blog.esferaenergia.com.br/fontes-de-energia/energia-limpa>. Acesso em: 11 set. 2023.

ESFERA ENERGIA. **MMGD: o que é micro e minigeração distribuída?.** 14 out. 2022. Disponível em: <https://blog.esferaenergia.com.br/geracao-distribuida/mmgd>. Acesso em: 16 out. 2023.

EVS ENERGY. **Qual a diferença entre um sistema OFF GRID e ON GRID?.** Disponível em: <https://www.evs.eng.br/noticias/qual-a-diferenca-entre-um-sistema-off-grid-e-on-grid/>. Acesso em: 12 out. 2023.

E4 ENERGIAS RENOVÁVEIS. **O que é MPPT no INVERSOR SOLAR e PARA QUE SERVE!.** 18 set. 2022. 1 vídeo (07:57 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9i0me2kX8mU>. Acesso em: 22 out. 2023.

FEITOSA NETO, A. S. Resolução Normativa ANEEL Nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. **ANEEL.** Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 16 out. 2023.

FEITOSA NETO, A. S. Resolução Normativa ANEEL Nº 1059 DE 07/02/2023. **LEGIS WEB.** 10 fev. 2023. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=442297>. Acesso em: 16 out. 2023.

FOTUS. **O Módulo Fotovoltaico.** 30 jul. 2021. Disponível em: <https://fotus.com.br/blog/o-modulo-fotovoltaico/>. Acesso em: 02 out. 2023.

FOTUS. **7 Passos Fáceis para Dimensionar um Projeto Fotovoltaico do Grupo B.** 25 nov. 2021. Disponível em: <https://fotus.com.br/blog/7-passos-faceis-para-dimensionar-um-projeto-fotovoltaico-do-grupo-b/>. Acesso em: 24 out. 2023.

GREEN YELLOW. **Matriz elétrica x matriz energética: conheça as diferenças!**. 28 mar. 2023. Disponível em: <https://blog.greenyellow.com.br/matriz-eletrica/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20matriz%20el%C3%A9trica,usinas%20at%C3%A9%20os%20consumidores%20finais>. Acesso em: 25 set. 2023.

GUSE, R. Como funciona um conversor de tensão DC-DC? **MAKER HERO**. 10 jan. 2022. Disponível em: <https://www.makehero.com/blog/como-funciona-um-conversor-de-tensao-dc-dc/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20um%20conversor,cont%C3%ADua%20com%20outra%20amplitude%20diferente>. Acesso em: 27 ago. 2023.

HARDWARE LIVRE. **Conversor DC DC: tudo o que você precisa saber sobre isso**. Disponível em: <https://www.hwlibre.com/pt/conversor-dc-dc/>. Acesso em: 27 ago. 2023.

HEIN, H. Resoluções 482 e 687 ainda são válidas após a regulamentação da 14.300?. **CANAL SOLAR**. 14 fev. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/resolucoes-482-e-687-ainda-sao-validas-apos-a-regulamentacao-da-14-300/>. Acesso em: 10 out. 2023.

HOLU ENERGIA SOLAR. **Inversor Solar – O que é e como funciona?**. 23 mar. 2021. 1 vídeo (03:35 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=E7m5HeOzoJw>. Acesso em: 12 out. 2023.

INTELBRAS. **Aplicações da energia solar fotovoltaica**. 01 set. 2020. Disponível em: <https://blog.intelbras.com.br/aplicacoes-da-energia-solar-fotovoltaica/#:~:text=A%20energia%20solar%20pode%20ser,ordena%20e%20resfriamento%20do%20leite>. Acesso em: 22 out. 2023.

KINSOL. **Descarte de painéis solares: entenda como funciona**. Disponível em: <https://kinsol.com.br/2023/06/28/descarte-de-paineis-solares-entenda-como-funciona>. Acesso em: 11 set. 2023.

LESICS. **Inversores, como funcionam?**. 20 out. 2017. 1 vídeo (06:55 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qVeERT4nyz8>. Acesso em: 12 out. 2023.

LUMINOUS INDIA. **What is a Solar Inverter and How Does it Work | Luminous**. 21 maio 2020. 1 vídeo (03:27 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=J WE3snTMSs>. Acesso em: 12 out. 2023.

MARINGÁ SOLAR. **A origem da Energia Solar: conheça a história dessa tecnologia**. Disponível em: <https://maringasolar.com/2022/12/02/a-origem-da-energia-solar/>. Acesso em: 11 set. 2023.

MME. **Matriz elétrica brasileira apresenta expansão de 2.746 MW no primeiro trimestre de 2023**. 06 abr. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/matriz-eletrica-brasileira-apresenta-expansao-de-2-746-mw-no-primeiro-trimestre-de-2023>. Acesso em: 25 set. 2023.

MOREIRA, S. H. Diodos de bypass e de bloqueio nos sistemas de energia solar fotovoltaica. **CANAL SOLAR**. 08 set. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/diodos-de-bypass-e-de-bloqueio-nos-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 22 out. 2023.

NEOSOLAR. **Diferença Micro Inversor e Inversor String | NEOSOLAR**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/microinversor/diferenca-micro-inversor-inversor-string>. Acesso em: 12 out. 2023.

NERIS, A. Como fazer o cálculo do sistema fotovoltaico com eficiência?. **ALDO.BLOG**. 27 jul. 2021. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/como-fazer-o-calculo-do-sistema-fotovoltaico-com-eficiencia/>. Acesso em: 23 out. 2023.

NERIS, A. Entenda o que é eficiência de um painel solar. **ALDO.BLOG**. 09 abr. 2021. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/entenda-o-que-e-eficiencia-de-um-painel-solar/>. Acesso em: 22 out. 2023.

NERIS, A. Entenda o que é MPPT e sua importância. **ALDO.BLOG**. 13 ago. 2021. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/o-que-e-mppt-e-sua-importancia/>. Acesso: 22 out. 2023.

NERIS, A. Sujeira no módulo pode gerar perda de receita de até R\$ 40 bi. **ALDO.BLOG**. 27 jan. 2023. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/sujeira-no-modulo/>. Acesso: 22 out. 2023.

NÓBREGA, P. A. Resolução Normativa ANEEL N° 1.000, de 7 de dezembro de 2021(*). **ANEEL**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 16 out. 2023.

NORONHA, A. M. O que é impedância elétrica? **ROMAGNOLE**. 04 mar. 2022. Disponível em: <https://www.romagnole.com.br/noticias/o-que-e-impedancia-eletrica/#:~:text=Imped%C3%A2ncia%20el%C3%A9trica%20%C3%A9%20a%20medida,percorre%E2%80%9D%20em%20cada%20elemento%20qu%C3%ADmico>. Acesso em: 28 ago. 2023.

OCA ENERGIA. **Entenda as diversas aplicações práticas da Energia Solar no mundo**. 03 mar. 2021. Disponível em: <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/entenda-as-diversas-aplicacoes-praticas-da-energia-solar-no-mundo/>. Acesso: 22 out. 2023.

OCA ENERGIA. **Sistema Fotovoltaico Híbrido: Entenda o Que é e Suas Aplicações**. 28 abr. 2021. Disponível em: <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/>. Acesso: 15 out. 2023.

OPUS SOLAR. **Como surgiu a energia solar?**. Disponível em: <https://opusolar.com.br/como-surgiu-a-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 11 set. 2023.

PLANAS, O. Lei da conservação de energia: exemplos e afirmação. **ENERGIA NUCLEAR**. 18 set. 2023. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/energia/lei-de-conservacao-de-energia>. Acesso em: 27 ago. 2023.

PORTAL SOLAR. **ANEEL | Energia Solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/aneel-energia-solar>. Acesso em: 16 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Efeito Fotoelétrico x Efeito Fotovoltaico: Quais as diferenças?**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/efeito-fotoeletrico-efeito-fotovoltaico>. Acesso em: 13 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Folha de dados do painel solar: o que você precisa saber**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/folha-de-dados-do-painel-solar-o-que-voce-precisa-saber.html>. Acesso em: 23 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Inversor Grid Tie: o que é e como funciona**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/inversor-grid-tie.html>. Acesso: 15 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Inversor Híbrido Solar: O que é e como funciona?**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/inversor-solar-hibrido>. Acesso em: 13 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Matriz energética brasileira e matriz elétrica brasileira**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/matriz-energetica-brasileira-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 25 set. 2023.

PORTAL SOLAR. **Microgeração de Energia Solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/microgeracao-de-energia-solar.html>. Acesso em: 10 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Micro inversor solar grid tie: o que é e para que serve?**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/micro-inversor-solar-grid-tie.html>. Acesso em: 12 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Painel solar: o que é, como funciona e tipos**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar>. Acesso em: 02 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Quanto tempo duram os painéis solares?**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/quanto-tempo-duram-os-paineis-solares>. Acesso em: 22 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Quem Criou a Energia Solar? História da Energia Solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>. Acesso em: 13 set. 2023.

PORTAL SOLAR. **Tudo sobre a Eficiência do Painel Solar**. 04 jan. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-painel-solar.html>. Acesso em: 16 out. 2023.

PORTAL SOLAR. **Valor da energia solar: quanto custa para instalar energia solar?**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-para-instalar-energia-solar.html>. Acesso em: 23 out. 2023.

SANTANA, L. Resolução 482 da ANEEL: 3 Principais Pontos Comentados. **BLUE SOL**. 07 ago. 2020. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/resolucao-482-da-aneel-guia-completo/>. Acesso em: 16 out. 2023.

SERMARINI, C. A. Painéis fotovoltaicos – tecnologias existentes. **REVOLU SOLAR**. 25 jun. 2021. Disponível em: <https://revolusolar.org.br/paineis-fotovoltaicos-tecnologias-existentis/>. Acesso em: 03 out. 2023.

SOLAR INOVE. **Qual a Função do Diodo Bypass?**. Disponível em: <https://blog.solarinove.com.br/qual-a-funcao-do-diodo-bypass/>. Acesso em: 22 out. 2023.

SOLAR POWER. **Inversor solar: o que é e quais são os principais tipos?**. 30 mar. 2022. Disponível em: <https://blog.solarpowerenergy.com.br/inversor-solar/>. Acesso: 14 out. 2023.

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA. **Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia**. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0191>. Acesso em: 13 set. 2023.

TECH SIMULATOR. **Explicação do diodo de bypass no painel solar**. 28 set. 2019. 1 vídeo (03:22 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZAZSkZgVROI>. Acesso em: 22 out. 2023.

THE ORGANIC CHEMISTRY TUTOR. **Boost Converters - DC to DC Step Up Voltage Circuits**. 01 dez. 2019. 1 vídeo (10:04 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9QM55r5fnUk>. Acesso em: 27 ago. 2023.

THE ORGANIC CHEMISTRY TUTOR. **Buck Converter**. 20 jun. 2020. 1 vídeo (11:40 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=rfChSvb8FX0>. Acesso em: 10 set. 2023.

VILLALVA, M. Conhecendo o inversor solar fotovoltaico por dentro. **CANAL SOLAR**. 11 fev. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/conhecendo-o-inversor-solar-fotovoltaico-por-dentro/>. Acesso em: 13 out. 2023.

VILLALVA, M. Entendendo as curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos. **CANAL SOLAR**. 10 mar. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 12 out. 2023.

VILLALVA, M. O que é um inversor solar híbrido?. **CANAL SOLAR**. 01 mar. 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/o-que-e-um-inversor-solar-hibrido/>. Acesso em: 15 out. 2023.

3RAB GEEKS. **7.3 - MPPT**. 29 nov. 2013. 1 vídeo (21:16 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0ltjKs7aJFM>. Acesso em: 22 out. 2023.

ANEXO A – Datasheet do Módulo Fotovoltaico de 550 W – Honor Solar



Honor Solar

HY-M10/144 HY-M10/144H

Monocrystalline Module

530-550W

Cell Type



10BB(182mm)



550W
Maximum Power Output

21.3%
Maximum Module Efficiency

0~±5%
Power Output Guarantee



Ideal choice for large scale ground installation



Selected encapsulating material and stringent production process control ensure the product is highly PID resistant and snail trails free



Special cutting and soldering technology leads to low hotspot risk



Sand blowing test, salt mist test and ammonia test passed to endure harsh environments



Optimized system performance due to module level current sorting

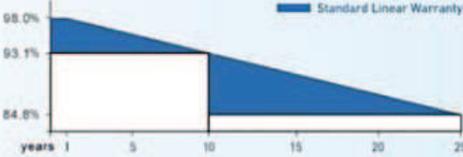


Highly transparent self-cleaning glass brings additional yield and easy maintenance

Delivers Reliable Performance Over Time

- manufacturer of crystalline silicon photovoltaic modules
- Fully automatic facility and world-class technology
- Rigorous quality control to meet the highest standard: ISO9001:2015, ISO14001:2015 and OHSAS: 18001:2007
- Tested for harsh environments (salt mist, ammonia corrosion and sand blowing test: IEC 61701, IEC 62716, DIN EN 60068-2-68)
- Long term reliability tests
- 2×100% EL inspection ensuring defect-free modules

Linear Performance Warranty



12 Years Product Warranty | 25 Years Linear Power Warranty

* Please refer to standard warranty for details

Product certification






HONOR SOLAR TECHNOLOGY (CHANGZHOU) CO., LTD.

Specifications are subject to change without further notification

Web : www.honorsolar.cn
Email : sales@honorsolar.cn

CN-HY-M12/120/6-2021-V1.0

REATE THE FUTURE

©Copyright 2021 HONOR-SOLAR

HY-M10/144 HY-M10/144H

Monocrystalline Module

530-550W

Electrical Specification (STC*)

Maximum Power	Pmax(W)	530	535	540	545	550
Maximum Power Voltage	Vmp(V)	40.74	40.88	41.01	41.15	41.28
Maximum Power Current	Imp(A)	13.01	13.09	13.17	13.24	13.32
Open Circuit Voltage	Voc(V)	49.26	49.40	49.53	49.67	49.80
Short Circuit Current	Isc(A)	13.69	13.77	13.85	13.93	14.01
Module Efficiency	(%)	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3
Power Output Tolerance	(W)			±5%		
Open Circuit Voltage	(V)			±3%		
Short Circuit Current	(A)			±4%		

* Irradiance 1000W/m², Module Temperature 25°C, Air Mass 1.5

Electrical Specification (NOCT*)

Maximum Power	Pmax (W)	394	398	402	406	410
Maximum Power Voltage	Vmp (V)	37.92	38.05	38.19	38.32	38.46
Maximum Power Current	Imp (A)	10.40	10.46	10.52	10.58	10.64
Open Circuit Voltage	Voc(V)	46.50	46.63	46.75	46.88	47.00
Short Circuit Current	Isc (A)	11.06	11.12	11.19	11.25	11.32

* Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s

Mechanical Data

Number of Cells	144 Cells (6×24)
Dimensions of Module L*W*H (mm)	2278×1134×30mm (89.68×44.64×1.18 inches)
Weight (kg)	26.9 kg
Glass	High transparency solar glass 3.2mm (0.13 inches)
Backsheet	White
Frame	Silver, anodized aluminium alloy
J-Box	IP68 Rated
Cable	4.0mm ² (0.006 inches ²), 2300mm (90.5 inches)
Number of diodes	3
Wind/Snow Load	2400Pa/ 5400Pa*
Connector	MC Compatible

* For more details please check the installation manual

Temperature Ratings

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	44±2°C
Temperature Coefficient of Isc	+0.048%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.270%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.350%/°C

Maximum Ratings

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (HL)
Max Series Fuse Rating	25A

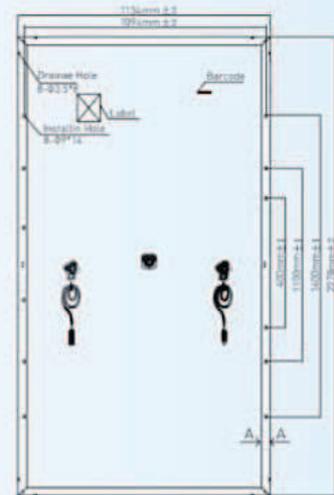
Packaging Configuration

Module per box	36 pieces
Module per 40' container	720 pieces

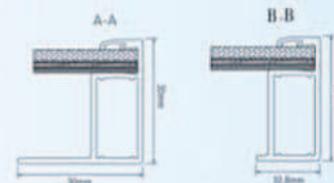
Optional

Connector	<input checked="" type="checkbox"/> MC Original
-----------	---

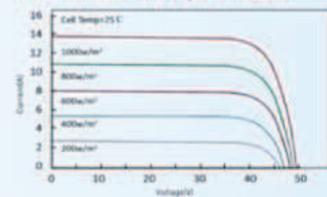
Module Dimension



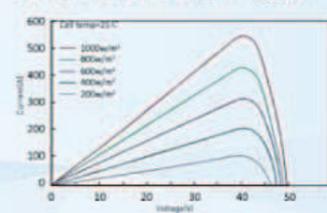
Back View



I-V Curve at Different Temperature (530W)



I-V/P-V Curve at Different Irradiation (530W)



ANEXO B – Datasheet do Inversor String - Solis



S6-GR1P(0.7-3.6)K-M

Inversores Solis Mini



360 graus

Características:

- ▶ Eficiência máxima de 97,3%
- ▶ Corrente da string até **14A**
- ▶ Tecnologia de comutação de alta frequência
- ▶ Ampla faixa de tensão e baixa tensão de inicialização
- ▶ Algoritmo MPPT preciso
- ▶ Gerenciador de Potência Exportada (EPM) integrado
- ▶ Compacto e leve
- ▶ Conexão amigável e adaptável à rede elétrica



Modelo:

S6-GR1P0.7K-M	S6-GR1P1K-M
S6-GR1P1.5K-M	S6-GR1P2K-M
S6-GR1P2.5K-M	S6-GR1P3K-M
S6-GR1P3.6K-M	



Folha de Dados

Modelo	SE-GR1P0,7K-M	SE-GR1P1,1K-M	SE-GR1P1,5K-M	SE-GR1P2K-M	SE-GR1P2,5K-M	SE-GR1P3K-M	SE-GR1P3,6K-M
Entrada CC							
Potência máxima de entrada recomendada	1.19 kW	1.7 kW	2.55 kW	3.4 kW	4.25 kW	5.1 kW	6.12 kW
Tensão máx de entrada	600 V						
Tensão nominal	200 V			330 V			
Tensão de partida	60 V			90 V			
Intervalo de tensão MPPT	50-500 V			80-500 V			
Corrente máx de entrada	14 A						19 A
Corrente máx de curto-circuito	22 A						30 A
MPPTs / Número de Entradas	1/1						1/2
Saída CA							
Potência nominal de saída	0.7 kW	1 kW	1.5 kW	2 kW	2.5 kW	3 kW	3.6 kW
Potência máx de saída aparente	0.8 kVA	1.1 kVA	1.7 kVA	2.2 kVA	2.8 kVA	3.3 kVA	3.6 kVA
Potência máx de saída	0.8 kW	1.1 kW	1.7 kW	2.2 kW	2.8 kW	3.3 kW	3.6 kW
Tensão nominal da rede	1/N/PE, 220 V / 230 V						
Frequência nominal da rede	50 Hz / 60 Hz						
Corrente nominal de saída da rede	3.2 A / 3.0 A	4.5 A / 4.3 A	6.8 A / 6.5 A	9.1 A / 8.7 A	11.4 A / 10.9 A	13.6 A / 13 A	16 A
Corrente máx de saída	4.4 A	5.2 A	8.1 A	10.5 A	13.3 A	15.7 A	16 A
Fator de potência	> 0,99 (0,8 inicial - 0,8 atrasado)						
Harmônicas (THDi)	<3%						
Eficiência							
Eficiência máxima	96.6%		96.6%	97.1%	97.1%		97.3%
Eficiência EU	95.3%		95.4%	96.6%	96.7%		96.8%
Eficiência MPPT	>99.5%						
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			
Interruptor CC integrado				Opcional			
Dados gerais							
Dimensões (L*A*P)				310*373*160 mm			
Peso	7.4 kg			7.7 kg			
Topologia	Sem Transformador						
Consumo próprio (noite)	<1 W						
Faixa de temperatura ambiente de operação	-25 ~ +60°C						
Umidade relativa	0-100%						
Grau de proteção (IP)	IP66						
Conceito de refrigeração	Convecção natural						
Altitude máx de operação	4000 m						
Certificados de padrão de conexão da rede	NBR 16149, NBR 16150, IEC 62116, IEC 61000-3-4/-5, IEC 61000-3-11/-12						
Padrão de segurança / EMC	IEC 62109-1/-2, IEC 61000-6-1/-2/-3/-4						
Características							
Conexão CC	Conectores MC4						
Conexão CA	Ficha de ligação rápida						
Tela	LCD						
Comunicação	RS485, Opcional: Wi-Fi, GPRS, USB						

APÊNDICE A – Características do *Step-up* utilizado em laboratório

Descrição Geral: Módulo Conversor DC-DC *Step-up* 600 W 10 A – 12~60 V para 12~80 V;

Fabricante: MSS Eletrônica;

Tensão de entrada: 12~60 VDC;

Tensão de saída: 12~80 VDC (sempre maior do que a entrada);

Tipo: *Step-up*;

Corrente de entrada máxima: 10 A;

Corrente de saída máxima: 15 A (acima de 6 A utilizar ventilação forçada);

Potência máxima efetiva: Tensão de entrada x 10 A;

Eficiência: Até 95%;

Topologia: *Booster*;

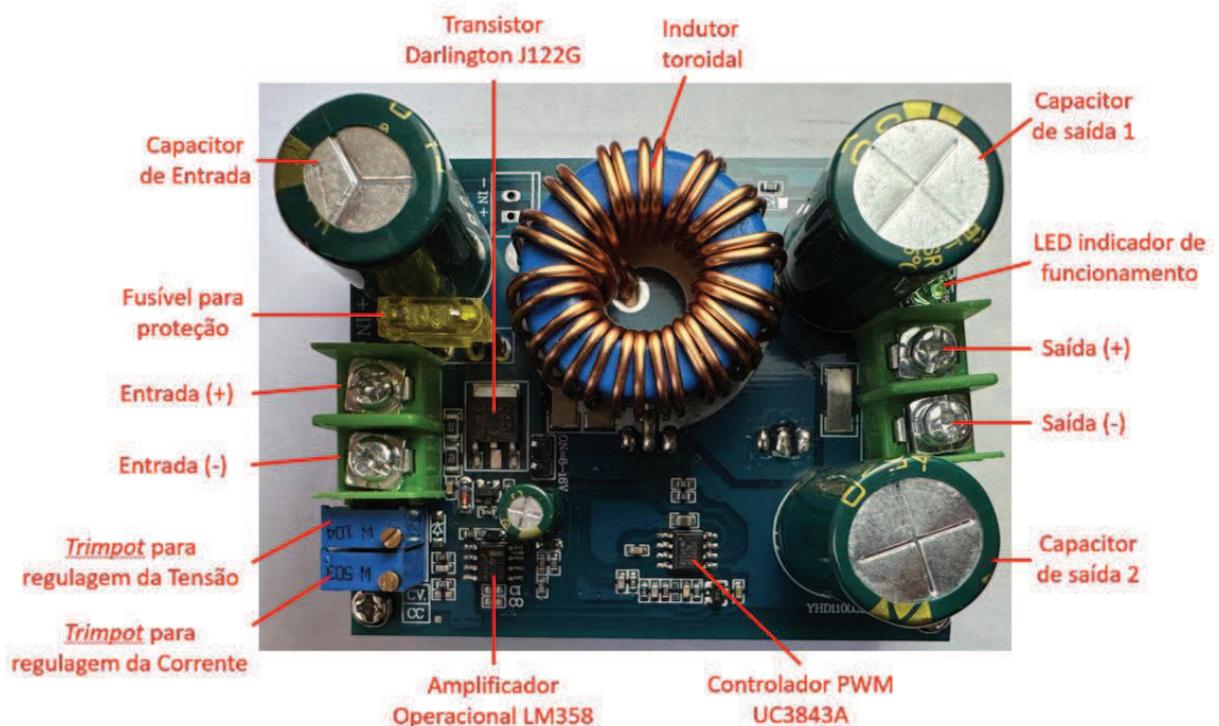
Proteção contra curto-circuito: Fusível;

Proteção contra inversão de polaridade: Não possui;

Peso: 230 g;

Dimensões: 76 x 60 x 56 [cm].

Figura 47 – Principais componentes do *Step-up* utilizado em laboratório.



Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE B – Características da Ventoinha considerada na análise

Fabricante: DeepCool;

Modelo: DP-FDC-XF120;

Cor: Preto;

Tensão: 12 VDC;

Corrente: 0,07 A \pm 10%;

Potência de entrada: 0,84 W;

Velocidade da ventoinha: 1300 RPM \pm 10%;

Fluxo máximo de ar: 43,56 CFM;

Ruído: 23,7 dB (A);

Peso: 180 g;

Dimensões da ventoinha: 120 x 120 x 25 [mm].

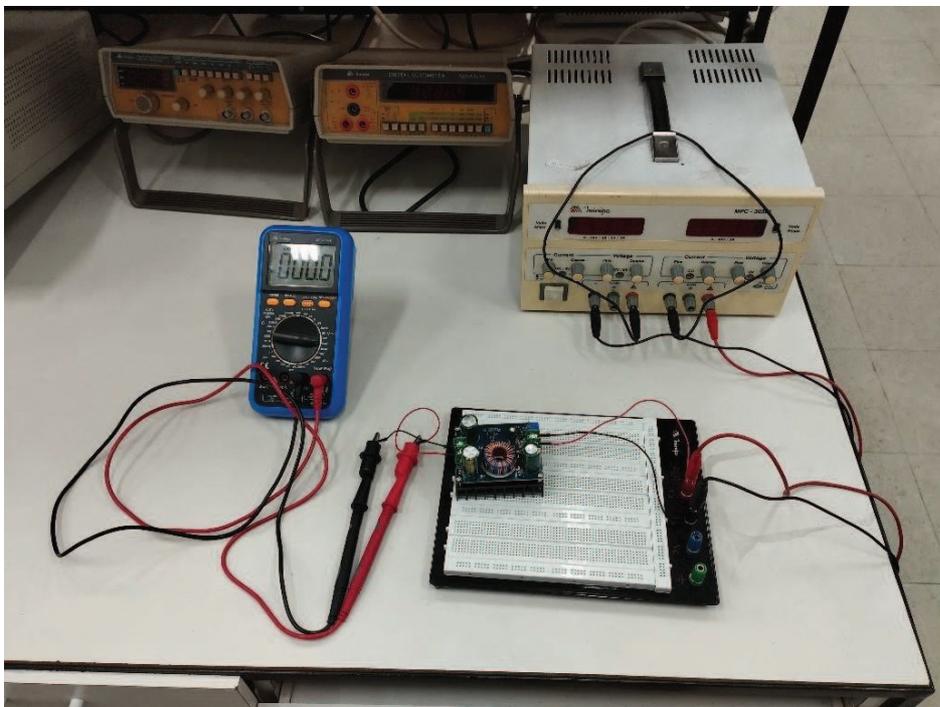
Figura 48 – Modelo da ventoinha considerada na análise.



Fonte: Site PICHAU, 2023.

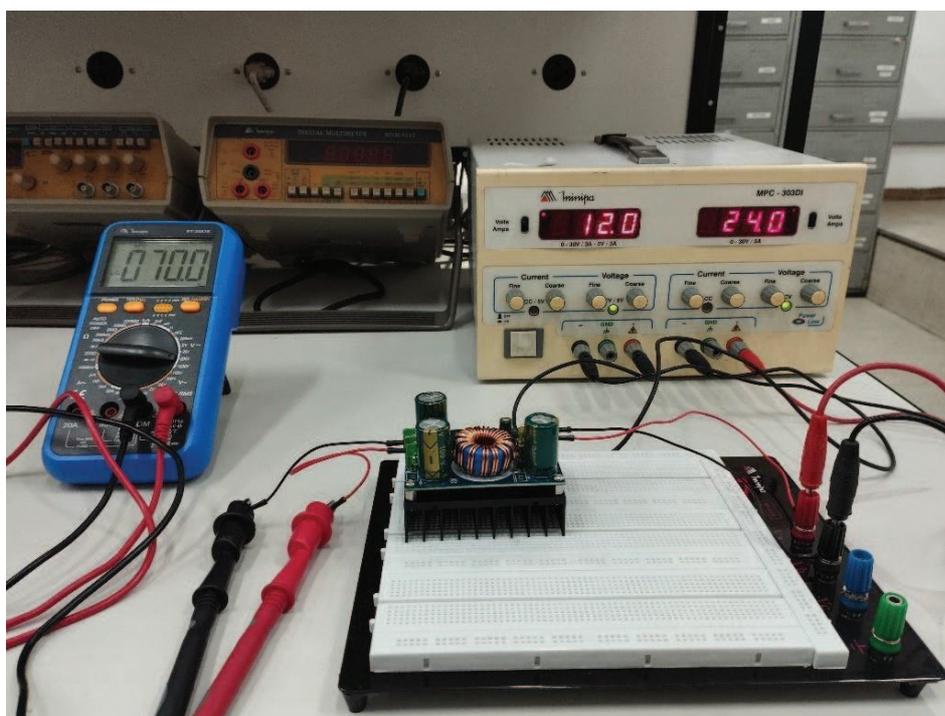
APÊNDICE C – Registros Fotográficos dos Ensaios em Laboratório

Figura 49 - Configuração utilizada nos testes funcionais sem carga.



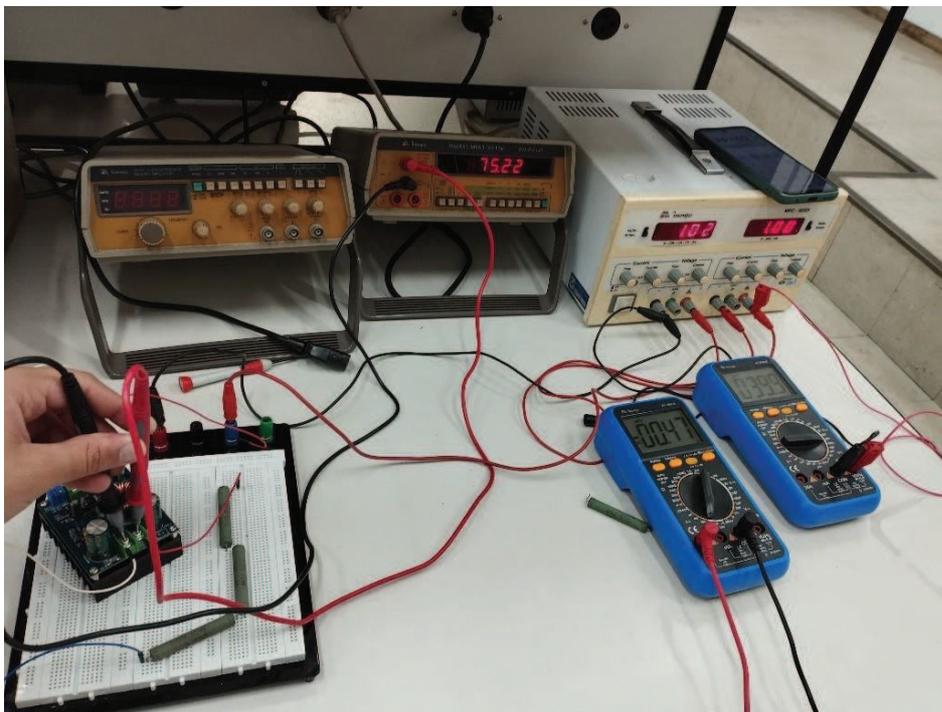
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 - Registro de leitura 01 - Testes sem carga (Condição 1 - Quadro 5).



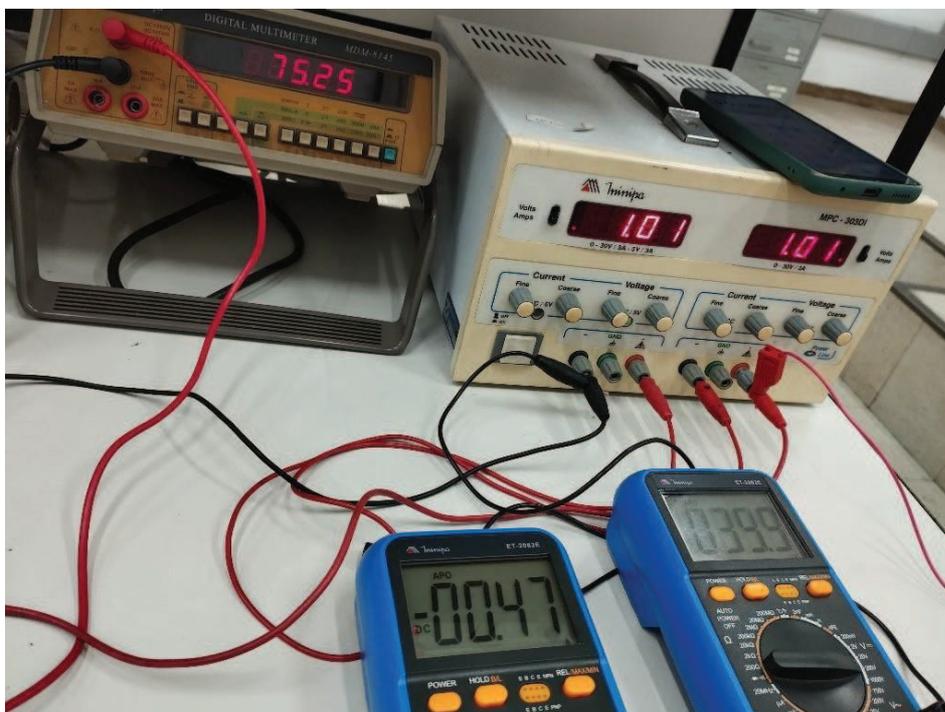
Fonte: Próprio autor.

Figura 51 - Configuração utilizada na primeira condição dos testes funcionais com carga.



Fonte: Próprio autor.

Figura 52 - Registro de leitura 02 - Testes com carga (Condição 1 - Quadro 8).



Fonte: Próprio autor.

Figura 53 - Configuração utilizada na segunda condição dos testes funcionais com carga.



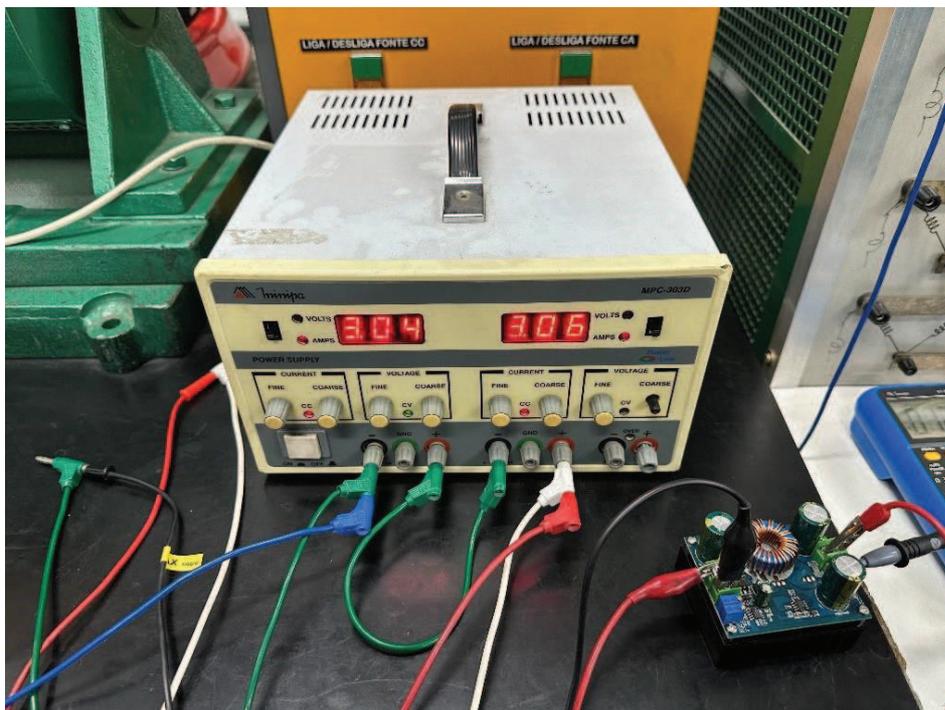
Fonte: Próprio autor.

Figura 54 - Registro de leitura 03 - Testes com carga - tensão de entrada (Condição 2 - Quadro 9).



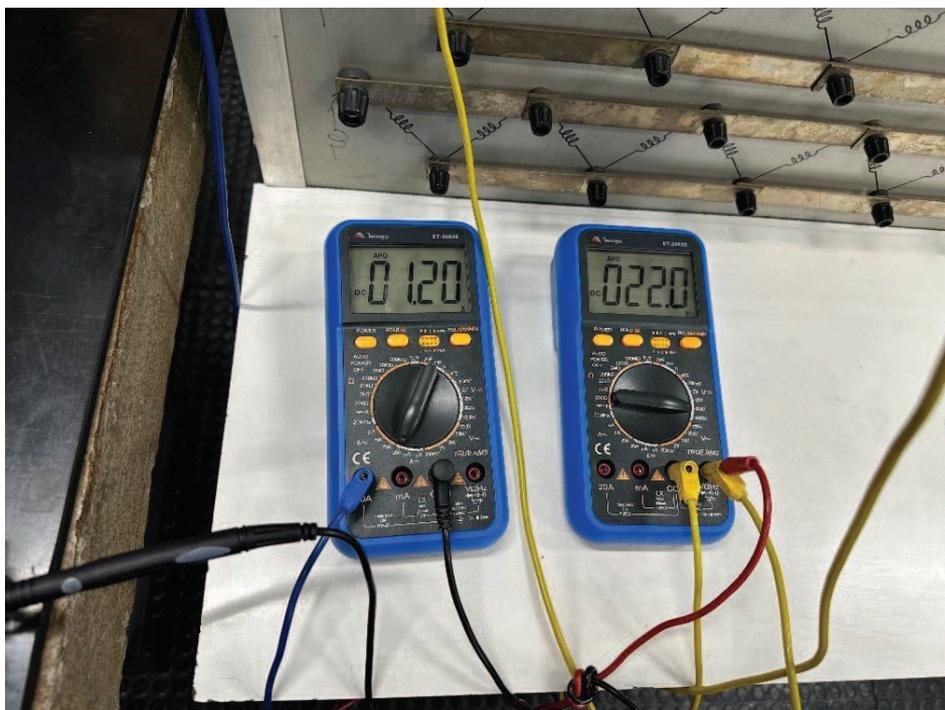
Fonte: Próprio autor.

Figura 55 - Registro de leitura 04 - Testes com carga - corrente de entrada (Condição 2 - Quadro 9).



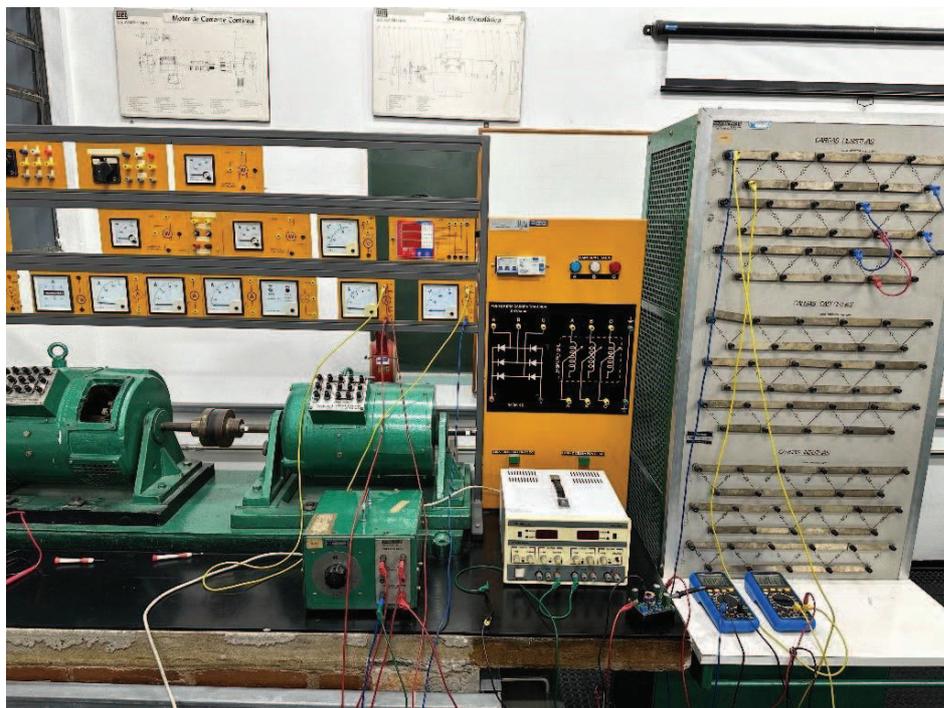
Fonte: Próprio autor.

Figura 56 - Registro de leitura 05 – Testes com carga - tensão e corrente de saída (Condição 2 - Quadro 9).



Fonte: Próprio autor.

Figura 57 - Configuração utilizada na terceira condição dos testes funcionais com carga.



Fonte: Próprio autor.

Figura 58 - Registro de leitura 06 – Testes com carga - tensão e corrente de entrada (Condição 3 - Quadro 10).



Fonte: Próprio autor.

