



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ARTHUR DE FARIAS LEAL

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS *ON-GRID* E *OFF-GRID* EM UMA INDÚSTRIA**

Campina Grande – PB
2022

ARTHUR DE FARIAS LEAL

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS *ON-GRID* E *OFF-GRID* EM UMA INDÚSTRIA

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Unidade Acadêmica de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.

Orientador:

Luis Reyes Rosales Montero, D. Sc.

Campina Grande – PB

2022

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Geração de Energia e Instalações Elétricas.

APROVADO EM 30/08/2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Luis Reyes Rosales Montero, D. Sc.
Orientador

Prof. Roberto Silva de Siqueira, D. Sc.
Avaliador

Dedico este trabalho, primeiramente à Deus, aos meus pais – Fábio e Mércia, à minha avó – Carmelita, à minha namorada – Mariana, pelo amor, carinho e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por me ter me dado saúde, força e sabedoria para superar todos os obstáculos que me foram impostos durante essa trajetória.

Aos meus pais, Fábio e Mércia, que me apoiaram em todas as decisões tomadas até aqui. Sem esse apoio, esse sonho não teria se tornado realidade.

À minha avó Carmelita, que sempre esteve presente nos momentos em que eu mais precisei. Obrigado por tudo.

À minha namorada, Mariana, sempre ao meu lado nos momentos de incertezas, me ouvindo, aconselhando e apoiando.

A todos os familiares e amigos que contribuíram para que eu conseguisse chegar até aqui.

Ao meu orientador, Luis Reyes, pelo empenho dedicado à realização deste trabalho e pelos ensinamentos que me ajudaram a concluir a última etapa da graduação.

RESUMO

Introdução A preocupação com o meio ambiente tem tornado constante a discussão sobre novas alternativas de geração de energia elétrica. Percebe-se, cada vez mais, que consumidores estão investindo em geração distribuída, em especial a energia solar fotovoltaica. Esse cenário, apesar de recente, tem iniciado uma importante transformação na forma de como se consome energia elétrica. Portanto, este trabalho tem como objetivo geral discutir os aspectos técnicos e econômicos da implantação de um sistema solar fotovoltaico em uma unidade consumidora industrial do subgrupo A4. **Objetivo** Os objetivos específicos são as análises de viabilidade a partir da proposição do dimensionamento de sistemas com dois tipos de geração: *on-grid* e *off-grid*. **Metodologia** O trabalho foi desenvolvido em cima do estudo de caso de uma indústria localizada na cidade de Esperança-PB. **Resultados** Sendo assim, foram apresentados os resultados, baseados na análise de viabilidade técnica e econômica dos dois dimensionamentos. **Conclusão** Desse modo, acredita-se que o desenvolvimento deste trabalho alcançou os objetivos estabelecidos na elaboração da proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Fotovoltaica. Sistema Fotovoltaico *On-grid*. Sistema Fotovoltaico *Off-grid*. Consumidor Industrial.

ABSTRACT

Introduction The concern with the environment has made constant the discussion about new alternatives for the generation of electric energy. It has been noticed, more and more, that consumers are investing in distributed generation, especially in photovoltaic solar energy. This scenario, although recent, has initiated an important transformation in the way electric energy is consumed. Thus, this work has as a general objective to discuss the technical and economical aspects of the implementation of a solar photovoltaic system in an industrial consumer unit of subgroup A4. **Objective** The specific objectives are the feasibility analyses from the proposed sizing of systems with two types of generation: on-grid and off-grid. **Methodology** The work was developed based on the case study of an industry located in the city of Esperança-PB. **Results** Thus, the results, based on the technical and economic feasibility analysis of the two designs, were presented. **Conclusion** Thus, it is believed that the development of this work has achieved the objectives established in the elaboration of the proposal.

KEYWORDS: Solar Photovoltaic Energy. On-grid Photovoltaic System. Off-grid Photovoltaic System. Industrial Consumer.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
GD	Geração Distribuída
GC	Geração Centralizada
UC	Unidade Consumidora
RN	Resolução Normativa
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ABGD	Associação Brasileira de Geração Distribuída
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	25
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens do sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	27
Tabela 3 - Informações do ponto de entrega	46
Tabela 4 – Histórico de consumo da UC nos últimos 12 meses	48
Tabela 5 - Especificações do módulo fotovoltaico.	55
Tabela 6 – Lista de materiais.....	57
Tabela 7 – Custos do projeto fotovoltaico <i>on-grid</i>	57
Tabela 8 – Informações do sistema	59
Tabela 9 – Tarifas de consumo (com impostos inclusos) da Energisa Paraíba	63
Tabela 10 – Projeção das faturas anuais sem SFCR ao longo de 25 anos.	64
Tabela 11 – Tarifas de demanda medida e demanda não consumida (com tributos).....	65
Tabela 12 – Fluxo de caixa anual pós implantação do SFCR	66
Tabela 13 – Análise financeira final do investimento	67
Tabela 14 – Custo diário da indústria com iluminação.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz elétrica brasileira	16
Figura 2: Potencial brasileiro de geração solar fotovoltaica	20
Figura 3: Evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil	21
Figura 4: <i>Ranking</i> estadual de geração distribuída	22
Figura 5: <i>Ranking</i> estadual da potência instalada - Geração Centralizada.....	23
Figura 6: Geração solar distribuída por classe de consumo	24
Figura 7: Sistema de geração fotovoltaica <i>on-grid</i>	25
Figura 8: Sistema de geração fotovoltaica <i>off-grid</i>	27
Figura 9: Sistema de geração fotovoltaica híbrido	28
Figura 10: Composição de um painel fotovoltaico.	31
Figura 11: Curvas características de um painel fotovoltaico (I x V e P x V)..	33
Figura 12: Configuração de um sistema fotovoltaico típico	34
Figura 13: Configuração de um sistema fotovoltaico isolado com armazenamento de energia e inversor	35
Figura 14: Associação em série (a) e em paralelo (b) de baterias	38
Figura 15: Modalidades tarifárias aplicadas ao grupo A	43
Figura 16: Coordenadas geográficas da UC	47
Figura 17: Irradiação solar média em Esperança - PB.....	47
Figura 18: Gráfico do histórico de consumo (ponta e fora de ponta).....	49
Figura 19: Curva de Potência Injetada x Horas do dia	53
Figura 20: Curva de Potência Injetada x Horas do dia (com <i>oversizing</i>)	54
Figura 21: Plataforma da <i>Brassunty</i> Energia Solar.....	57
Figura 22: Energia Gerada x Consumo	59
Figura 23: Kit de geração fotovoltaica <i>off-grid</i> de 4.222 Wh/dia.....	61
Figura 24: Kit de geração fotovoltaica <i>off-grid</i> de 3.600 Wh/dia.....	61
Figura 25: Análise gráfica do Fluxo de Caixa	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	13
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO RELATÓRIO	14
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	15
2.2	RESOLUÇÃO NORMATIVA 482/2012	17
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	18
2.3.1	Panorama Brasileiro	19
2.3.2	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (<i>On-grid</i>)	24
2.3.3	Sistemas Fotovoltaicos Isolados (<i>Off-grid</i>)	26
2.3.4	Sistemas Fotovoltaicos Híbridos	28
2.3.5	Energia Solar Fotovoltaica na Indústria	29
2.4	COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	30
2.4.1	Módulos Fotovoltaicos	30
2.4.2	Inversor de Frequência	34
2.4.3	<i>String Box</i>	36
2.4.4	Baterias	37
2.4.5	Controlador de Carga	39
2.5	CONCEITOS TARIFÁRIOS	40
2.6	MÉTODOS PARA ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA	43
2.6.1	Valor Presente Líquido (VPL)	43
2.6.2	Taxa Interna de Retorno (TIR)	44
2.6.3	<i>Payback</i>	45
3	SISTEMA FOTOVOLTAICO <i>ON-GRID</i> – ESTUDO DE CASO	46
3.1	INFORMAÇÕES GERAIS DA UC	46
3.2	DADOS SOLARIMÉTRICOS	47
3.3	ANALISE DO CONSUMO	48
3.4	DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO SISTEMA	49
3.5	DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR	51
3.5.1	Influência do Inversor no Controle da Potência Reativa	54
3.6	DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	55
3.7	CUSTOS COM O PROJETO	56

3.8	CAPACIDADE DE GERAÇÃO	58
4	SISTEMA FOTOVOLTAICO <i>OFF-GRID</i> – ESTUDO DE CASO	60
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	63
5.1	PROJETO <i>ON-GRID</i>	63
5.2	PROJETO <i>OFF-GRID</i>	68
6	CONCLUSÃO	69
7	TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71
	ANEXO A – <i>DATASHEETS</i> DOS INVERSORES	74
	ANEXO B – <i>DATASHEET</i> DO MÓDULO	75

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por fontes alternativas de geração de energia tem sido pauta constante em discussões no Brasil do século XXI. Dentro desse contexto, percebe-se uma grande preocupação em explorar o cenário da Geração Distribuída (GD). Este tipo de geração é uma categoria de geração descentralizada que permite o consumidor gerar a sua própria energia.

No Brasil, a categoria da GD se instaurou após o Decreto Lei nº 5163 do Governo Federal, em 2004, embora, na época, ela tenha se mostrado pouco acessível a todos os consumidores. Em 2012, apenas, por meio da Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a GD veio se tornar amplamente acessível à população. A partir dela, foi permitido aos consumidores comuns o acesso à rede de distribuição de baixa tensão e, assim, a possibilidade de produzir energia elétrica para consumo próprio (SOLAR, 2022).

A partir de 2012, após essa RN, observou-se um crescimento acelerado da GD no Brasil, em especial com os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR). Estima-se cerca de 94% da quantidade de sistemas instalados (DIAGNÓSTICO E PERSPECTIVAS PARA A MICROGERAÇÃO NO BRASIL., 2015).

OS SFCR, comumente chamados de sistemas fotovoltaicos *on-grid*, é um tipo de sistema de energia solar fotovoltaica que permanece conectado à rede elétrica de distribuição, de tal modo que, quando não há condições favoráveis a produção de energia (a noite, por exemplo), é possível utilizar a energia proveniente da concessionária. Nos dias em que há uma alta produção, essa energia excedente será injetada na rede de distribuição e o seu valor será convertido em créditos a serem abatidos do valor de consumo das próximas faturas. (SOLAR, 2022).

Além dos SFCR, existe a opção de geração fotovoltaica isolada, a chamada geração *off-grid*, ou geração autônoma. Nesse tipo de sistema, não há conexão alguma com a rede elétrica de distribuição e seu funcionamento se dá por meio da utilização de baterias estacionárias, responsáveis por armazenar a energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos. Como o sistema demanda a utilização de várias baterias, o seu custo total se torna mais caro que os SFCR.

Desejando aumentar ainda mais os incentivos à implantação da GD no Brasil, o Governo Federal, em 22 de Abril de 2015, por meio do CONFAZ (Conselho Nacional de Política Fazendária), que integra o Ministério da Economia, responsável por

promover convênios que contemplam concessões ou revogações de isenções, instituiu o Convênio 16, que autorizou os Estados a atribuírem isenções do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) incidente sobre a energia elétrica injetada na rede de distribuição pelo consumidor (CONFAZ, 2022). Atualmente, no entanto, as alíquotas do ICMS na eletricidade variam entre 12% a 32% do valor da conta de luz, dependendo da faixa de consumo e do Estado (SOLAR, 2022).

Diante de tudo que foi dito, é muito comum encontrar residências e comércios gerando sua própria energia com energia solar. Além disso, é comum achar artigos e dissertações com estudos de casos que atestam, com base em indicadores técnicos e financeiros, a viabilidade de sistemas fotovoltaicos instalados em consumidores residenciais (B1) e rurais (B2).

Quando o tema parte para a esfera industrial, percebe-se que o crescimento da alternativa de GD ainda não é tão exponencial como se mostra para os consumidores de baixa tensão, embora já seja possível observar que algumas indústrias têm percebido que podem economizar energia com a implantação de sistemas fotovoltaicos.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Muito difundida entre os consumidores do Grupo B (unidades consumidoras com tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV), a energia solar fotovoltaica também pode ser uma alternativa para UCs do Grupo A, que recebem energia elétrica em tensão igual ou superior à 2,3 kV – normalmente estabelecimentos comerciais de grande porte e grandes indústrias. Tais unidades são enquadradas no grupo tarifário A e são caracterizadas pelo acréscimo de mais uma tarifa em relação ao grupo B. Além de pagar pelo consumo, elas pagam pela demanda de potência da unidade.

Ainda dentro do grupo A, essas unidades consumidoras são classificadas em subgrupos de acordo com os seus níveis de tensão. No caso deste trabalho, a análise será focada no consumidor industrial do subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV. Na seção de conceitos tarifários, essas divisões de grupos e subgrupos serão tratadas com mais detalhes.

Sendo assim, a execução do presente trabalho tem como objetivo fundamental discutir, por meio de um estudo de caso, a viabilidade da implantação de um sistema de energia solar para este tipo de consumidor. A análise será feita para a implantação

dos dois tipos de sistemas – *on-grid* e *off-grid* – objetivando esclarecer qual sistema é mais viável para o cliente. Todas as análises serão baseadas em aspectos técnicos e econômicos.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO RELATÓRIO

O presente trabalho está dividido em 6 seções:

A seção 1 contempla a introdução do tema, apresentando o contexto da Geração Distribuída, com enfoque na fonte de geração solar fotovoltaica. Além disso, esta seção apresenta brevemente os objetivos a serem alcançados com a elaboração do trabalho.

A seção 2 traz o referencial teórico, abordando todos os conceitos que servirão de base para o desenvolvimento das seções posteriores.

A seção 3 apresenta, detalhadamente, a partir de um estudo de caso, a metodologia aplicada na elaboração do projeto do SFCR.

A seção 4 aborda, a partir do mesmo estudo de caso da seção anterior, a metodologia aplicada no desenvolvimento do sistema fotovoltaico autônomo.

A seção 5, por sua vez, faz uma análise dos resultados obtidos nas seções 3 e 4, com o objetivo de atestar, ou não, a viabilidade dos projetos.

A seção 6 descreve as conclusões que foram obtidas na realização do trabalho.

Por fim, a seção 7 sugere novos enfoques para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Antes de tratar sobre geração distribuída (GD), é necessário falar um pouco sobre geração centralizada (GC).

As usinas de GC são caracterizadas por grandes centrais de produção de energia e, quase sempre, estão localizadas longe do local de consumo. Na prática, isso indica que o custo final da geração de energia a partir da GC demanda um grande investimento, pois os gastos com a transmissão se tornam muito elevados (2WENERGIA, 2022).

Além de encarecer o processo, o fato dessas usinas estarem longe do local de consumo provoca perdas elevadas durante a transmissão. Por exemplo, estima-se que durante o processo de transmissão de energia da Usina Hidrelétrica de Itaipu até o consumidor final, as perdas chegam a se aproximar da casa dos 16%.

Diante desses e de outros problemas da GC, surge a alternativa da geração distribuída. Em 2012, a partir da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro se viu apto a investir em menores usinas que sejam adequadas ao seu consumo. Essa RN estabeleceu algumas definições regulatórias importantes para inserção da GD no Brasil. Na seção a seguir elas serão melhores detalhadas.

Um grande benefício propiciado por essa RN é que, enfim, esses consumidores podem gerar a sua energia no próprio local de consumo, ou seja, as perdas durante o processo de transmissão reduzirem bastante. Sem contar que os investimentos em infraestrutura e em redes se tornariam quase que insignificantes se comparados aos aplicados na GC.

No Brasil, a GD tem como base o *net metering*, o chamado sistema de compensação de energia elétrica. O consumidor gera a sua própria energia e, após descontado o valor do consumo, o que sobrar é injetado na rede da concessionária. Sempre que houver esse saldo positivo, o consumidor receberá um crédito de energia (kWh) que servirá para descontar o consumo das faturas subsequentes ou – em casos de consumidores que pagam a tarifa horária – para descontar o consumo em outro posto tarifário (SOLAR, 2022).

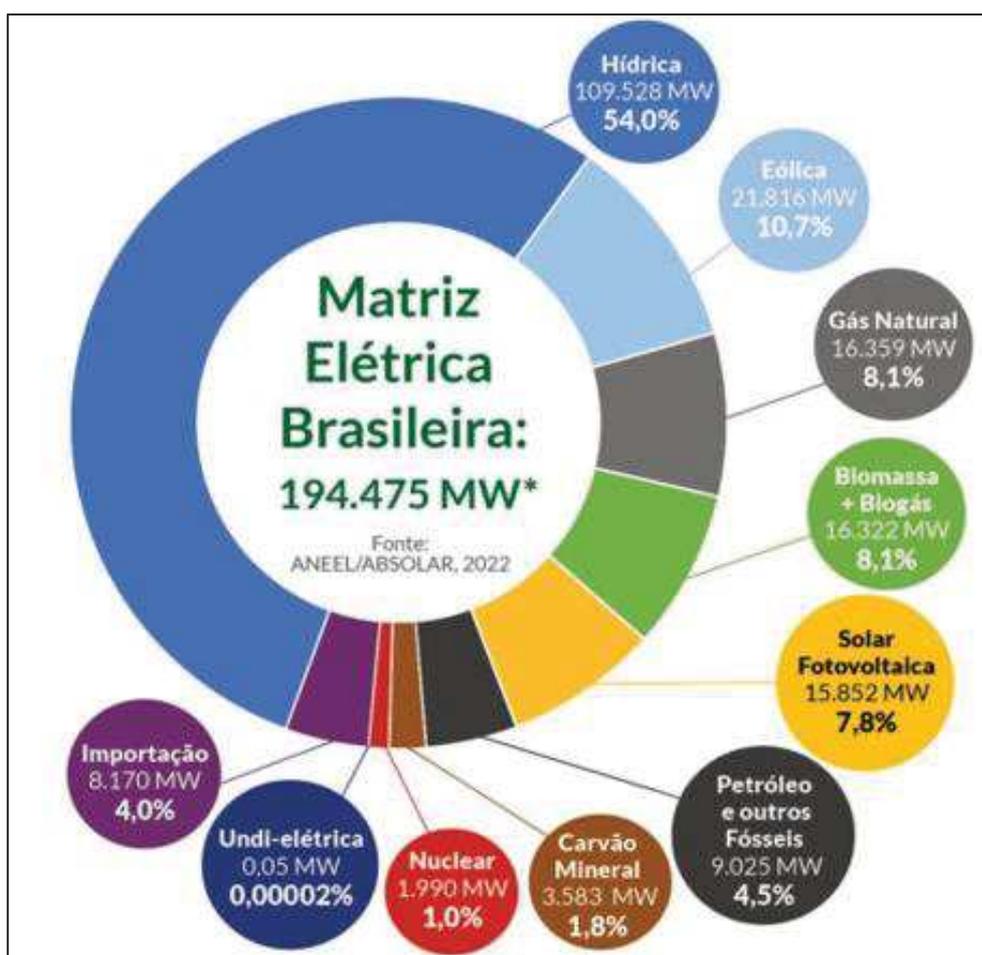
Por outro lado, também existe outro modelo de compensação de energia. Nesse, por sua vez, o sistema não é conectado à rede da distribuidora e a energia

excedente é armazenada em baterias para ser utilizada em períodos desfavoráveis à geração. Esse modelo de geração é muito indicado para utilização em regiões mais deslocadas, onde a distribuidora não tem muito acesso.

Segundo Guilherme Chispim, presidente da Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD), o ano de 2022 tende a ser um ano marcante para o cenário da GD. Em entrevista à agência Epbr (2022), ele define 2022 como “o ano da corrida ao sol”. Espera-se que, até o final desse ano, a geração distribuída insira mais 8 GW no Brasil.

O cenário atual da matriz elétrica brasileira, de acordo com a (Absolar, 2022), conta com 194.475 MW de potência instalada, dos quais 7,8% correspondem a fonte solar fotovoltaica.

Figura 1. Matriz elétrica brasileira.



Fonte: ABSOLAR (2022).

2.2 RESOLUÇÃO NORMATIVA 482/2012

O ano de 2012 foi um marco no cenário da GD no Brasil. Em abril daquele ano, entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 e, a partir dela, o consumidor brasileiro passou a gerar sua própria energia advinda de fontes renováveis ou cogeração qualificada. De acordo com (Aneel, 2012), a RN nº 482/2012 determinou as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Nela, as duas modalidades foram definidas da seguinte forma:

- **Microgeração distribuída:** toda e qualquer central geradora de energia elétrica, caracterizada por uma potência instalada de até 75 W e que utilize fontes de energia renováveis, conectada na rede local, ou que utilize cogeração qualificada.
- **Minigeração distribuída:** toda e qualquer central geradora de energia elétrica, caracterizada por uma potência instalada acima de 75 W até 5MW, que utilize fontes de energia renováveis, conectada na rede local, ou que utilize cogeração qualificada.

Além de definir as duas categorias de geração, a RN 482 estabeleceu o Sistema de Compensação de Energia, também conhecido como *net metering*. Esse sistema permitiu ao consumidor – de micro e minigeração – obter créditos de energia em épocas que a geração superar o consumo. Como o sistema fotovoltaico do cliente é conectado na rede da distribuidora, ele pode repassar para a concessionária esse excesso de energia e recebê-la nos meses seguintes em forma de desconto (em kWh) na sua fatura com validade de 60 meses. (ANEEL, 2012).

Cada unidade consumidora terá a sua compensação realizada, a priori, no mesmo posto horário e no mesmo ciclo de faturamento em que a energia foi gerada e, posteriormente, nos demais postos horários, desde que seja observado a relação entre os valores das tarifas de energia (ANEEL, 2012).

Em outro ponto da norma, ela define a possibilidade de instalação de sistemas de GD em empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras. Por exemplo,

num condomínio, a energia gerada pode ser dividida entre todos os moradores para uso individualizado (ANEEL, 2012).

Ainda de acordo com a resolução 482, foi estabelecido o conceito de geração compartilhada. Essa definição possibilitou que consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, se reunissem em um consórcio ou em uma cooperativa, para instalar um sistema de GD, de modo a utilizar a energia excedente gerada como forma de compensação nas suas faturas (ANEEL, 2012).

Além de permitir que o excedente de energia seja repassado a rede da distribuidora em troca de créditos, a norma definiu que esses créditos também podem ser utilizados para abater o consumo de unidades consumidoras situadas em outros locais, desde que sejam do mesmo titular e estejam na mesma área de concessão ou permissão. Esse tipo de compensação foi definido como autoconsumo remoto. (ANEEL, 2012).

Por fim, é importante destacar que, para unidades consumidoras inseridas no grupo B (baixa tensão), mesmo que o excesso de energia repassado para a distribuidora seja maior que o consumo, será necessário o pagamento da quantia referente ao custo de disponibilidade – valor relativo a 30 kWh (monofásico), 50 kW (bifásico) ou 100 kWh (trifásico). Já para consumidores do grupo A – caso deste trabalho – o custo de consumo pode ser zerado, porém ele continua pagando pelo valor de demanda contratada.

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Segundo Severino e Oliveira (2010), o efeito fotovoltaico é gerado através da absorção da luz solar, que ocasiona uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor.

Em 1839, há quase 200 anos, Edmond Becquerel descobriu o famoso efeito fotovoltaico. Ele percebeu que, quando uma célula eletroquímica é submetida à luz solar, uma diferença de potencial era gerada nos seus extremos e que, interligados por um fio condutor, era possível obter uma circulação de corrente. No entanto, o primeiro dispositivo capaz de converter radiação solar em eletricidade só veio ser obtido em 1876, por W. G. Adams e R. E. Day. Ele foi elaborado utilizando o selênio para o dispositivo de estado sólido, porém não apresentava eficiência satisfatória. Apenas em 1953, quase 100 anos depois, foi possível obter as primeiras células

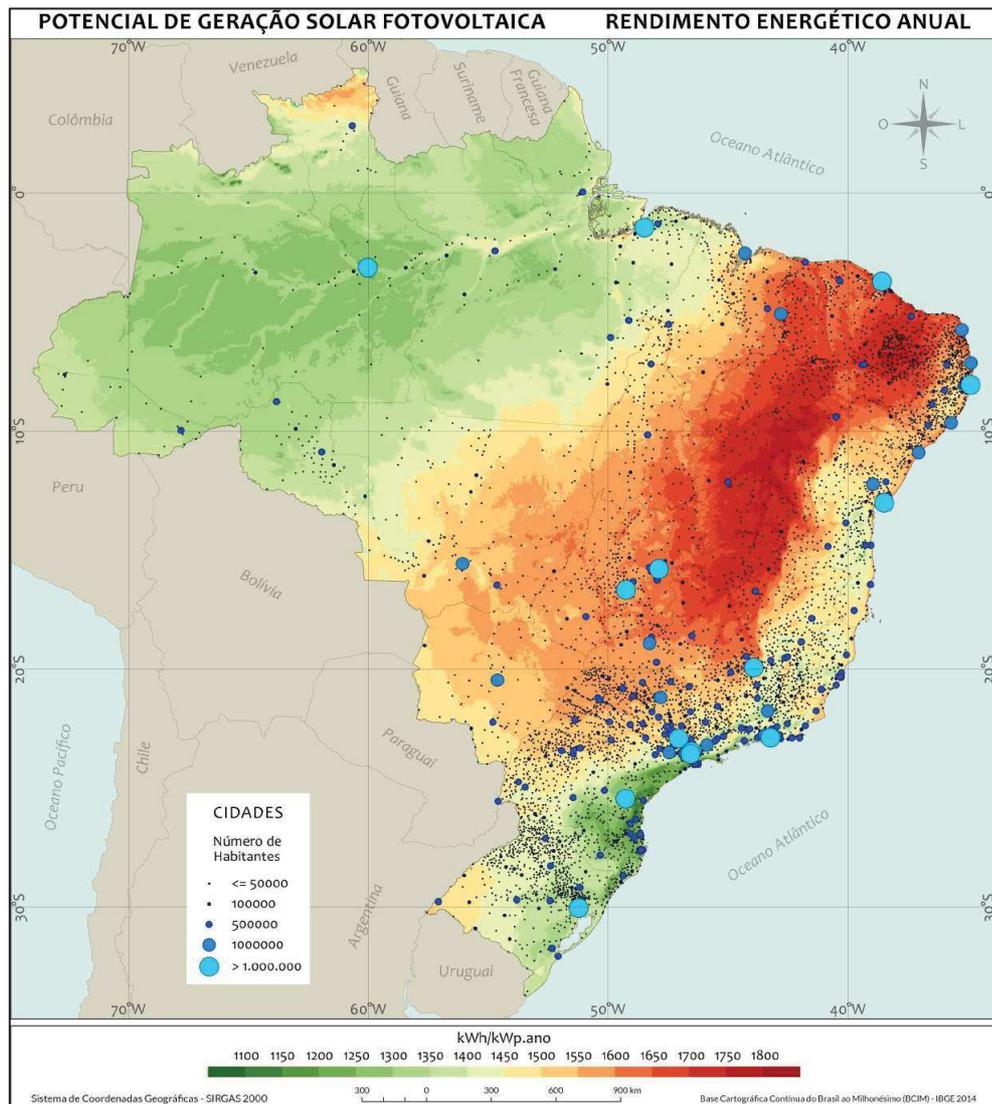
viáveis para o efeito fotovoltaico. Elas foram desenvolvidas nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, em um substrato de silício (PINHO; GALDINO, 2014).

Quando descoberta, a energia solar fotovoltaica era tratada como uma tecnologia futurista, cuja aplicação era restrita à pesquisas e estudos científicos. Não se imaginava, àquela época, que ela chegaria a ser utilizada como uma ampla fonte de geração de energia. Hoje, no entanto, alguns estudos já estimam que a energia solar virá a ser tornar a maior fonte mundial de energia por volta do ano de 2050 (ELYSIA, 2022).

2.3.1 Panorama Brasileiro

O Brasil é um país de enorme potencial de utilização da energia solar como fonte de geração de energia elétrica. Quando se fala de índice de radiação solar, o Brasil se encontra em ótima posição se comparado à índices de países europeus. Por estar localizado próximo a linha do Equador e, em função das características de translação do planeta, o Brasil é contemplado com uma alta incidência de sol em todo o período diurno, sofrendo poucas variações ao decorrer das estações do ano. De acordo com (Atlas Brasileiro da Energia Solar, 2017), criado pelo Instituto Nacional de Pesquisas (INPE), o país recebe mais de 3 mil horas de brilho do sol durante o ano, o correspondente a uma média diária de irradiação na faixa de 4,5 a 6,3 kWh/m². A Alemanha, país que mais explora energia solar no mundo, possui uma média diária entre 2,5 e 3,5 kWh/m², quase metade da média brasileira. A Figura 2 apresenta o mapa do potencial de geração solar em termos de rendimento energético anual no Brasil.

Figura 2. Potencial brasileiro de geração solar fotovoltaica.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

No Brasil atual, a energia solar fotovoltaica cresce cada vez mais a partir de projetos de geração distribuída. Estima-se que mais de 267,8 mil sistemas fotovoltaicos foram instalados somente no primeiro semestre de 2022 em residências (urbanas e rurais), comércios, indústrias e relacionados ao poder público. Esse número ultrapassa em mais de 35% o número de 172,4 mil sistemas fotovoltaicos instalados no primeiro semestre de 2021 no segmento de GD (SOLAR, 2022).

De acordo com os dados da ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) da Figura 3, o Brasil já conta com quase 11 MW de geração de energia solar distribuída e um pouco mais de 5 MW de geração solar em grandes usinas (ABSOLAR, 2002).

Figura 3. Evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: ABSOLAR (2022).

Ainda de acordo com os dados da (Absolar, 2022), o ranking estadual de geração distribuída (Figura 4) é encabeçado por Minas Gerais (MG), com 1.787,6 MW de potência instalada, seguido de São Paulo (SP), com 1.422,2 MW e Rio Grande do Sul (RS), com 1.249,1 MW. Cada um deles representam 16,7%, 13,2% e 11,6% respectivamente da potência total instalada no país.

Figura 4. Ranking estadual de geração distribuída.



Fonte: ABSOLAR (2022).

Já quando se trata de GC de energia solar, o Brasil tem uma potência total outorgada de 58,3 GW, que abrange as usinas que já estão operando, as que estão em fase de construção e as que ainda não tiveram sua construção iniciada (ABSOLAR, 2022).

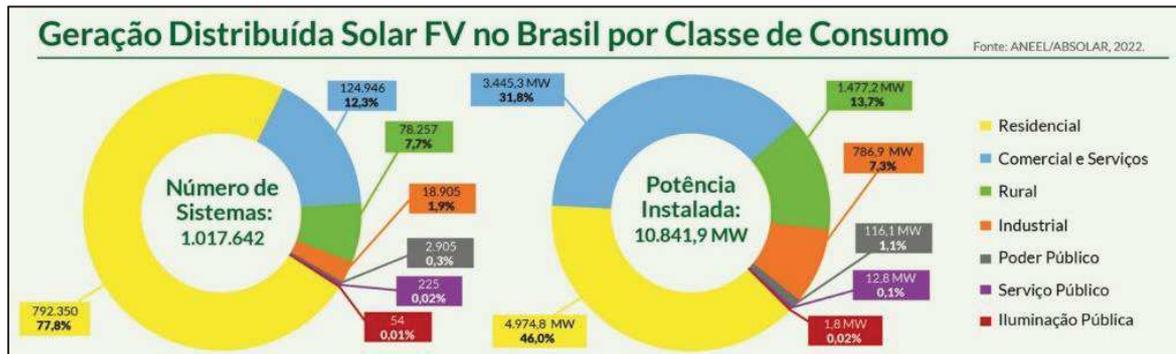
Figura 5. *Ranking* estadual da potência instalada - Geração Centralizada.



Fonte: ABSOLAR (2022).

Por fim, quando se fala de classe de consumo, a (Absolar, 2022) indica um protagonismo das classes residenciais e comerciais no cenário da geração solar distribuída do Brasil. Juntas, representam quase 80% de um total de 10.841,9 MW de potência instalada no país. As indústrias – foco da análise deste trabalho – constituem 7,3% desse número, com 786,9 MW instalado.

Figura 6. Geração solar distribuída por classe de consumo.



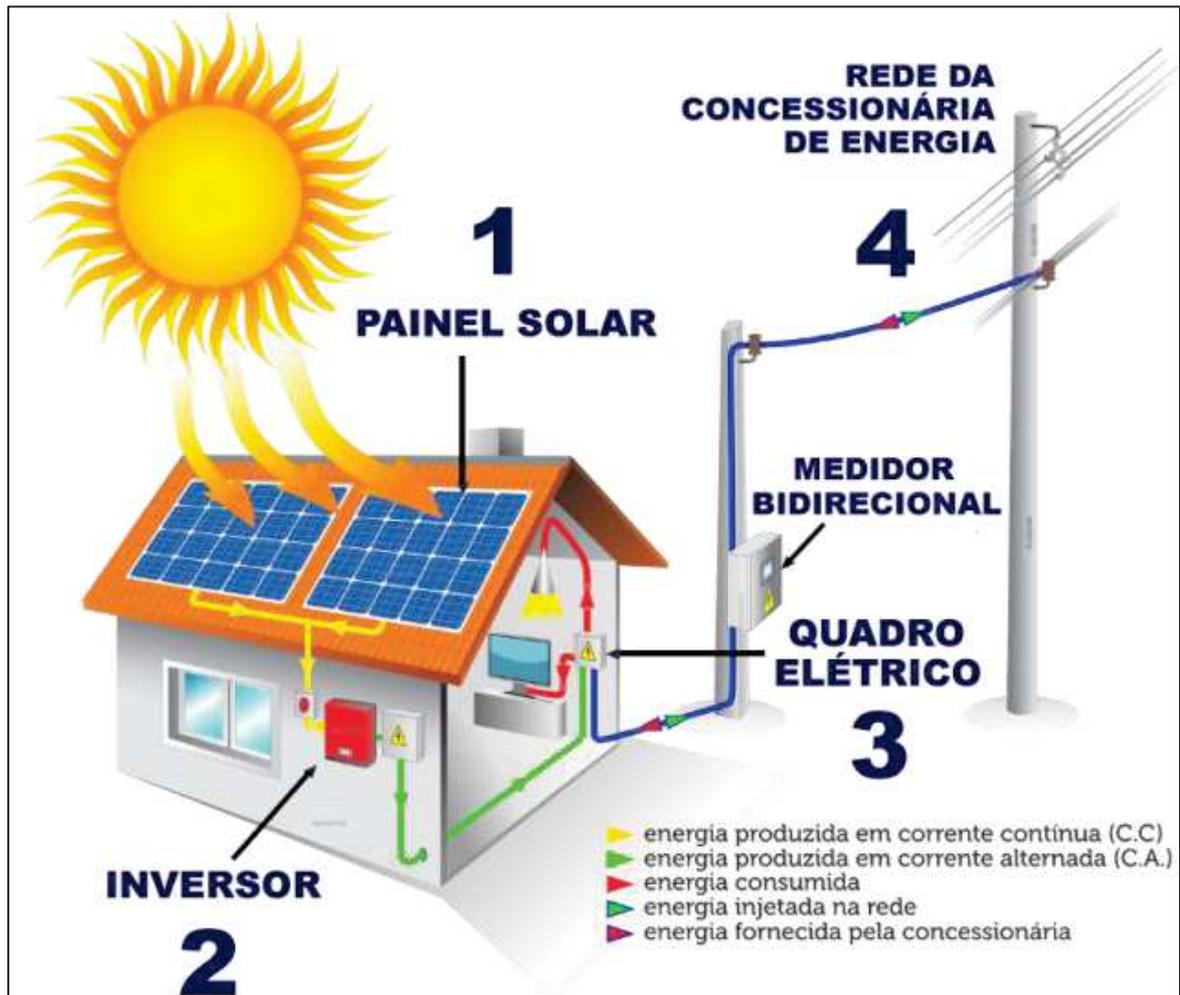
Fonte: ABSOLAR (2022).

2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (*On-grid*)

Como já foi comentado anteriormente, o sistema de geração fotovoltaica *on-grid* opera a partir da inserção de energia elétrica diretamente da rede de distribuição. Ele atua substituindo ou complementando a energia distribuída pela rede elétrica. Por atuar como uma fonte complementar ao sistema elétrico, esse tipo de sistema não é uma alternativa para locais que não recebem atendimento de rede de energia.

Diferentemente do sistema de geração *off-grid*, o sistema de geração *on-grid* funciona sem a necessidade do uso de baterias. Nesse caso, quem atua como uma espécie de um grande banco de baterias é a rede da concessionária. A carga consome toda a potência necessária que está sendo gerada pelo sistema fotovoltaico e, caso a geração exceda o consumo, o excedente será injetado diretamente na rede de distribuição. Esse excedente, por sua vez, servirá de créditos para abatimento nas faturas posteriores (MONTANHA, 2017).

Desta forma, os sistemas conectados à rede são instalados em paralelo à rede local e são constituídos de módulos fotovoltaicos, inversor e um medidor bidirecional (Figura 7) – responsável pela medição da energia gerada pelo sistema *versus* a energia consumida pela carga.

Figura 7. Sistema de geração fotovoltaica *on-grid*.

Fonte: Neo Solarys.

A Tabela 1 descreve algumas vantagens e desvantagens da utilização dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Tabela1. Vantagens e desvantagens do sistema fotovoltaico *on-grid*.

Vantagens	Desvantagens
Funcionamento por mediação de compensação de crédito.	Não é possível armazenar a energia excedente.
Desobrigação de utilizar baterias e controladores de carga.	Obrigação de acesso a rede elétrica local.

Os créditos podem ser utilizados na forma de autoconsumo remoto.	Não garante fornecimento de energia em casos de apagões, já que opera em paralelo à rede elétrica.
--	--

Fonte: Autor próprio (2022).

2.3.3 Sistemas Fotovoltaicos Isolados (*Off-grid*)

Em termos gerais, os sistemas isolados (*off-grid*) funcionam de forma autônoma, sem a necessidade de estar conectado à rede elétrica. Por não ter essa conexão, o sistema *off-grid* demanda a utilização de baterias, que serão responsáveis por armazenar energia para o abastecimento da carga em ocasiões em que não há produção, como à noite ou em dias chuvosos, por exemplo. Por essas características, os sistemas isolados são ideais para locais remotos, em que não há uma rede elétrica de atendimento.

Na maior parte dos sistemas autônomos, é utilizado um controlador de carga responsável por preservar a vida útil da bateria, protegendo-a de efeitos de sobrecarga ou descarga abrupta. Ele atua parametrizando a energia gerada nos níveis suportados pela bateria. Ademais, como a bateria armazena energia na forma de corrente contínua, é indispensável a utilização de um inversor que seja capaz de convertê-la em corrente alternada. Na Figura 8 é possível observar uma configuração simplificada do sistema.

Figura 8. Sistema de geração fotovoltaica *off-grid*.

Fonte: NeoSolar.

Por ser tratar de um sistema isolado, e, portanto, desconectado da rede elétrica, uma das suas vantagens é a isenção da taxa de disponibilidade. Por outro lado, por ser um sistema de autossustento, o custo da sua instalação é elevado, já que há a necessidade de investimento em baterias e controladores de carga (ECOSOL, 2022). É possível observar na Tabela 2 algumas das vantagens e desvantagens da utilização de sistemas autônomos.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens do sistema fotovoltaico *off-grid*.

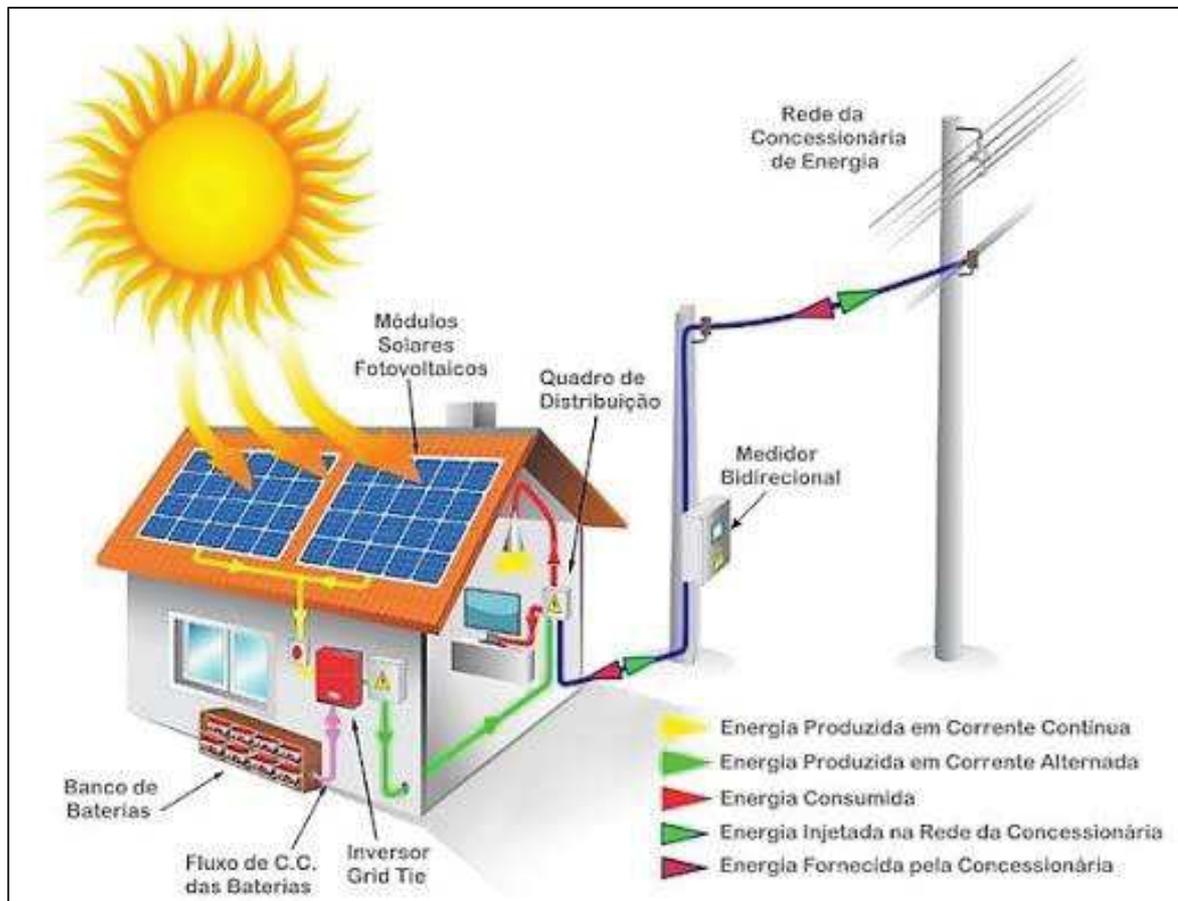
Vantagens	Desvantagens
Possuir um sistema de armazenamento de energia.	Custo de instalação elevado.
Desobrigação de qualquer custo na conta de luz.	Necessita da utilização de baterias e controladores de carga.
Pode ser utilizado em locais com dificuldade de acesso à energia.	A geração pode não ser suficiente para o consumo de algumas cargas.

Fonte: Autor próprio (2022).

2.3.4 Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

Entendido o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid*, torna-se mais fácil compreender o sistema híbrido. Como o próprio nome sugere, este tipo de sistema combina as duas formas de operação, ou seja, busca a união da melhor parte de cada um deles. Ele possui um sistema de geração conectado à rede de distribuição e, ao mesmo tempo, permite o armazenamento de energia. Desta forma, ele garante a continuidade do serviço mesmo em ocasiões em que haja falha na rede da concessionária. (FOCUS, 2022). A Figura 9 apresenta a configuração de um sistema fotovoltaico híbrido.

Figura 9. Sistema de geração fotovoltaica híbrido.



Fonte: Oca Solar Energia.

Apesar de permitir o consumo mais ponderado da eletricidade e uma independência energética maior, já que a energia será gerada mesmo em tempos de crise, é necessária atenção na hora de optar pela instalação do sistema. Isto porque ele requer um investimento muito maior se comparado aos sistemas que não

demandam a utilização de baterias e, por vezes, o custo-benefício não é dos melhores. Além disso, diferentemente dos módulos fotovoltaicos, que possuem vida útil de cerca de 25 anos, as baterias não costumam passar dos 15 anos de funcionamento, o que obriga o cliente a fazer um novo investimento para substituí-las.

Desta forma, indica-se que os sistemas híbridos sejam instalados em locais com cargas que demandem o fornecimento de energia de maneira ininterrupta, como em hospitais, *shoppings centers* e centrais de controle de grande porte, por exemplo (ENERGIA, 2022).

2.3.5 Energia Solar Fotovoltaica na Indústria

Certamente os custos com energia elétrica ocupam as primeiras posições na lista de maiores despesas de uma indústria. Diante disso, os gestores têm procurado, cada vez mais, soluções para essa questão. Desde que a energia solar em indústrias e fábricas tem se tornado realidade, eles perceberam que essa solução é possível (PRIME, 2022).

Outro ponto importante que contribui para o crescimento da energia solar no segmento industrial é a questão ambiental. Por isso, as indústrias têm buscado soluções nas fontes alternativas de energia para aperfeiçoar o seu modelo energético e, nesse cenário, a energia solar tem saído na frente.

Além disso, a utilização de energia fotovoltaica nas fábricas e indústrias possibilita o recebimento de uma compensação pela produção de energia excedente e, até mesmo, incentivos fiscais. Esses incentivos são provenientes do ProGD (Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica) que foi criado no ano de 2015. Esse programa nasceu da necessidade de incentivar à geração de energia pelos próprios consumidores, a partir de fontes renováveis de energia (PRIME, 2022).

Um fator importantíssimo no estudo de viabilidade da implantação de um sistema solar fotovoltaico para essa classe é o horário de funcionamento da indústria. Normalmente, a maioria das indústrias tem o seu horário de atividade restrito ao período diurno, ou seja, coincide com o período de maior produção do sistema. Nesses casos, tem-se o cenário ideal. Em outros casos, em que o horário de atividade da indústria se estende para o período da noite, há os sistemas de reserva de carga que permitem armazenar a energia excedente – proveniente dos horários em que há

geração – em baterias. Essas baterias serão carregadas e servirá de fonte de geração nos períodos desfavoráveis (SOLAR, 2022).

Assim como nas residências e comércios, as indústrias permitem a instalação dos dois tipos de sistemas (*off-grid* e *on-grid*). Para tanto, cada caso deve ser analisado individualmente. Geralmente, a melhor opção de sistema para esse tipo de consumidor é o sistema *on-grid*, visto que, para um nível de tensão tão alto, o sistema *off-grid* demandaria um número elevado de baterias. Isso se traduz em um custo elevado e, conseqüentemente, aumentaria o tempo de retorno do investimento.

2.4 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

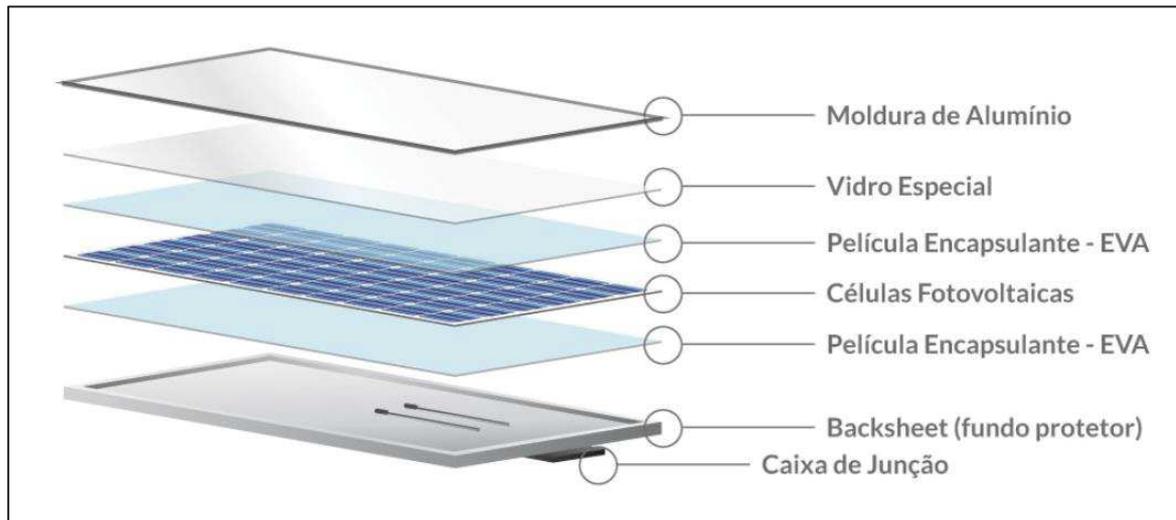
Nesta seção serão apresentados os principais componentes de um sistema fotovoltaico (*on-grid* e *off-grid*). Em suma, os principais são: módulos fotovoltaicos, inversor de frequência, string box, baterias e controlador de carga. Cada um deles serão detalhados a seguir.

2.4.1 Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico, também chamado de painel fotovoltaico, nada mais é do que um conjunto de células fotovoltaicas agrupadas sobre uma estrutura rígida e eletricamente conectadas entre si. Como situação práticas demandam um nível maior de tensão e essas células, individualmente, geram tensões muito baixas – da ordem de 0,60 V em horários ensolarados e sem nuvens –, faz-se necessário a associação em série de várias delas para que tensões maiores sejam obtidas. O uso de uma estrutura rígida na composição dos módulos se justifica pelo fato de que, por natureza, as células fotovoltaicas são sensíveis e necessitam de proteção mecânica.

Para fabricar um módulo fotovoltaico, é necessário uma série de cuidados. A Figura 10 apresenta um módulo com as suas principais camadas de encapsulamento.

Figura 10. Composição de um painel fotovoltaico.



Fonte: BlueSol.

Evidentemente, a célula fotovoltaica é o coração do painel. É ela a responsável por gerar o efeito fotovoltaico a partir de uma combinação físico-química que converte a radiação do sol em energia elétrica. Ela significa quase que 60% do custo de fabricação do módulo (SOLAR, 2022).

A camada de vidro é responsável por garantir proteção e resistência mecânica ao painel fotovoltaico e é desenvolvido para refletir o menos possível, mantendo um alta grau de transparência para que o máximo de radiação passe através dele. Ele significa aproximadamente 10% do custo do painel (SOLAR, 2022).

As células precisam estar encapsuladas em lâminas plásticas transparentes, de modo a bloquear o contato direto com a lâmina de vidro que reveste a parte superior. Para isso, é utilizado um filme encapsulante, tradicionalmente chamado de EVA (acetato-vinilo de etileno, que deriva do inglês Ethylene Vinyl Acetat). Além de bloquear o contato com a lâmina de vidro, esse filme garante proteção contra o envelhecimento, de modo que o máximo de radiação incida sobre as células. Ele representa cerca de 8% do custo do módulo (SOLAR, 2022).

Nas costas do módulo, é colocado um fundo protetor chamado de *backsheet*. Ele será responsável por garantir isolamento elétrica e proteger os componentes internos do painel. Assim como o EVA, o *backsheet* representa uma parcela de 8% do custo de fabricação do painel (SOLAR, 2022).

Uma das partes mais importante do módulo é a caixa de conexões elétricas, conhecida como caixa de junção. Ela é instalada na parte de trás do painel onde são

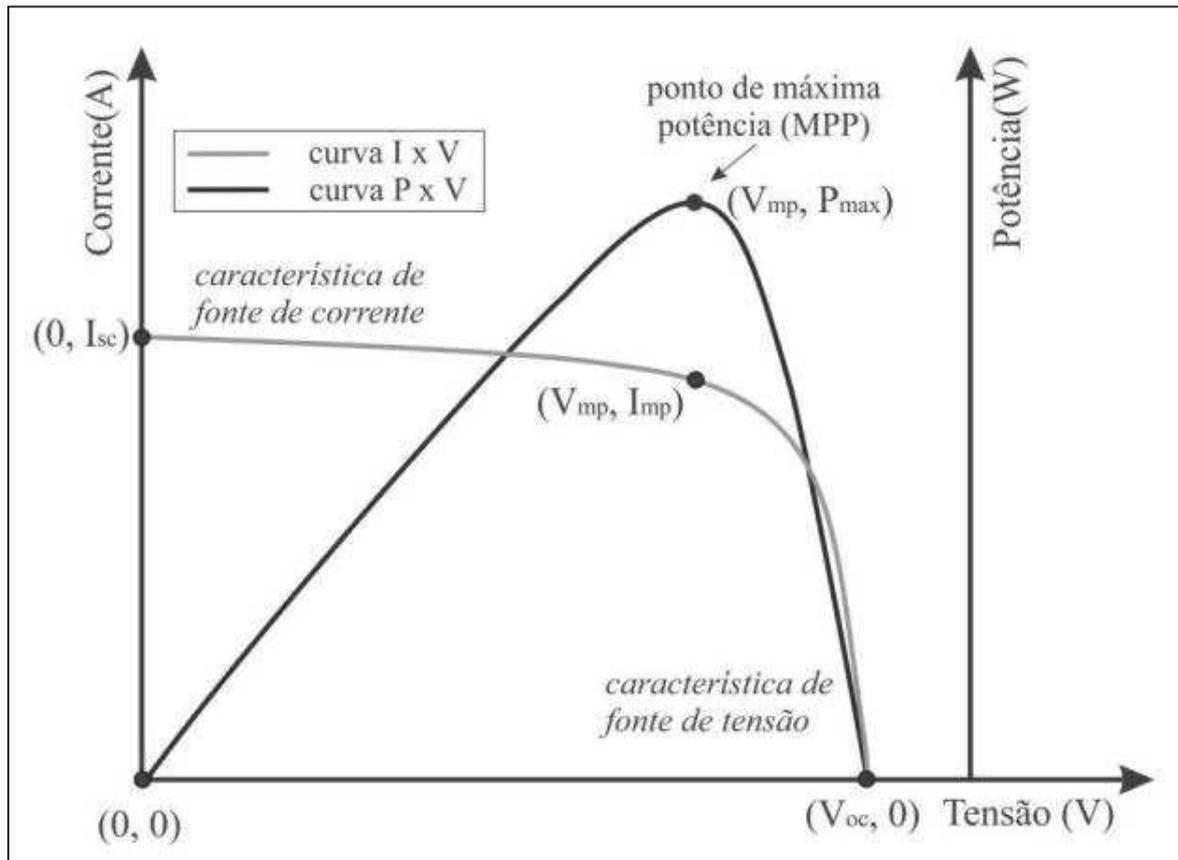
conectados os cabos de saída. Ela configura aproximadamente 6% do valor do painel fotovoltaico (SOLAR, 2022).

Por fim, o módulo é revestido com uma moldura de alumínio, a fim de garantir a robustez e a integridade do mesmo. Ela não compromete o peso do módulo e assegura que as células não danifiquem com o tempo. Essa moldura equivale à cerca de 8% do custo do módulo (SOLAR, 2022).

Os painéis fotovoltaicos são dotados de duas características muito importantes – as curvas de corrente versus tensão e potência versus tensão, como mostra a Figura 11. Essas curvas são traçadas em laboratórios com ambiente controlado à determinadas condições de temperatura e irradiação. A partir delas, é possível estabelecer parâmetros fundamentais dos painéis, tais como:

- I. **Corrente de curto-circuito (I_{sc})** – representa a máxima corrente fornecida pelo módulo. É obtida a partir de um curto-circuito em seus terminais;
- II. **Tensão de circuito aberto (V_{oc})** – representa a tensão máxima fornecida pelo painel na ausência de carga. É obtida quando o módulo está com os seus terminais abertos;
- III. **Corrente de máxima potência (I_{mp})** – representa a corrente gerada pelo painel quando o mesmo fornece sua máxima potência;
- IV. **Tensão de máxima potência (V_{mp})** – representa a tensão gerada pelo painel quando o mesmo fornece sua máxima potência;
- V. **Ponto de máxima potência (P_{mp})** – representa a potência máxima que um painel pode fornecer, sob determinada condição de irradiância solar.

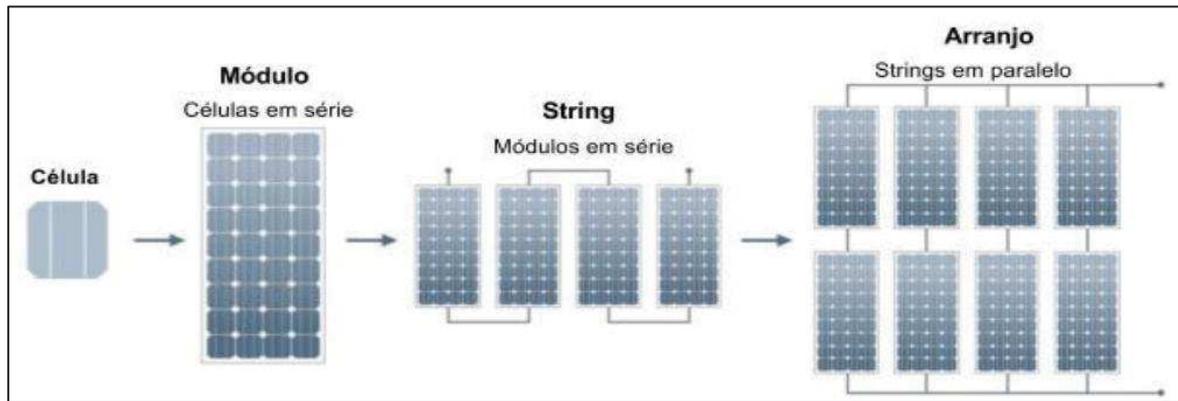
Figura 11. Curvas características de um painel fotovoltaico (I x V e P x V).



Fonte: Carlette, 2015.

Como já foi dito anteriormente, o painel fotovoltaico surgiu a partir de uma associação em série de várias células fotovoltaicas para que maiores tensões fossem atingidas. Ainda assim, para instalações reais de sistemas fotovoltaicos, apenas um módulo não é o suficiente, pois os níveis de tensões necessários são ainda maiores. Para isso, os módulos devem ser associados em série de tal forma que, somados, alcancem o nível de tensão adequado. À essa associação de módulos se dá o nome de *string* e, ao conjunto de *strings*, se dá o nome de arranjo fotovoltaico, como mostra a Figura 12.

Figura 12. Configuração de um sistema fotovoltaico típico.



Fonte: Mascarello, 2017.

2.4.2 Inversor de Frequência

O inversor de frequência é o equipamento do sistema fotovoltaico responsável por converter a corrente contínua, gerada pelo arranjo, em corrente alternada adequada às cargas. Ele é dimensionado de acordo com a potência máxima do sistema fotovoltaico e com a tensão máxima de entrada advinda dos painéis. A depender da complexidade do sistema, o inversor pode receber energia elétrica de apenas um módulo (microinversor), de apenas uma *string* (quando a tensão de um único módulo é inferior a tensão de entrada do inversor) ou de várias *strings* (FERNANDES, 2018).

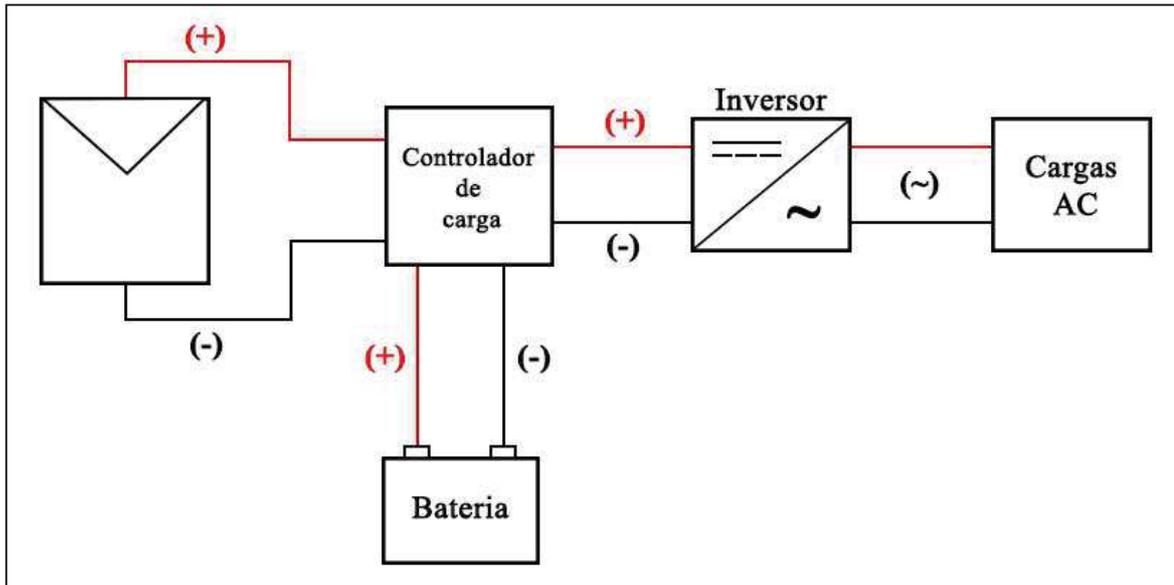
O inversor, além de converter corrente alternada em corrente contínua, tem a função de rastrear o ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) do arranjo fotovoltaico. A partir do produto da máxima corrente e máxima tensão fornecidas pelo módulo, o inversor consegue identificar o ponto MMPT, de forma que o aproveitamento da energia extraída dos módulos seja máximo.

Os inversores podem ser classificados em dois tipos:

- **Inversores isolados** – convertem corrente contínua em corrente alternada, sem precisar estar conectado na rede elétrica da concessionária;
- **Inversores conectados à rede** – convertem corrente contínua em corrente alternada, com forma de onda igual à da energia elétrica abastecida pela concessionária.

O inversor autônomo, utilizado em sistemas fotovoltaicos isolados, é conectado entre as cargas e o controlador de carga, como mostra a configuração abaixo:

Figura 13. Configuração de um sistema fotovoltaico isolado com armazenamento de energia e inversor.



Fonte: Fernandes (2018).

Já os inversores conectados à rede, como o próprio nome indica, necessita da rede da concessionária para operar. Como ele precisa funcionar com forma de onda igual à da rede elétrica, é necessário que os seus parâmetros sejam verificados constantemente para garantir que ele trabalhe em sincronismo com a rede. Por esse motivo, eles não precisam ser instalados com baterias e controladores de carga.

As principais características desses inversores são:

- **Corrente contínua máxima de entrada:** valor máximo de corrente que a entrada do inversor admite;
- **Tensão contínua máxima de entrada:** valor máximo de tensão que a entrada do inversor admite;
- **Potência de corrente contínua na entrada:** máxima potência que o inversor admite na sua entrada;
- **Potência de corrente alternada na saída:** máxima potência que o inversor admite na sua saída para injetar na rede;
- **Tensão de operação na conexão com a rede:** valor de tensão nominal de saída do inversor;

- **Quantidade máxima de *strings* na entrada:** número máximo de *strings* que podem ser conectadas na entrada do inversor;
- **Quantidade de entradas independentes com MPPT:** número de entradas com MMPT do inversor;
- **Frequência da rede elétrica:** frequência nominal de saída do inversor;
- **Consumo de energia parado:** quanto o inversor consome de potência quando o mesmo está com ausência de carga;
- **Rendimento:** quanto é aproveitado da energia extraída pelos painéis.

2.4.3 *String Box*

Logicamente, qualquer instalação elétrica precisa estar de acordo com normas pré-estabelecidas. No caso de sistemas fotovoltaicos, uma série de normas norteiam as condições necessárias na hora do projeto, dentre as quais duas se destacam: a NBR 5410 e a NBR 16690. Essas duas normas preveem que as instalações fotovoltaicas devem ter, como princípios básicos, a proteção contra sobrecorrente e sobretensão, proteção contra choques elétricos, proteção contra incêndios e efeitos térmicos e capacidade de seccionamento (SOLAR, 2019).

Diante disso, a *String Box* é um quadro de proteção, instalado separado do quadro geral de distribuição, que conecta os cabos vindos do arranjo fotovoltaico ao inversor. Ele é responsável por proteger o inversor e o arranjo contra sobrecorrente e sobretensão e realizar o seccionamento do circuito.

A *String Box* é composta basicamente por um invólucro – para proteger as conexões elétricas e os dispositivos de proteção –, um dispositivo seccionador – para conectar e desconectar a parte CC do sistema fotovoltaico –, um DPS – para proteção contra sobretensão –, um disjuntor ou fusível – para proteção contra e sobrecorrentes – e, logicamente, cabos CC (SOLAR, 2019). Em casos que as chaves seccionadoras já vêm instaladas no inversor, a *String Box* só será composta por disjuntor e DPS's.

2.4.4 Baterias

De modo geral, as baterias são um conjunto de pilhas que, associadas em série, são capazes de armazenar e produzir energia elétrica por meio de reações de oxidação e redução (EDUCAÇÃO, 2022).

Para aplicações em sistemas fotovoltaicos autônomos, a bateria não será responsável pela produção de energia elétrica, mas apenas armazenamento. Desse modo, ela pode ser considerada o pulmão do sistema *off-grid*, pois terá a função de garantir a entrega permanente de energia elétrica ao consumidor, mesmo na ausência de sol.

A aplicação de baterias em sistemas fotovoltaicos demanda um longo período de descarga, por isso as mais recomendadas são as baterias estacionárias. Uma bateria automotiva, por exemplo, gera uma corrente muito alta para a partida do carro, porém por um curto intervalo de tempo, o que torna a sua utilização inviável na geração de energia solar (ENERGIA, 2022).

Resumidamente, as principais características a serem observadas numa bateria são: eficiência, capacidade e potência e profundidade de descarga. Desse modo, as baterias mais utilizadas em projetos fotovoltaicos isolados são as de chumbo-ácido, níquel-cádmio e íons de lítio.

As baterias de chumbo-ácido podem ser consideradas as baterias mais antigas presentes no mercado. Elas surgiram no século XIX e têm em sua composição dois eletrodos – um de dióxido de chumbo em pó e outro de chumbo esponjoso. Por serem mais antigas, elas se apresentam muito grandes e pesadas e com menor durabilidade, não permitindo grandes ciclos de carga e descarga (ENERGIA, 2022).

As de níquel-cádmio, por sua vez, são mais robustas e apresentam ciclos de carga e descarga maiores. No entanto, por ter um material tóxico como o cádmio em sua composição, elas se mostram problemáticas quando se pensa em descarte ao final da sua vida útil (ENERGIA, 2022).

Atualmente, as baterias mais utilizadas em projetos de sistemas fotovoltaicos são as de íons de lítio. Se comparadas aos dois tipos anteriores, as baterias de íons de lítio se mostram bem mais duradouras, com maior capacidade de armazenamento de energia e velocidade de carregamento.

É muito difícil que, num sistema fotovoltaico, apenas uma bateria seja utilizada. Os níveis de tensão e capacidade necessários são muito maiores do que o fornecido

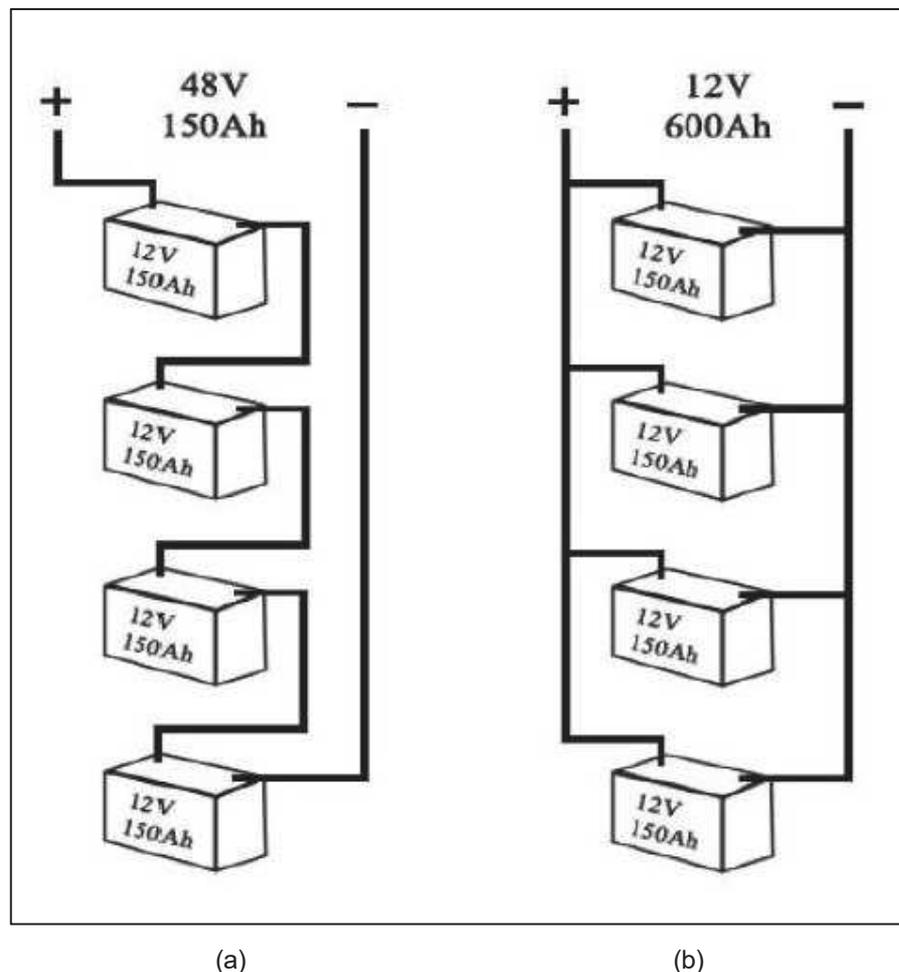
por apenas uma delas. Para isso, é realizada a associação de várias baterias. À associação de baterias, dá-se o nome de banco de baterias.

Essa associação pode ser feita de duas maneiras:

- **Associação série:** nesta associação, o polo negativo de uma bateria deve ser conectado ao polo positivo da bateria subsequente. Isto faz com que as tensões sejam somadas, porém mantendo o mesmo nível de capacidade.
- **Associação paralela:** nesta associação, a conexão é feita entre os polos de mesma polaridade. Para esta configuração, as capacidades se somam, no entanto, as tensões não se alteram.

A Figura 14 ilustra as duas configurações:

Figura 14. Associação em série (a) e em paralelo (b) de baterias.



Fonte: Fernandes (2018).

2.4.5 Controlador de Carga

O controlador de carga é um dos equipamentos fundamentais de um sistema fotovoltaico isolado. Ele monitora o estado da bateria por meio de medições de tensão, possibilitando tomadas de decisões que protejam a mesma de sobrecarga ou descargas abruptas (SOLAR, 2022).

Quando o controlador detecta que o nível de carga da bateria atingiu o limite máximo, ele desliga o carregamento para evitar sobrecarga. Entretanto, os módulos fotovoltaicos continuam entregando potência às cargas. Se a demanda de energia aumentar tão significativamente, de forma que os módulos passem a fornecer uma potência menor que a potência das cargas, a bateria passa a trabalhar em conjunto com os módulos. Nesse instante, o nível de carga da bateria volta a cair e o controlador volta a admitir o carregamento da bateria (FERNANDES, 2018).

Quando há uma descarga abrupta da bateria, atingindo níveis prejudiciais a sua vida útil, o controlador de carga interrompe o fornecimento de energia para as cargas e só torna a fornecer quando a carga da bateria estiver num estado que não comprometa a sua vida útil.

Os controladores de carga se dividem em dois tipos: os paralelos e os em série. Os controladores de carga paralelos trabalham a partir da derivação da corrente dos módulos para uma carga dissipativa. Isto garante que a bateria se mantenha em seu limite de carga máxima. Já os controladores de carga em série, trabalham interrompendo a corrente que chega à bateria, de acordo com o nível de tensão (SOLAR, 2022).

Por derivar a corrente dos módulos para uma carga dissipativa, os controladores em paralelo podem causar aquecimento. Esta característica impõe limitações à sua capacidade de trabalho e, por isso, são indicados para sistemas fotovoltaicos de menor porte. Os controladores em série, por sua vez, não dissipam calor e, portanto, permitem maiores aplicações, envolvendo sistemas de maior porte (SOLAR, 2022).

Objetivamente, o dimensionamento de um controlador de carga deve atender uma condição: a corrente de curto-circuito dos módulos fotovoltaicos e a corrente exigida pelo consumo das cargas devem ser menores que a capacidade do controlador (SOLAR, 2022).

2.5 CONCEITOS TARIFÁRIOS

As modalidades tarifárias correspondem a uma série de tarifas aplicáveis à quantidade de energia elétrica consumida e à potência instantânea demandada, determinadas conforme do perfil do consumidor. De acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021, que estabelece as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, os clientes são classificados em grupos tarifários, a partir da demanda (kW) e do nível de tensão em que são atendidos pelas distribuidoras. Essa classificação se dá da seguinte maneira (ANEEL, 2021):

- I. **GRUPO A:** grupo composto de unidades consumidoras de média e alta tensão, maior ou igual a 2,3 kV, utilizando ramais trifásicos, ou que são atendidas por sistema de distribuição subterrâneo em tensão inferior a 2,3 kV. O grupo ainda é subdividido nos seguintes subgrupos:
 - a) Subgrupo A1: tensão de fornecimento igual ou maior que 230 kV;
 - b) Subgrupo A2: tensão de fornecimento entre 88 kV e 138 kV;
 - c) Subgrupo A3: tensão de fornecimento igual a 69 kV;
 - d) Subgrupo A3a: tensão de fornecimento entre 30 kV e 44 kV;
 - e) Subgrupo A4: tensão de fornecimento entre 2,3 kV e 25 kV; e
 - f) Subgrupo AS: tensão de fornecimento inferior à 2,3 kV, atendido por sistema de distribuição subterrâneo.

Por possuírem uma tensão de fornecimento acima de 2,3 kV, esses consumidores necessitam da utilização de um transformador, o que, por consequência, encarece sua tarifa. Normalmente, o grupo A inclui indústrias, *shoppings centers* e grandes edifícios comerciais.

- II. **GRUPO B:** grupo composto por unidades consumidoras de baixa tensão, menor que 2,3 kV (geralmente 380V ou 200V), utilizando ramais monofásicos, bifásicos ou trifásicos. Assim como o grupo A, esse grupo também é dividido em subgrupos:
 - a) Subgrupo B1: residencial;
 - b) Subgrupo B2: rural;
 - c) Subgrupo B3: demais classes; e
 - d) Subgrupo B4: iluminação pública.

Como já foi dito, são aplicadas diferentes tarifas para cada grupo de consumo. Nesta seção, só serão especificados os conceitos tarifários relativos ao grupo A – consumidor alvo deste trabalho.

Para este grupo, aplica-se a chamada tarifa binômia, a partir da Modalidade Tarifária Convencional e das Modalidades Tarifárias Horárias (Azul ou Verde). Os consumidores desse grupo pagam os custos referentes ao consumo (em R\$/kWh) e à demanda (em R\$/kW). As modalidades tarifárias Azul e Verde irão variar de acordo com a sua subclassificação e dependendo do período do dia ou época do ano. Essa diferenciação é feita com o intuito de incentivar o consumo de energia nos postos em que ela for mais barata.

Antes de especificar as duas modalidades, é importante estabelecer os conceitos de Horário de Ponta (P) e Horário Fora de Ponta (FP), Período Seco (S) e Período Úmido (U):

- **Horário de Ponta (P):** é o período do dia definido pela concessionária, composto por três horas consecutivas, normalmente a partir do final da tarde, com exceção dos sábados, domingos e feriados, levando em consideração as características do seu sistema elétrico.
- **Horário Fora de Ponta (FP):** é o período do dia composto por todas as (21) horas complementares àquelas estabelecidas no horário de ponta.
- **Período Seco (S):** período de sete meses consecutivos que englobam os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro. Nesse período as tarifas de consumo na ponta e fora de ponta são mais altas.
- **Período Úmido (U):** período de cinco meses consecutivos que engloba os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro a abril.

Essa divisão de horário de ponta e horário fora de ponta é feita pelas concessionárias com o objetivo de obter uma tarifa diferenciada, seja na demanda ou no consumo, e desestimular o consumo no horário de ponta, onde normalmente o consumo de energia elétrica é maior. Dessa maneira, a concessionária consegue evitar a sobrecarga da sua rede.

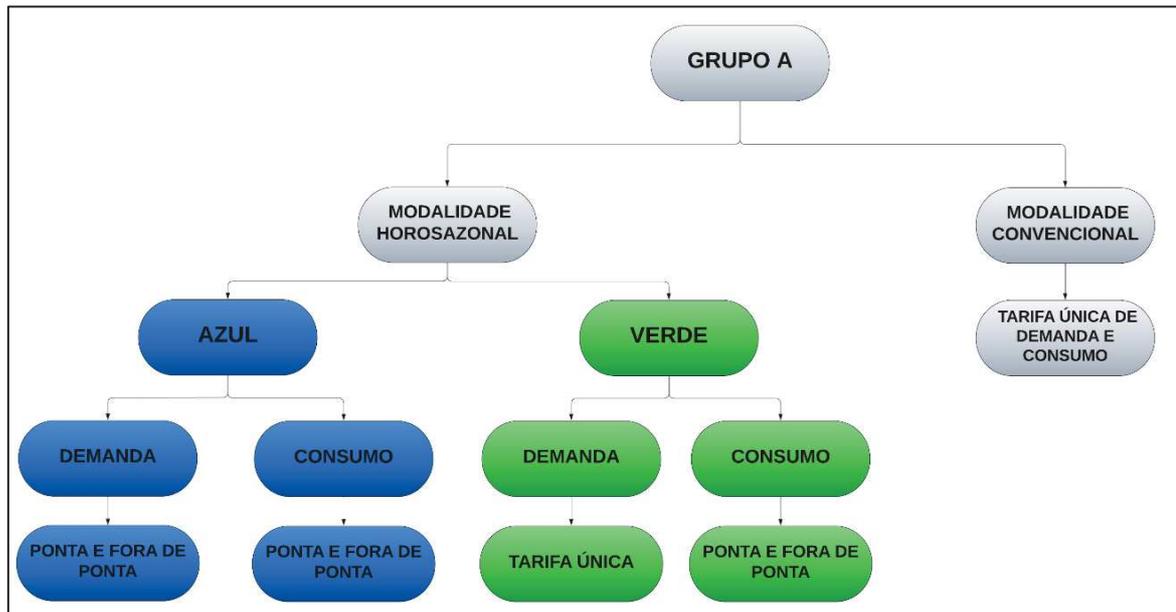
De posse desses conceitos, já é possível especificar as modalidades tarifárias aplicadas ao grupo A:

- **Modalidade Convencional:** são aplicadas tarifas de demanda (kW) e/ou consumo (kW/h) sem distinção do período do dia ou época do ano.
- **Modalidade Horária Azul:** são aplicadas tarifas diferenciadas de consumo de energia e de demanda de potência, de acordo com o horário de ponta e fora de ponta. Ela é disponibilizada para todos os subgrupos do grupo A, porém é aplicada, obrigatoriamente, a consumidores atendidos por tensão igual ou superior a 69 kV. Essa modalidade necessita de um contrato específico com a concessionária, acordando os valores das demandas contratadas para o horário de ponta e fora de ponta. Esses valores podem ser diferentes para períodos secos e períodos úmidos.
- **Modalidade Horária Verde:** são aplicadas tarifas diferenciadas de consumo de energia de acordo com o horário de ponta e fora de ponta e apenas uma única tarifa de demanda. Ela é disponibilizada apenas para consumidores atendidos em tensões inferiores a 69 kV e, além disso, requer um contrato específico com a concessionária, estabelecendo um valor de demanda contratada, independente do horário do dia (ponta ou fora de ponta). Assim como na modalidade azul, é permitido que sejam contratados valores diferentes de demanda, conforme o período do ano (seco ou úmido).

Apesar de possuir duas tarifas de demanda, a modalidade horária azul tem um consumo no horário de ponta mais barato que na modalidade horária verde. Ela costuma ser aplicada em unidades que consomem bastante energia no horário de ponta, como em hotéis, por exemplo.

Para definir a melhor tarifa a ser aplicada, cada consumidor deve ser analisado de forma particular, conforme a sua curva de carga. A Figura 15 resume as modalidades tarifárias aplicadas ao grupo A:

Figura 15. Modalidades tarifárias aplicadas ao grupo A.



Fonte: Autor Próprio (2022).

2.6 MÉTODOS PARA ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA

Para realizar a análise da viabilidade econômica e financeira de um projeto, é necessário aplicar alguns métodos nas projeções de fluxo de caixa. No projeto em questão serão aplicados três indicadores: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback*.

2.6.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido é um dos métodos mais utilizados para análise de viabilidade econômica de projetos. Ele consiste na concentração de valores esperados de fluxo de caixa no momento zero, descontado pela taxa média de atratividade (TMA) definida pelo investidor, que representa o custo de oportunidade dos valores investidos no projeto (LATA, D. R., 2019). Objetivamente, ele traz ao valor presente um valor futuro, permitindo uma estimativa do lucro sobre o investimento.

O VPL pode ser definido matematicamente de acordo com a Equação 1:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - FC_0 \quad (1)$$

Sendo:

FC_t = fluxo de caixa do t-ésimo período.

FC_0 = investimento inicial.

r = taxa mínima de atratividade (TMA).

n = período de tempo.

t = momento em que o fluxo de caixa aconteceu.

Os critérios de decisão do VPL são os seguintes:

- Se $VPL > 0$, o projeto é aceitado.
- Se $VPL < 0$, o projeto é recusado.

2.6.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno é outro método aplicado nas análises de investimentos. Ele consiste na taxa de desconto que iguala o VPL à zero, de tal forma que as entradas de capital igualem todas as aplicações. Desse modo, a TIR é uma forma de complementar a análise do VPL e reflete os rendimentos reais de um investimento em um determinado período de tempo.

Os parâmetros aplicados no seu cálculo são os mesmos aplicados para o VPL acrescidos da TIR, porém sem a TMA. A Equação 2 abaixo expressa a sua representação matemática:

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} = FC_0 \quad (2)$$

Os critérios de decisão da TIR são os seguintes:

- Se TIR for maior que a TMA, o projeto é aceito.
- Se TIR for menor que a TMA, o projeto é recusado.

2.6.3 Payback

O *payback* pode ser considerado o indicador financeiro mais trivial aplicado nas análises de investimentos. Ele é responsável por calcular o tempo de retorno de um investimento. Para encontra-lo, basta somar os valores dos rendimentos auferidos, período após período, até que essa soma se iguale ao valor do investimento inicial.

Há dois tipos de *payback*: o simples e o descontado. Como o simples não leva em consideração o valor do dinheiro no tempo sobre o fluxo de caixa, ele se mostra menos eficiente que o descontado. Esse, por sua vez, leva em conta fatores como inflação, taxa de juros, etc.

Sua expressão matemática se dá da seguinte forma:

$$FCD = \frac{FC}{(1 + r)^n} \quad (3)$$

Sendo:

FCD = fluxo de caixa descontado.

FC = fluxo de caixa.

r = taxa mínima de atratividade (TMA).

n = período de tempo.

3 SISTEMA FOTOVOLTAICO *ON-GRID* – ESTUDO DE CASO

O processo de dimensionamento de um sistema fotovoltaico *on-grid* compreende algumas etapas. São elas:

3.1 INFORMAÇÕES GERAIS DA UNIDADE CONSUMIDORA

A primeira etapa do dimensionamento de um SFCR consiste na coleta de informações da unidade consumidora. Para este trabalho, a UC que será objeto de estudo é uma indústria localizada na cidade de Esperança – PB, atendida pela concessionária Energisa Paraíba.

No que tange o fornecimento de energia, a indústria é atendida em média tensão – 13,8 kV. Desta forma, de acordo com o que foi dito na seção de conceitos tarifários, enquadra-se no subgrupo A4 – UC atendida por tensão de 2,3 kV a 25 kV. A modalidade tarifária aplicada a essa indústria é a tarifa binômica horo-sazonal verde (consumo na ponta + consumo fora de ponta + demanda única), com demanda contratada de 150 kW. A Tabela 3 resume as principais informações a respeito dessa indústria.

Tabela 3. Característica do consumidor industrial.

Unidade consumidora	Subgrupo A4
Município	Esperança
Estado	Paraíba
Concessionária	Energisa Paraíba
Tensão de atendimento	13,8 kV
Padrão de ligação	Trifásico
Modalidade tarifária	Horo-sazonal Verde
Demanda contratada	150 kW

Fonte: Autor próprio (2022).

3.2 DADOS SOLARIMÉTRICOS

Como se sabe, um dos fatores fundamentais na geração da energia solar é o índice de irradiação. Para obtê-lo, será utilizado o *software SunData v3.0*. Este programa foi desenvolvido pela CRESESB (Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) com o objetivo de ofertar um excelente instrumento para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

Para isso, é necessário acessar o *software* na página do CRESESB no endereço <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata> (CRESESB, 2022). No campo de “Coordenadas Geográficas” (Figura 16), deve-se inserir os dados de latitude e longitude do local. Esses dados podem ser obtidos facilmente utilizando os *softwares* do *Google Maps* ou *Google Earth*.

Figura 16. Coordenadas geográficas da UC.

Coordenada Geográfica

Latitude

Longitude

Sul ▼ Oeste

Norte:

graus decimais (00.00°)

graus, minutos e segundos (00°00'00")

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

Fonte: CRESESB (2022).

Após o preenchimento dos dados, o *SunData* retornou os seguintes valores de irradiação solar diária em cada mês do ano:

Figura 17. Irradiação solar média em Esperança – PB.

Cálculo no Plano Inclinado																
Estação: Esperanca Município: Esperanca, PB - BRASIL Latitude: 7,001° S Longitude: 35,849° O Distância do ponto de ref. (7,031728° S; 35,859254° O): 3,6 km																
#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,78	5,89	5,87	5,40	4,78	4,24	4,41	5,14	5,66	5,94	6,20	5,99	5,44	1,96
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	7° N	5,54	5,74	5,87	5,55	5,01	4,49	4,65	5,33	5,72	5,84	5,96	5,70	5,45	1,47
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	4° N	5,65	5,81	5,88	5,49	4,92	4,39	4,56	5,25	5,70	5,89	6,07	5,83	5,45	1,68
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	22° N	4,86	5,24	5,64	5,64	5,33	4,85	4,99	5,53	5,62	5,42	5,25	4,92	5,28	,79

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Esperança–Esperança, PB-BRASIL

Fonte: *SunData*, CRESESB (2022).

O sistema fotovoltaico deve ser dimensionado para a maior média anual de irradiação solar, portanto 5,45 kWh/m²-dia.

3.3 ANÁLISE DE CONSUMO

A análise de consumo e demanda desta indústria foi realizada com base nas medições mensais obtidas pelo próprio autor. A Tabela 4 traz os dados de consumo na ponta e fora de ponta, bem como as demandas medidas durante o período de 12 meses.

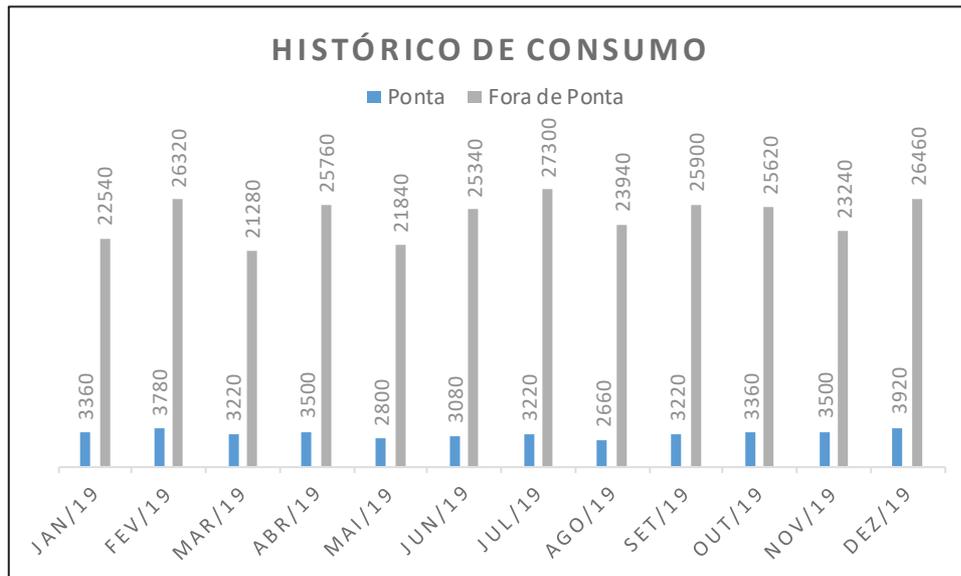
Tabela 4. Histórico de consumo da UC nos últimos 12 meses.

Mês/ano	Ponta		Fora de Ponta	
	Consumo faturado	Demanda medida	Consumo faturado	Demanda medida
Out/19	3.360	91,00	25.620	98,00
Set/19	3.220	74,20	25.900	96,60
Ago/19	2.660	86,80	23.940	98,00
Jul/19	3.220	82,60	27.300	93,80
Jun/19	3.080	72,80	25.340	93,80
Mai/19	2.800	84,00	21.840	91,00
Abr/19	3.500	86,80	25.760	89,60
Mar/19	3.220	88,20	21.280	88,20
Fev/19	3.780	88,20	26.320	86,80
Jan/19	3.360	85,40	22.540	93,80
Dez/18	3.920	86,80	26.460	98,00
Nov/19	3.500	91,00	23.240	95,20

Fonte: Autor próprio, 2022.

O Figura 18 ilustra graficamente a variação de consumo existente nesse intervalo de 12 meses nos dois postos tarifários.

Figura 18. Gráfico do histórico de consumo (ponta e fora de ponta).



Fonte: Autor próprio (2022).

Isto se traduz em um consumo médio de 3.301,67 kWh no horário de ponta e 24.628,33 kWh no horário fora de ponta.

3.4 DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO SISTEMA

Nesta etapa, deve-se considerar apenas três fatores: média de consumo no horário de ponta, média de consumo no horário fora de ponta e demanda contratada. O primeiro e o segundo foram determinados na seção anterior e o terceiro, como sabe, é informado diretamente na fatura e já foi apresentado na seção 3.1. Desta forma, já é possível dimensionar a potência total necessária para o sistema fotovoltaico. Para tal, é necessário ter em mente que a energia elétrica no horário de ponta é bem mais cara do que no horário fora de ponta. Desse modo, de acordo a Resolução Homologatória nº 2811 da ANEEL, para manter essa modalidade tarifária com geração distribuída, deve-se considerar um fator de ajuste (F_A) que regule a compensação dos créditos de consumo na ponta. Esse fator de ajuste é calculado da seguinte forma:

$$F_A = \frac{\text{Tarifa de Energia A4 Verde Fora Ponta (R\$/MWh)}}{\text{Tarifa de Energia A4 Verde Ponta (R\$/MWh)}} \quad (4)$$

Salienta-se que esses valores se referem ao custo da energia pura, e não às tarifas indicadas na fatura de energia elétrica. Esses valores podem ser obtidos no sistema da ANEEL, por meio do endereço <https://antigo.aneel.gov.br/resultado-dos-processos-tarifarios-de-distribuicao>. Substituindo as respectivas tarifas na Equação 4, tem-se que:

$$F_A = \frac{242,82}{397,62} = 0,611 \text{ kWh}$$

Definido esse fator de ajuste, o próximo passo é calcular o consumo corrigido, de acordo com a expressão a seguir:

$$C = \left(\frac{C_P}{F_A} \right) + C_{FP} \quad (5)$$

Onde:

C = Consumo corrigido;

C_P = Consumo na ponta (média);

F_A = Fator de ajuste;

C_{FP} = Consumo fora ponta (média).

Substituindo na Expressão 5 os parâmetros C_P e C_{FP} pelas médias dos consumos na ponta e fora ponta indicados na Tabela 4, tem-se:

$$C = \left(\frac{3.301,67}{0,611} \right) + 24.628,33$$

$$C = 30.032,05 \text{ kWh}$$

De posse de todos esses valores, já é possível determinar a potência do sistema fotovoltaico, a partir da Expressão 6 a seguir.

$$P_{wp} = \frac{C}{I_{rr} \cdot 30 \cdot F} \quad (6)$$

Onde:

P_{wp} = Potência do sistema;

C = Consumo corrigido;

I_{rr} = Radiação solar local;

F = Fator de performance do sistema; e 30 equivale aos dias do mês.

Sabendo que o índice de radiação solar local é de 5,45 kWh/m²-dia e considerando que o fator de performance do sistema é de 75% ($F = 0,75$), a potência máxima do sistema fotovoltaico será:

$$P_{wp} = \frac{30.032,05}{5,45 \cdot 30 \cdot 0,75} = 244 \text{ kWp}$$

Neste momento, deve-se atentar para o terceiro fator citado no início da seção – a demanda contratada. De acordo com a RN 482 da ANEEL, a potência total instalada do sistema fotovoltaico não deve ultrapassar a demanda contratada. Em casos como esse, costuma-se adotar as seguintes soluções:

- Solução 1: solicitar o aumento de demanda para 244 kWp junto à concessionária. Essa solução demandaria custos adicionais com reforma de subestação, troca de transformador, etc.;
- Solução 2: investir na implantação de mais uma usina fotovoltaica em um outro terreno, visando o autoconsumo remoto do excedente – desde que o terreno esteja incluído na mesma área de concessão;
- Solução 3: projetar o sistema fotovoltaico baseado no sobredimensionamento do inversor.

Para esta indústria, que já possui demanda contratada de 150 kW, será adotada a terceira solução. Neste caso, o sistema será projetado com dois inversores – de 100 kW e 75 kW, com sobrecarga de 50%. Sendo assim, será necessário solicitar o aumento de apenas 25 kW de demanda contratada e, portanto, sem custos adicionais significativos com reforma de subestação, já que a mesma subestação que atende à demanda de 150 kW, atende à demanda de 175 kW.

3.5 DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

A escolha do inversor é feita com base num parâmetro conhecido como FDI (Fator de Dimensionamento do Inversor). Na literatura, esse parâmetro é definido pela relação entre a potência de saída do inversor ($P_{s,inv}$) e a potência de pico do gerador fotovoltaico ($P_{p,gfv}$), de acordo com a Expressão 6.

$$FDI = \frac{P_{s,inv}}{P_{p,gfv}} \quad (6)$$

A predição do FDI leva em consideração muitos fatores, dentre eles a energia solar que incide na região, potência dos módulos e a área total do arranjo fotovoltaico (FOTOVOLT). Alguns estudos recentes mostram que, além desses fatores, o FDI sofre interferência da umidade relativa do ar e da consequência que a velocidade do vento afeta no desempenho dos módulos. Baseado nesses estudos, ficou definido que, para regiões de clima predominantemente tropical semiárido, valores de FDI maiores ou iguais a 1,0 viabilizam maiores produtividades média anuais de SFCR (F. FILHO, 2022).

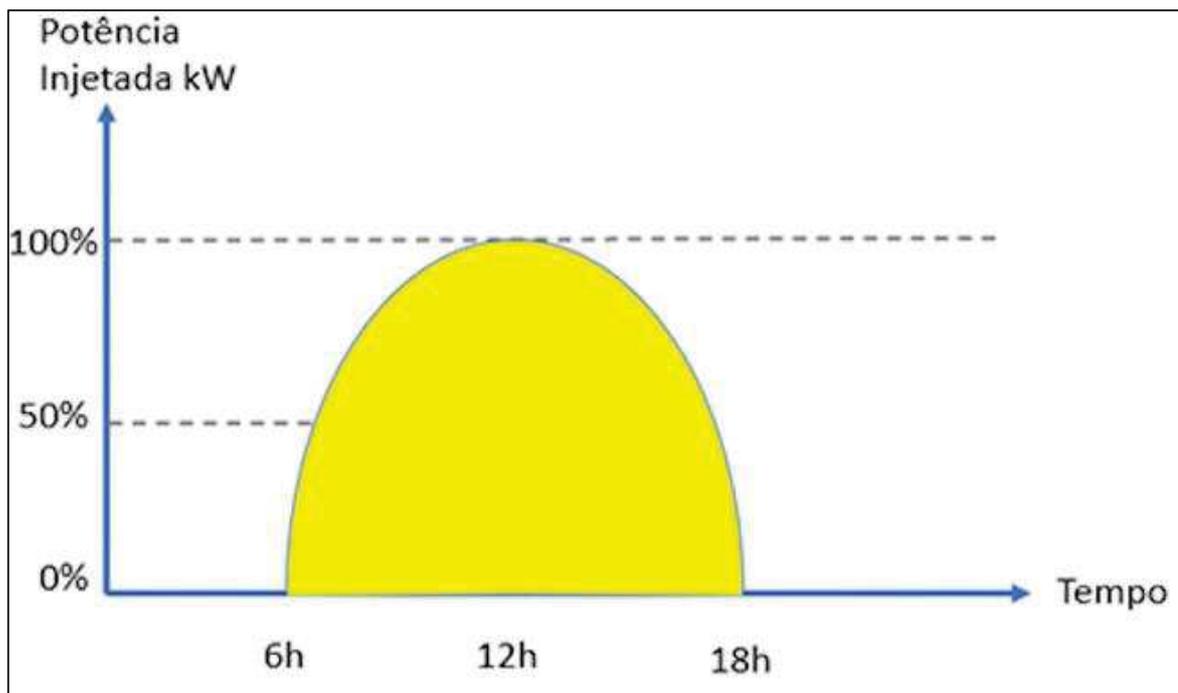
Partindo disso e sabendo que a potência máxima do sistema fotovoltaico é de 244 kWp, a solução, à primeira vista, para viabilizar a implantação do sistema, seria adotar um FDI unitário, ou seja, dimensionar um conjunto de inversores que, somados, entreguem 244 kW na sua saída. Do ponto de vista técnico, essa seria a solução mais indicada. Entretanto, num projeto dessa complexidade, deve-se analisar cada cenário e adotar aquele que entregue o melhor resultado com o melhor custo-benefício possível.

Sendo assim, a solução adotada foi projetar o sistema fotovoltaico com a potência nominal do inversor inferior à potência máxima fornecida pelos módulos. Essa prática é conhecida como *oversizing* (sobredimensionamento) (POWER, 2022). Como se sabe, os módulos de um sistema fotovoltaico atingem o limite máximo de potência em poucas horas do dia, ou seja, o inversor só opera com potência máxima durante curtos períodos.

Tomando, por exemplo, um arranjo de 8 módulos fotovoltaicos de 410 W, gerando 3.280 kWp, e um inversor de 3.280 W, tem-se um FDI unitário. Neste caso, sabe-se que os módulos não irão entregar 3.280 W ao inversor durante todas as horas

do dia. Esses módulos iniciarão sua curva de injeção de energia nas primeiras horas do dia – por volta das 6 horas da manhã, a depender do local – e, em algum período do dia, entregará ao inversor o seu limite máximo de potência (3.280 W), possibilitando que o inversor trabalhe na sua capacidade máxima. Após atingir esse pico de potência – normalmente ao meio dia –, a curva tende a decrescer, simulando o comportamento de uma parábola (Figura 19).

Figura 19. Curva de Potência Injetada x Horas do dia.



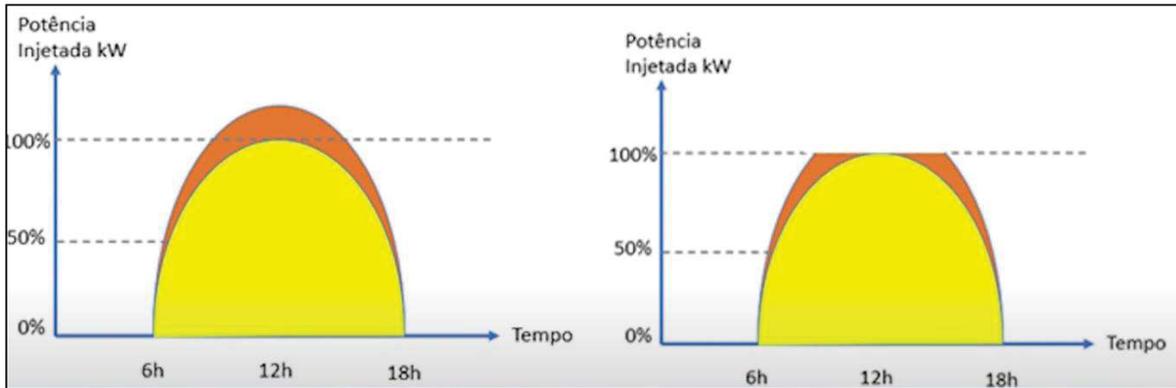
Fonte: E4 Energias Renováveis.

Quando o dimensionamento do sistema fotovoltaico baseado no *oversizing*, a curva de injeção tende a ser achatada. Isso significa que, as 6 horas, a quantidade de energia gerada pelas placas será maior do que seria no sistema sem sobredimensionamento, pois existirá uma quantidade maior de módulos gerando energia. Já no período do meio dia, ocorrerá o fenômeno conhecido como *clipping*, isto é, os módulos estarão gerando mais potência, porém a curva do inversor estará limitando essa potência ao nível da sua capacidade nominal (3.2280 W). Ao final da tarde, a injeção de potência no sistema também será maior, assim como no começo do dia, já que o sistema está projetado com um número maior de módulos.

Isto significa que, trabalhando em sobrecarga, o sistema fotovoltaico começa a produzir mais energia mais cedo e continua gerando mais energia até o final da tarde,

exceto no período de sol a pico, quando ocorre o *clipping*. Ou seja, o inversor injeta por um período maior a produção máxima de energia ao longo do dia, como mostra a Figura 20.

Figura 20. Curva de Potência Injetada x Horas do dia (com *oversizing*).



Fonte: E4 Energias Renováveis.

Baseado nisso, o inversor do sistema fotovoltaico desta indústria foi escolhido a partir da análise das sobrecargas dos inversores disponíveis no mercado. Após investigar várias marcas, optou-se por utilizar dois inversores da marca Solis – um de 100 kW e outro de 75 kW, ambos com sobrecarga de 50%. Esta solução se mostrou a mais viável, visto que o aumento da demanda contratada será de apenas 25 kW. Os *datasheet* dos mesmos estão apresentados no ANEXO A.

Tentou-se dimensionar um sistema com dois inversores de 75 kW – eliminando o investimento no acréscimo de demanda – porém nenhum deles apresentou um nível de sobrecarga capaz de compensar todo o consumo da indústria. Em alguns deles, apenas o consumo no horário fora de ponta seria zerado. Em outros, nem isso.

3.5.1 Influência do Inversor no Controle da Potência Reativa

A economia gerada ao cliente pela instalação de um sistema fotovoltaico se dá pela redução do fornecimento de energia ativa por parte das concessionárias. Entretanto, para clientes do grupo A, há uma particularidade a ser observada.

Uma instalação industrial, por exemplo, é composta por muitos motores que funcionam a partir do consumo de energia reativa. A queda do consumo de energia ativa, proporcionada pela instalação do sistema fotovoltaico, combinada à manutenção do consumo reativo nos horários de geração pode gerar cobranças

adicionais ao consumidor que devem impactar negativamente na viabilidade econômica do projeto.

Para solucionar este problema, existem duas opções: controle da potência reativa a partir da instalação de um banco de capacitores; e controle da potência reativa a partir da configuração dos inversores. Visando proporcionar o melhor custo benefício ao projeto, optou-se por trabalhar com a segunda opção, afinal a instalação de um banco de capacitores demandaria um investimento adicional significativo.

De acordo com a NBR 16149 (Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição), o sistema fotovoltaico com potência nominal maior que 6 kW pode operar com fator de potência igual a 1, ajustado em fábrica, com tolerância de trabalhar na faixa de 0,90 indutivo até 0,90 capacitivo. No mercado atual, os inversores já estão sendo fabricados com tolerância para trabalhar na faixa de 0,80 indutivo até 0,80 capacitivo, permitindo um grande alcance de configuração.

Assim, para este projeto, os inversores devem ser configurados para fornecer energia reativa à rede e, portanto, manter o fator de potência dessa instalação no limite desejável, evitando cobranças adicionais e contribuindo para viabilidade econômica do projeto. Desta forma, como o custo da energia reativa não será alterado após a instalação do sistema fotovoltaico, não será necessário incluí-lo no cálculo de retorno do investimento.

3.6 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os critérios de decisão que basearam o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos foram a potência do painel, confiabilidade da marca, desempenho, certificações do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), além do custo-benefício. Após avaliar todos esses fatores, foi decidido utilizar o painel monofacial da fabricante Canadian Solar, modelo Hiku. As suas principais especificações estão indicadas na Tabela 5.

Tabela 5. Especificações do módulo fotovoltaico.

Fabricante	Canadian Solar
Modelo	CANADIAN SOLAR HIKU 415W
Potência individual	415 W

Eficiência do módulo	18,79 %
Tensão de circuito aberto	47,8 V
Corrente de curto-circuito	11,14 A
Área	2,21 m ²
Dimensões	2,108×1048×40mm
INMETRO	Nota A

Fonte: Autor próprio (2022).

Sabendo que a potência individual de cada painel é 415 W, a quantidade necessária de painéis será:

$$\text{Quantidade de painéis} = \frac{\text{Potência do sistema}}{\text{Potência individual dos painéis}} \quad (7)$$

$$\text{Quantidade de painéis} = \frac{244 \text{ kWp}}{415 \text{ W}} = 587,95 = 588 \text{ painéis}$$

O *datasheet* do módulo está apresentado no ANEXO B.

3.7 CUSTOS COM O PROJETO

Para determinar os custos do sistema fotovoltaico, foi utilizado o site da fornecedora *Brassunny Energia Solar* (Figura 21). Baseado nos dimensionamentos da potência do gerador fotovoltaico, módulos e inversores, optou-se por um kit fotovoltaico com 244,02 kWp de potência de geração, contendo 588 módulos de 415 W e dois inversores – um de 100 kW e outro de 75 kW. A lista de matérias completa do kit está descrita na Tabela 6.

Figura 21. Plataforma da *Brassunny* Energia Solar.

Fonte: *Brassunny*.

Tabela 6. Lista de materiais.

Materiais	Qtd
MOD. FOTOV. CANADIAN HIKU POLY-PERC 415W (F: 35MM)	588
INV. SOLIS 100K- 5G - 380V	1
INV. SOLIS 75K-5G-380V	1
PAR CONECTOR MACHO / FEMEA - MC4	40
STRINGBOX BRASSUNNY SB09B - 4E/4S SECCIONADORA NO INVERSOR	5
STRINGBOX BRASSUNNY SB16D - 18E/18S	1
CABO SOLAR 6MM-1800V PRETO	1353
CABO SOLAR 6MM-1800V VERMELHO	1353
ESTRUTURA SOLO SPARKIN- 3,33M	2
ESTRUTURA SOLO SPARKIN EXPANSÃO-3,33M	96
KIT CONTRAVENTAMENTO ESTRUTURA SOLO - 3,33M	25

Fonte: Autor próprio (2022).

Este kit é vendido pelo valor de R\$ 896.120,41. Além disso, foi considerada a contratação de uma empresa integradora fotovoltaica responsável pelos serviços de projeto, instalação e homologação. Neste projeto, o custo desse serviço foi estimado no valor de 20% do valor do kit.

A depender da forma de pagamento ou financiamento, podem haver custos extras. Para esta análise, foi considerado um investimento à vista. A Tabela 7 descreve o custo total do sistema *on-grid* para essa indústria.

Tabela 7. Custos do projeto fotovoltaico *on-grid*.

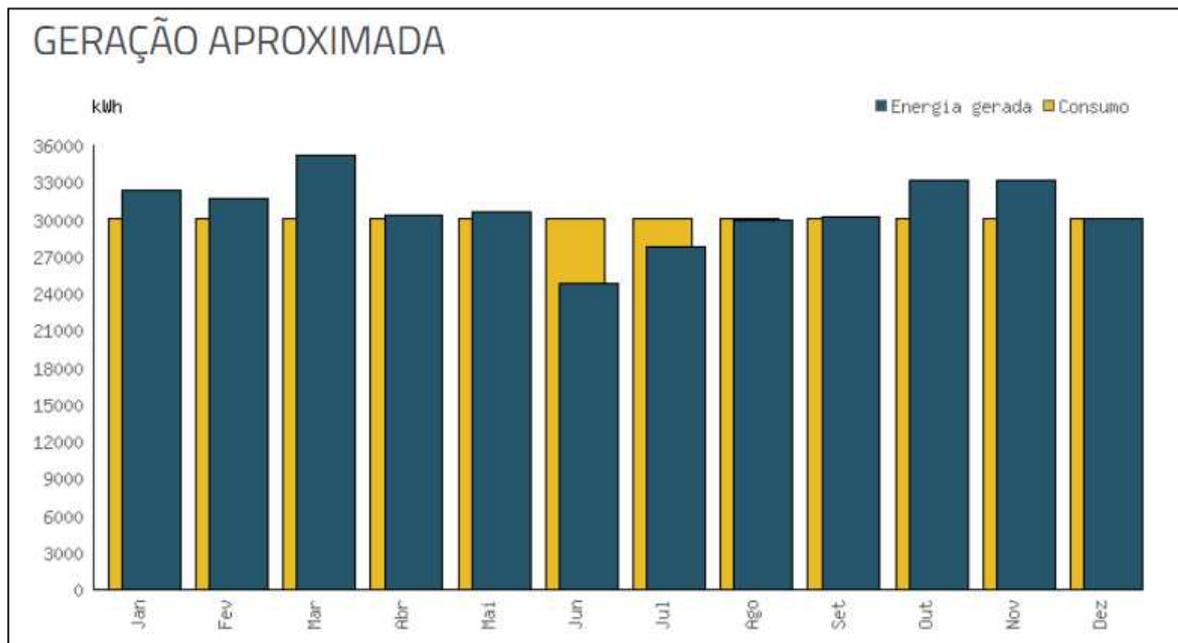
Item	Descrição	Qtd
Módulos		
	MOD. FOTOV. CANADIAN HIKU POLY-PERC 415W (F: 35MM)	588
Inversores		
	INV. SOLIS 100K- 5G - 380V	1
	INV. SOLIS 75K-5G-380V	1
Estruturas		
	ESTRUTURA SOLO SPARKIN- 3,33M	40
	ESTRUTURA SOLO SPARKIN EXPANSÃO-3,33M	50
	KIT CONTRAVENTAMENTO ESTRUTURA SOLO - 3,33M	1
Variedades		
	PAR CONECTOR MACHO / FEMEA - MC4	1353
	STRINGBOX BRASSUNNY SB09B - 4E/4S SECCIONADORA NO INVERSOR	1353
	STRINGBOX BRASSUNNY SB16D - 18E/18S	2
	CABO SOLAR 6MM-1800V PRETO	96
	CABO SOLAR 6MM-1800V VERMELHO	25
Serviços		
	PROJETO, INSTALAÇÃO E HOMOLOGAÇÃO	1
Valor Final		
	À vista	R\$ 1.075.344,49

Fonte: Autor próprio (2022).

3.8 CAPACIDADE DE GERAÇÃO DO SFCR

Para atestar que o sistema fotovoltaico compensa todo o consumo da indústria, foi utilizada uma ferramenta de cálculo disponibilizada no *site* da *Brassunny*. Após a simulação do sistema, o *site* retorna o quanto de energia será gerada ao longo dos meses do ano, além de outras informações, como mostram a Figura 22 e Tabela 8.

Figura 22. Energia Gerada x Consumo.



Fonte: Autor próprio.

Tabela 8. Informações do sistema.

Potência	244.02 kWp
Módulos	588
Área aproximada	1.293,6 m ²
Geração média anual	361.910,88 kWh
Geração média mensal	30.159,24 kWh
Consumo médio mensal	30.033,00 kWh
kWh/módulo	51,97
Localização	Esperança/PB

Fonte: Autor próprio (2022).

Pelo gráfico, percebe-se que, com exceção dos meses de junho e julho, a energia gerada mensalmente pelo sistema é capaz de compensar todo o consumo mensal da indústria. Já em junho e julho, o consumo será compensado a partir do excedente dos meses anteriores.

4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA OFF-GRID – ESTUDO DE CASO

A aplicação de sistemas fotovoltaicos isolados para o consumidor industrial apresenta algumas limitações. A primeira, sem dúvida, é de natureza técnica. Como se sabe, uma indústria opera diariamente com uma grande quantidade de motores elétricos de alta potência. Quando se fala em um sistema isolado alimentando cargas desse tipo, deve-se atentar para um ponto essencial: a corrente de partida, sejam esses motores monofásicos ou trifásicos (ENERGY, 2019).

Para colocar uma carga desse tipo em movimento, é necessário injetar uma corrente significativa nas bobinas do rotor. Estima-se que um motor, no instante de partida, demanda uma corrente de 6 a 10 vezes maior que a sua corrente nominal o que, por consequência, torna a sua potência – naquele momento – muito superior à sua potência nominal (ENERGY, 2019). Isto implica diretamente no projeto do sistema *off-grid*, pois alimentar motores de alta potência com energia solar fotovoltaica é uma tarefa inviável.

Sendo assim, se o projeto do sistema fotovoltaico *off-grid* já se mostra inviável do ponto de vista técnico, não faz sentido analisá-lo financeiramente. Entretanto, ainda que esse sistema apresentasse viabilidade técnica, os aspectos econômicos estariam comprometidos. Por trabalhar isoladamente, sem conexão com a rede elétrica, esse sistema demanda uma grande capacidade de autossustento que, por conseguinte, se reflete no custo do projeto, já que ele demanda a utilização de um grande banco de baterias.

No entanto, a inviabilidade total do sistema *off-grid* só é percebida se for adotado o cenário de compensação total do consumo. Uma alternativa que pode se mostrar viável é projetá-lo para funcionar apenas nos horários de ponta, quando a energia é muito mais cara. Desse modo, o sistema *off-grid* passa a funcionar controlado por um sistema automático que liga de segunda à sexta de 17h30 às 18h30 (horários de ponta). Para esta solução, recomenda-se que o sistema opere apenas nas pequenas cargas, como iluminação, pequenos sistemas de aquecimento – como climatizadores – e pequenos motores elétricos – como portão, cerca elétrica, central de alarme, internet, telefone, etc.

Tomando as cargas de iluminação desta indústria como exemplo e considerando um total de 70 lâmpadas – internas e externas – de 12 W, todas ligadas durante 5 horas do dia, chega-se a um consumo 4.200 Wh/dia. Esse consumo pode ser perfeitamente atendido por um kit fotovoltaico *off-grid* de 1.320 Wp (Figura 23).

Figura 23. Kit de geração fotovoltaica *off-grid* de 4.222 Wh/dia.



Kit Energia Solar Fotovoltaica 1.320Wp - até 4.222Wh/dia
Cód: OS0-1300-34

Seja o primeiro a avaliar este produto. Comparar

A partir de: R\$4.015,00

R\$3.814,25 (Kit básico)
R\$ 3.547,25 no PIX (7% de desconto)
R\$ 3.547,25 à vista no boleto (7% de desconto)
R\$ 3.623,54 à vista no cartão (5% de desconto)
6x R\$ 635,71 sem juros
Parcelado em até 12x

Painel Fotovoltaico *
4 x Painel Solar Fotovoltaico 330W - OSQA - DBA330-36-P +R\$3.074,20

Controlador de Carga *
1 x Controlador de Carga MPPT 40A 12/24V - Epever - XTR6 4210N +R\$740,05

Fonte: NeoSolar (2022).

Outra solução é alimentar as máquinas de pequeno porte com vários kits como o da Figura 24.

Figura 24. Kit de geração fotovoltaica *off-grid* de 3.600 Wh/dia.



Página inicial / Kit Energia Solar / Kit Energia Solar Off Grid /

Galeria

energy shop

3600Wh/dia

KIT ENERGIA SOLAR OFF GRID ATÉ 3600 WH/DIA (E-SMART)

0 de 5 ★★★★★ (0) Clique e veja!

DESTAQUE

LANÇAMENTO

Disponibilidade: Imediata

Por: **R\$ 11.088,90**
R\$ 10.645,34 à vista com desconto Boleto - Vindi
ou 8x de R\$ 1.606,78 com juros
ou 12x de R\$ 1.144,74 com juros

Fonte: NeoSolar (2022).

Além dessas possibilidades, também há a alternativa de uma adaptação do sistema, neste caso passando de um sistema inteiramente *off-grid* para um sistema híbrido que foi descrito na seção 2.3.4. Nesta solução, a indústria usaria a rede elétrica

da concessionária para alimentar os motores, suprimindo as correntes de partida necessárias e, quando os mesmos já estivessem em funcionamento, a parte autônoma do sistema assumiria a alimentação.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 PROJETO *ON-GRID*

Para que um projeto de um sistema fotovoltaico seja viável, é necessário que o mesmo atenda os aspectos técnicos e econômicos.

Do ponto de vista técnico, o projeto do sistema fotovoltaico *on-grid* se mostrou absolutamente viável para o estudo de caso deste trabalho. O espaço disponível da indústria possibilita que o sistema seja instalado no solo em perfeitas condições. Além disso, todos os cálculos de dimensionamento foram realizados de acordo com as condições estabelecidas pelas normas técnicas vigentes. Por último, ainda no cenário técnico, o sistema *on-grid* se mostrou capaz de compensar todo o consumo da indústria, sendo necessário apenas um ajuste de demanda contratada.

Da ótica financeira, para um projeto fotovoltaico se mostrar viável, é necessário que ele obedeça, fundamentalmente, as condições de *Payback*, VPL e TIR especificadas na seção 2.6. Para realizar tal análise, deve-se, primeiramente, considerar a modalidade tarifária a qual a indústria está inserida. Como se sabe, a indústria deste estudo de caso é tarifada na modalidade A4 verde e, portanto, cobrada pelo consumo nos dois postos tarifários e por uma única demanda. Analisando a fatura de energia, as tarifas de consumo (com impostos) aplicadas são as seguintes:

Tabela 9. Tarifas de consumo (com impostos inclusos) da Energisa Paraíba.

Tarifa por kWh de consumo na ponta	Tarifa por kWh de consumo fora de ponta
R\$ 2,661040	R\$ 0,373590

Fonte: Autor próprio (2022).

Para tornar a análise ainda mais precisa, será acrescida uma taxa média de 5% a cada 5 anos nos valores das tarifas. Este valor é baseado na média de reajustes tarifários aplicados ao grupo A nos últimos anos. A Tabela 10 traz a projeção dos custos anuais da indústria sem a implantação do SFCR. O valor de demanda foi determinado analisando a conta de energia. Salienta-se que os custos de iluminação pública não constam na projeção, já que o mesmo não tem relação com o sistema fotovoltaico.

Tabela 10. Projeção das faturas anuais sem SFCR ao longo de 25 anos.

Ano	Consumo anual na Ponta (kWh)	Consumo anual FP (kWh)	Tarifa na Ponta (R\$)	Tarifa FP (R\$)	Demanda anual contratada (R\$)	Fatura anual sem SFCR (R\$)
0	39.620,04	295.539,96	2,66104	0,37359	46.538,40	262.379,68
1	39.620,04	295.539,96	2,66104	0,37359	46.538,40	262.379,68
2	39.620,04	295.539,96	2,66104	0,37359	46.538,40	262.379,68
3	39.620,04	295.539,96	2,66104	0,37359	46.538,40	262.379,68
4	39.620,04	295.539,96	2,66104	0,37359	46.538,40	262.379,68
5	39.620,04	295.539,96	2,66104	0,39227	46.538,40	267.900,22
6	39.620,04	295.539,96	2,79409	0,39227	46.538,40	273.171,75
7	39.620,04	295.539,96	2,79409	0,39227	46.538,40	273.171,75
8	39.620,04	295.539,96	2,79409	0,39227	46.538,40	273.171,75
9	39.620,04	295.539,96	2,79409	0,39227	46.538,40	273.171,75
10	39.620,04	295.539,96	2,79409	0,39227	46.538,40	273.171,75
11	39.620,04	295.539,96	2,93379	0,41188	46.538,40	284.503,42
12	39.620,04	295.539,96	2,93379	0,41188	46.538,40	284.503,42
13	39.620,04	295.539,96	2,93379	0,41188	46.538,40	284.503,42
14	39.620,04	295.539,96	2,93379	0,41188	46.538,40	284.503,42
15	39.620,04	295.539,96	2,93379	0,41188	46.538,40	284.503,42
16	39.620,04	295.539,96	3,08049	0,43247	46.538,40	296.401,67
17	39.620,04	295.539,96	3,08049	0,43247	46.538,40	296.401,67
18	39.620,04	295.539,96	3,08049	0,43247	46.538,40	296.401,67
19	39.620,04	295.539,96	3,08049	0,43247	46.538,40	296.401,67
20	39.620,04	295.539,96	3,08049	0,43247	46.538,40	296.401,67
21	39.620,04	295.539,96	3,23451	0,454101	46.538,40	308.894,83
22	39.620,04	295.539,96	3,23451	0,454101	46.538,40	308.894,83
23	39.620,04	295.539,96	3,23451	0,454101	46.538,40	308.894,83
24	39.620,04	295.539,96	3,23451	0,454101	46.538,40	308.894,83
25	39.620,04	295.539,96	3,23451	0,454101	46.538,40	308.894,83

Fonte: Autor próprio (2022).

Analisando na fatura o histórico de demandas medidas, percebe-se que, durante os 12 meses, o valor se mantém muito próximo – aproximadamente 100 kW, mesmo com 150 kW de demanda contratada. Sendo assim, o aumento de demanda

para 175 kW será necessário somente para viabilizar a instalação do sistema fotovoltaico.

Sabendo disso, e conhecendo os valores das tarifas de demanda de potência medida e demanda de potência não consumida, é possível calcular o custo acrescido pelo aumento de demanda. A Tabela 11 traz os valores das duas tarifas (com tributos).

Tabela 11. Tarifas de demanda medida e demanda não consumida (com tributos).

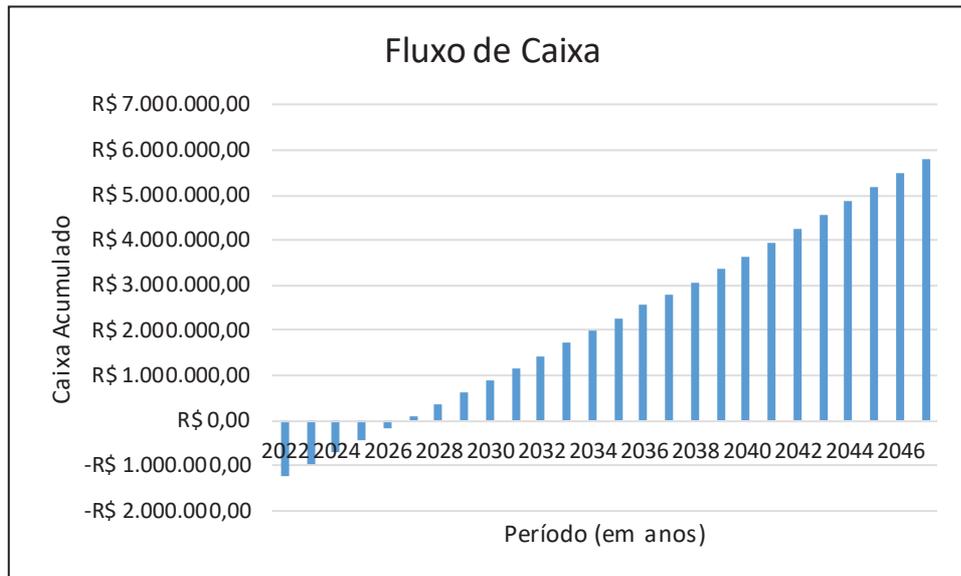
Demanda de potência medida	Demanda de potência não consumida
R\$ 28,367220	R\$ 20,925060

Fonte: Autor próprio (2022).

Desse modo, se a demanda medida está sempre próxima de 100 kW, tem-se um custo médio de R\$ 2.836,72 com a demanda de potência medida. Já os 75 kW restantes entram no cálculo da potência não consumida e, portanto, irão gerar um custo médio de R\$ 1.571,63. Isso significa que, após a instalação do SFCR, o cliente irá pagar R\$ 4.408,35 de demanda contratada por mês e R\$ 1.322.505,45 ao longo de 25 anos, R\$ 157.162,95 a mais do que pagaria pela demanda anterior de 150 kW. Somando esse valor ao custo total do projeto, tem-se um custo total de R\$ 1,232.507,44. Não será necessário o investimento em um novo transformador, já que a subestação (de 225 kVA) que atende os 150 kW de demanda contratada também atende uma demanda de 175 kW.

Para calcular o *payback*, VPL e TIR, foi utilizado o Excel. Para tal, foi considerado um tempo de vida do projeto de 25 anos, com 14% de perda de eficiência ao longo da vida e uma inflação anual de 5% a cada 5 anos. A TMA definida para esse investimento foi de 12% a.a., valor próximo à taxa Selic atual. O Figura 26 traz a análise gráfica do fluxo de caixa e a Tabela 12 detalha os seus valores

Figura 25. Análise gráfica do Fluxo de Caixa.



Fonte: Autor próprio.

Tabela 12. Fluxo de caixa anual pós implantação do SFCR.

Ano	Valor
0	-R\$ 1.232.507,44
1	-R\$ 970.127,76
2	-R\$ 707.748,07
3	-R\$ 445.368,39
4	-R\$ 182.988,70
5	R\$ 79.390,98
6	R\$ 347.291,21
7	R\$ 620.462,96
8	R\$ 893.634,71
9	R\$ 1.166.806,46
10	R\$ 1.439.978,20
11	R\$ 1.713.149,95
12	R\$ 1.997.653,37
13	R\$ 2.282.156,79
14	R\$ 2.566.660,21
15	R\$ 2.777.163,62
16	R\$ 3.061.667,04
17	R\$ 3.358.068,71

18	R\$ 3.654.470,38
19	R\$ 3.950.872,05
20	R\$ 4.247.273,72
21	R\$ 4.543.675,39
22	R\$ 4.852.570,22
23	R\$ 5.161.465,06
24	R\$ 5.470.359,89
25	R\$ 5.779.254,72

Fonte: Autor próprio (2022).

Foi contabilizado um custo adicional com os inversores no 15º ano, referente ao tempo de vida útil dos mesmos.

Analisando o fluxo de caixa, percebe-se que o fluxo de caixa se torna positivo a partir do 5º ano. Isto significa que o período de *payback* (descontado) se dá por volta de 5 anos, quando levado em consideração a inflação anual.

Já o VPL teve um resultado de R\$ 5.477.152,12, o que comprova que o investimento é viável.

Quanto à TIR, é possível constatar uma taxa de 21%, superior a TMA definida inicialmente. Este é mais um indicativo da viabilidade financeira do projeto. A Tabela 13 traz todos esses resultados.

Tabela 13. Análise financeira final do investimento.

Valor do investimento	R\$ 1.232.814,49
Tempo de vida do projeto	25 anos
Inflação	5% a cada 5 anos
Perde de eficiência ao longo da vida	14%
VPL	R\$ 5.477.152,12
TIR	21%
<i>Payback</i>	Em torno de 5 anos

Fonte: Autor próprio (2022).

5.2 PROJETO OFF-GRID

Como foi observado, os aspectos técnicos e econômicos do projeto de um sistema fotovoltaico *off-grid* se mostram comprometidos logo de início. Num cenário como esse, é inviável compensar todo o consumo da indústria com a implantação de um sistema fotovoltaico isolado.

Baseado na sugestão dos kits fotovoltaicos, é possível realizar uma análise financeira de retorno do investimento. Para tal, será tomado como exemplo o kit fotovoltaico *off-grid* de 1.320 kWp sugerido para compensação do consumo de iluminação.

Considerando a tarifa aplicada nos horários de ponta, é possível fazer a seguinte projeção de custos:

Tabela 14. Custo diário da indústria com iluminação.

Horário	Tarifa na ponta	Consumo (Wh/dia)	Custo (R\$/ ano)
18h - 19h	R\$ 2,661040	840	R\$ 804,70
19h - 20h	R\$ 2,661040	840	R\$ 804,70
20h - 21h	R\$ 2,661040	840	R\$ 804,70
Total		2.520	2.414,10

Fonte: Autor próprio (2022).

Portanto, a indústria economizaria um total de R\$ 2.414,10 por ano com a instalação de um kit fotovoltaico *off-grid* para o sistema de iluminação. Considerando o preço do kit (R\$ 3.814,25), o *payback* do investimento se daria em aproximadamente 2 anos. Essa economia pode parecer pequena se colocada no universo de gastos de uma indústria, porém se combinadas a outros kits fotovoltaicos *off-grid* – para suprimento de pequenas máquinas, por exemplo -, a economia pode ser tornar mais significativa.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo estudar a viabilidade, do ponto de vista técnico e econômico, da implantação de sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid* para um consumidor industrial. Baseado num estudo de caso, foi possível analisar o dimensionamento dos dois sistemas e obter conclusões seguras acerca da exequibilidade dos mesmos.

A análise econômica foi feita com base em três indicadores financeiros: *payback*, valor presente líquido e taxa interna de retorno. Para obter uma análise ainda mais fiel, foram consideradas condições inflacionárias que dão importância ao valor do dinheiro no tempo.

Diante disso, é possível afirmar que o sistema fotovoltaico *on-grid* se mostrou muito mais viável para este estudo de caso, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Se dimensionado da maneira devida, o projeto se mostra capaz de compensar todo o consumo da indústria e gerar o retorno do investimento em aproximadamente 5 anos.

7 TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho, vários trabalhos futuros podem ser realizados. Como sugestão, este trabalho cita duas possibilidades:

- Aplicar o mesmo estudo, mas do ponto de vista das novas definições estabelecidas pelo Novo Marco da Geração Distribuída (Lei nº 14.300), válido a partir de 7 de janeiro de 2023.
- Aplicar o mesmo estudo para outros estudos de caso, a partir de uma indústria com perfil de consumo diferente;
- Analisar a viabilidade da implantação de um sistema fotovoltaico híbrido.

REFERÊNCIAS

SOLAR, Canal. **O que é geração distribuída de energia elétrica?** Disponível em: <https://canalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 16 maio 2022.

DIAGNÓSTICO E PERSPECTIVAS PARA A MICROGERAÇÃO NO BRASIL. São Paulo: Revista Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2015.

PANORAMA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL. Rio Grande do Sul: Revista Brasileira de Energia Solar, 2016.

CONFAZ. **CONVÊNIO ICMS 16, DE 22 DE ABRIL DE 2015.** Disponível em: https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15. Acesso em: 25 maio 2022.

SOLAR, Canal. **Pagamento de ICMS para o setor solar deve ser obrigatório?** Disponível em: <https://canalsolar.com.br/pagamento-de-icms-para-o-setor-solar-deve-ser-obrigatorio/>. Acesso em: 25 maio 2022.

SOLAR, G5. **Qual a diferença entre sistema on grid e off grid?** Disponível em: <https://www.g5solar.com.br/post/qual-a-diferen%C3%A7a-entre-sistema-on-grid-e-off-grid>. Acesso em: 26 maio 2022.

ELYSIA. **História da energia solar: como surgiu essa tecnologia revolucionária?** Disponível em: <https://elysia.com.br/historia-da-energia-solar/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

SAUER, Ildo Luís. Energias renováveis: ações e perspectivas na Petrobras. **Bahia Análise & Dados**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 9-22, jun. 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENGENHARIA ELÉTRICA ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022. Marco legal da microgeração e minigeração distribuída. Brasília, 06 jan. 2022.

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

GSH. **Os 3 tipos de Sistemas Fotovoltaicos.** Disponível em: <https://www.gshengenharia.com.br/post/os-3-tipos-de-sistemas-fotovoltaicos>. Acesso em: 30 maio 2022.

MONTANHA, Valter A. Bortoloto André Souza Guilherme Goes Marcio A. Martins⁴ Murilo J. Berghe⁵ Gustavo Kimura. **GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR ON GRID E**

OFF GRID. In: 6ª JORNACITEC, 6., 2017, Botucatu. **GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR ON GRID E OFF GRID**. Botucatu: Fatec, 2017. p. 1-6.

ECOSOL. **ON-GRID E OFF-GRID: CONHEÇA AS VANTAGENS DESSES SISTEMAS**. Disponível em: <https://www.ecosolgeracao.com.br/post/on-grid-e-off-grid-conheca-as-vantagens-desses-sistemas>. Acesso em: 01 jun. 2022.

FOCUS. **O que é um sistema fotovoltaico híbrido e quais suas vantagens**. Disponível em: <https://www.focusenergia.com.br/o-que-e-um-sistema-fotovoltaico-hibrido-e-quais-suas-vantagens/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

PRIME, Solar. **7 vantagens de usar energia solar em indústrias e fábricas**. Disponível em: <https://solarprime.com.br/vantagens-energia-solar-em-industrias-e-fabricas/>. Acesso em: 29 jun. 2022.

SOLAR, Canal. **Instalações fotovoltaicas na indústria**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/instalacoes-fotovoltaicas-na-industria/>. Acesso em: 29 jun. 2022.

ENERGIA, Oca Solar. **Sistema Fotovoltaico Híbrido: Entenda o Que é e Suas Aplicações**. Disponível em: <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

SOLARYS, Neo. **Como funciona a energia solar?** Disponível em: <https://neosolarys.com.br/como-funciona-a-energia-solar/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

NEOSOLAR. **SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEUS COMPONENTES**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 02 jun. 2022.

EDUCAÇÃO, Mundo. **Baterias ou acumuladores**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/curiosidades/baterias-ou-acumuladores.htm>. Acesso em: 07 jul. 2022.

SOLAR, Portal. **Controlador de carga**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/controlador-de-carga>. Acesso em: 08 jul. 2022.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021**: Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.000-de-7-de-dezembro-de-2021-368359651>. Acesso em: 08 jun. 2022.

CARLETTE, L. P. Comparação de Algoritmos de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos como Carregador de Baterias. Monografia. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2015.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. 2022. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 01 ago. 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO M. A.; Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

ANEXO A – *DATASHEETS* DOS INVERSORES

Solis-(75-80)K-5G

Inversores Solis trifásicos



360 graus

Modelo:

380V: Solis-75K-5G Solis-80K-5G

Eficiência

- ▶ 9 MPPTs, eficiência máxima de 98,7%
- ▶ > 150% de relação CC/CA
- ▶ Compatível com módulos bifaciais

Inteligente

- ▶ Função SVG noturna
- ▶ Monitorização inteligente de string, varredura de curva IV inteligente
- ▶ Atualização remota de firmware com operação simples

Seguro

- ▶ IP66
- ▶ Proteção AFCI, reduz proativamente o risco de incêndio
- ▶ Recuperação de PID integrada para melhor desempenho do módulo (opcional)
- ▶ Componentes de marca reconhecidos globalmente para uma vida útil mais longa

Económico

- ▶ Comunicação por linha de energia (PLC) (opcional)
- ▶ Suporta conexão do tipo "Y" no lado CC
- ▶ Suporta acesso a fio de alumínio para reduzir custos

Folha de Dados

Modelo	Solis-75K-5G	Solis-80K-5G
Entrada CC		
Potência máxima de entrada	126 kW	
Tensão máx de entrada	1100 V	
Tensão nominal	600 V	
Tensão de partida	195 V	
Intervalo de tensão MPPT	180-1000 V	
Corrente máx de entrada	9*26 A	
Corrente máx de curto-circuito	9*40 A	
MPPTs / Número de Entradas	9/18	
Saída CA		
Potência nominal de saída	75 kW	80 kW
Potência nominal de saída a 40°C	75 kW	80 kW
Potência máx de saída aparente	75 kVA	88 kVA
Potência máx de saída	75 kW	88 kW
Potência máx de saída a 40°C	75 kW	88 kW
Tensão nominal da rede	3/N/PE, 220 V / 380 V	
Frequência nominal da rede	50 Hz / 60 Hz	
Corrente nominal de saída da rede	114 A	121.6 A
Corrente máx de saída	114 A	133.7 A
Fator de potência	> 0,99 (0,8 inicial - 0,8 atrasado)	
Harmônicas (THDi)	<3%	
Eficiência		
Eficiência máxima	98.7%	
Eficiência EU	98.3%	
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	CC Tipo II / CA Tipo II	
Monitoramento de rede	Sim	
Proteção de ilhamento	Sim	
Proteção de temperatura	Sim	
Monitorização de Strings	Sim	
Digitalização de curva I/V	Sim	
Recuperação PID integrado	Opcional	
AFCI integrado (proteção de circuito de falha de arco CC)	Sim ⁽¹⁾	
Interruptor CC integrado	Sim	
Interruptor CA integrado	Opcional	
Dados gerais		
Dimensões (L*A*P)	1050*567*314.5 mm (Com interruptor CA)	
Peso	82 kg	
Topologia	Sem Transformador	
Consumo próprio (noite)	<2 W	
Faixa de temperatura ambiente de operação	-25 ~ +60°C	
Umidade relativa	0-100%	
Grau de proteção (IP)	IP66	
Conceito de refrigeração	Refrigeração por ventilador redundante inteligente	
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 61000-6-2/-4	
Características		
Conexão CC	Conectores MC4	
Conexão CA	Terminal OT (máx 185 mm ²)	
Tela	LCD	
Comunicação	RS485, Opcional: Wi-Fi, GPRS, PLC	

(1) Ativação necessária.

Solis-(100-110)K-5G

Inversores Solis trifásicos



360 graus

Modelo:

380V: Solis-100K-5G Solis-110K-5G

Eficiência

- ▶ 10 MPPTs, eficiência máxima de 98,7%
- ▶ > 150% de relação CC/CA
- ▶ Densidade de rastreamento de alta potência 90MPPT/MW
- ▶ Compatível com módulos bifaciais

Inteligente

- ▶ Função SVG noturna
- ▶ Monitorização inteligente de string, varredura de curva IV inteligente
- ▶ Atualização remota de firmware com operação simples

Seguro

- ▶ Proteção AFCI, reduz proativamente o risco de incêndio
- ▶ Recuperação de PID integrada para melhor desempenho do módulo (opcional)
- ▶ SPD tipo I para CA (opcional)
- ▶ Volt-watt e tecnologia de supressão de corrente de fuga, baixa taxa de falhas
- ▶ Componentes de marca reconhecidos globalmente para uma vida útil mais longa

Económico

- ▶ Comunicação por linha de energia (PLC) (opcional)
- ▶ Suporta conexão do tipo "Y" no lado CC
- ▶ Suporta acesso a fio de alumínio para reduzir custos

Folha de Dados

Modelo	Solis-100K-5G	Solis-110K-5G
Entrada CC		
Potência máxima de entrada	150 kW	165 kW
Tensão máx de entrada	1100 V	
Tensão nominal	600 V	
Tensão de partida	195 V	
Intervalo de tensão MPPT	180-1000 V	
Corrente máx de entrada	10*26 A	
Corrente máx de curto-circuito	10*40 A	
MPPTs / Número de Entradas	10/20	
Saída CA		
Potência nominal de saída	100 kW	110 kW
Potência nominal de saída a 40°C	100 kW	110 kW
Potência máx de saída aparente	110 kVA	121 kVA
Potência máx de saída	110 kW	121 kW
Potência máx de saída a 40°C	110 kW	121 kW
Tensão nominal da rede	3/N/PE, 220 V / 380 V	
Frequência nominal da rede	50 Hz / 60 Hz	
Corrente nominal de saída da rede	152.0 A	167.1 A
Corrente máx de saída	167.1 A	183.8 A
Fator de potência	> 0,99 (0,8 inicial - 0,8 atrasado)	
Harmônicas (THDi)	<3%	
Eficiência		
Eficiência máxima	98.7%	
Eficiência EU	98.3%	
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	CC Tipo II / CA Tipo II (CA tipo I opcional)	
Monitoramento de rede	Sim	
Proteção de ilhamento	Sim	
Proteção de temperatura	Sim	
Monitorização de Strings	Sim	
Digitalização de curva I/V	Sim	
Recuperação PID integrado	Opcional	
AFCI integrado (proteção de circuito de falha de arco CC)	Sim ⁽¹⁾	
Interruptor CC integrado	Sim	
Interruptor CA integrado	Opcional	
Dados gerais		
Dimensões (L*A*P)	1065*567*344.5 mm	
Peso	91 kg	
Topologia	Sem Transformador	
Consumo próprio (noite)	<2 W	
Faixa de temperatura ambiente de operação	-25 ~ +60°C	
Umidade relativa	0-100%	
Grau de proteção (IP)	IP66	
Conceito de refrigeração	Refrigeração por ventilador redundante inteligente	
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 61000-6-2/-4	
Características		
Conexão CC	Conectores MC4	
Conexão CA	Terminal OT (máx 185 mm ²)	
Tela	LCD	
Comunicação	RS485, Opcional: Wi-Fi, GPRS, PLC	

(1) Ativação necessária.

ANEXO B – *DATASHEET* DO MÓDULO



HiKu

HIGH POWER POLY PERC MODULE

400 W ~ 425 W

CS3W-400 | 405 | 410 | 415 | 420 | 425P

MORE POWER



24 % higher power than conventional modules



Up to 4.5 % lower LCOE
Up to 2.7 % lower system cost



Low NMOT: 41 ± 3 °C
Low temperature coefficient (Pmax):
-0.36 % / °C



Better shading tolerance

MORE RELIABLE



Lower internal current,
lower hot spot temperature



Minimizes micro-crack impacts



Heavy snow load up to 5400 Pa,
wind load up to 3600 Pa*



Enhanced Product Warranty on Materials and Workmanship*



Linear Power Performance Warranty*

**1st year power degradation no more than 2%
Subsequent annual power degradation no more than 0.55%**

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2015 / Quality management system
ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system
ISO 45001: 2018 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730 / CE / MCS / INMETRO / UKCA
CEC listed (US California) / FSEC (US Florida)
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



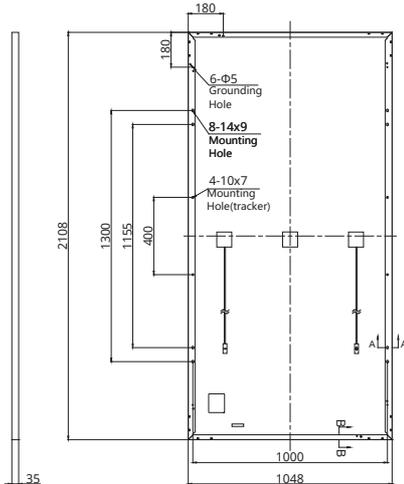
* The specific certificates applicable to different module types and markets will vary, and therefore not all of the certifications listed herein will simultaneously apply to the products you order or use. Please contact your local Canadian Solar sales representative to confirm the specific certificates available for your product and applicable in the regions in which the products will be used.

CSI Solar Co., Ltd. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. Canadian Solar was recognized as the No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in the IHS Module Customer Insight Survey, and is a leading PV project developer and manufacturer of solar modules, with over 55 GW deployed around the world since 2001.

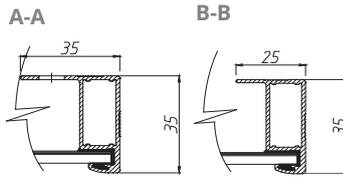
* For detailed information, please refer to Installation Manual.

ENGINEERING DRAWING (mm)

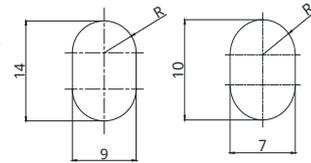
Rear View



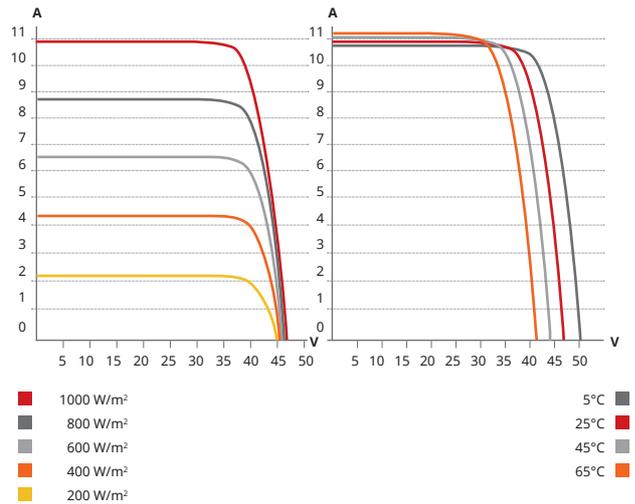
Frame Cross Section



Mounting Hole



CS3W-400P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS3W	400P	405P	410P	415P	420P	425P
Nominal Max. Power (Pmax)	400 W	405 W	410 W	415 W	420 W	425 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	38.7 V	38.9 V	39.1 V	39.3 V	39.5 V	39.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	10.34 A	10.42 A	10.49 A	10.56 A	10.64 A	10.71 A
Open Circuit Voltage (Voc)	47.2 V	47.4 V	47.6 V	47.8 V	48.0 V	48.2 V
Short Circuit Current (Isc)	10.90 A	10.98 A	11.06 A	11.14 A	11.26 A	11.29 A
Module Efficiency	18.1%	18.3%	18.6%	18.8%	19.0%	19.2%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 61730 1500V) or TYPE 2 (UL 61730 1000V) or CLASS C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	20 A					
Application Classification	Class A					
Power Tolerance	0 ~ + 10 W					

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline
Cell Arrangement	144 [2 X (12 X 6)]
Dimensions	2108 X 1048 X 35 mm (83.0 X 41.3 X 1.38 in)
Weight	24.3 kg (53.6 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm ² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	500 mm (19.7 in) (+) / 350 mm (13.8 in) (-) (supply additional cable jumper: 2 lines/pallet) or customized length*
Connector	T4 series or MC4-EVO2
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	660 pieces

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

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS3W	400P	405P	410P	415P	420P	425P
Nominal Max. Power (Pmax)	299 W	303 W	307 W	310 W	314 W	318 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	36.2 V	36.3 V	36.5 V	36.7 V	36.9 V	37.1 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.27 A	8.33 A	8.39 A	8.45 A	8.51 A	8.57 A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.5 V	44.7 V	44.8 V	45.0 V	45.2 V	45.4 V
Short Circuit Current (Isc)	8.79 A	8.85 A	8.92 A	8.98 A	9.08 A	9.10 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.36 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.28 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	41 ± 3°C

PARTNER SECTION



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

CSI Solar Co., Ltd.

199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com