

# **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

## **NO AGRONEGÓCIO DO PARANÁ**



**2025**

# **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

## **NO AGRONEGÓCIO DO PARANÁ**

### **AUTORES:**

Álvaro Alencar Peixoto  
Géremi Gilson Dranka  
Glaucio Pedro de Alcantara  
Gustavo Glatz  
Gustavo Reis  
Isadora de Seixas Souza Barrios  
Isadora Zanella Zardo  
Ivan Rossato Chrun  
Jorge Assade Leludak  
José Fernando Mangili Júnior  
Juliani Chico Piai Paiva  
Lucas Massao Jarosiski da Silva  
Luis Alfonso Gallego Pareja  
Matheus Lisarte Bezerra  
Mirella Augusto Rodrigues  
Murilo dos Santos Pazinatto  
Roberto Candido  
Rodrigo Manoel Aguiar Ferreira

## FICHA CATALOGRÁFICA

Energia solar fotovoltaica no agronegócio do Paraná [livro eletrônico]. -- 1. ed. -- Londrina PR : Gráfica Vereda 2025.  
PDF

Vários autores.

Bibliografia

ISBN 978-65-985485-7-5

1. Agronegócio 2. Energia solar 3. Energia solar fotovoltaica  
4. Energia - Fontes alternativas 5. Fontes energéticas  
renováveis 6. Paraná (Estado) - Aspectos ambientais.

25-304188.0

CDD-621.47

## **AGRADECIMENTOS**

Este livro é resultado de um projeto conduzido por diversas mãos, portanto é importante agradecer a todos os que contribuíram para que este fosse viabilizado.

Inicialmente é importante deixar o agradecimento a toda a Equipe da Fundação Araucária que através de Editais fomentou a criação e a consolidação dos NAPI's em todo o Estado do Paraná.

Também deve-se reconhecer nestes agradecimentos a toda a Equipe do IDR-PR, que oportunizou um tema relevante de estudo para o Estado do Paraná no programa RENOVA-PR, abrindo as portas de seus escritórios para que os pesquisadores pudessem mapear de forma estratégica os casos em todo território. Este agradecimento também deve ser estendido aos produtores que gentilmente abriram suas propriedades para realização dos estudos.

Finalmente um agradecimento especial a toda a equipe de pesquisadores e bolsistas, que permitiram a integração de três universidades importantes do Estado do Paraná (UTFPR, UEL e UEM) na proposta de uma solução importante ao projeto RENOVA-PR.

PROF. DR. ENG. ROBERTO CANDIDO  
COORDENADOR GERAL DO PROJETO  
UTFPR - CAMPUS CURITIBA

## **PREFÁCIO**

O desenvolvimento é meta de qualquer sociedade, portanto, buscada por todos seus integrantes, principalmente por gestores comprometidos com a melhoria da qualidade de vida das pessoas e o crescimento econômico sustentável. Para impulsionar os avanços da humanidade a Energia é fator indispensável, porém fortemente vinculada à sustentabilidade, diferente das condições da Primeira Revolução Industrial.

O Paraná conta com um grande número de Universidades e Instituições de Pesquisa, nas quais inúmeros pesquisadores desenvolvem novos conhecimentos e tecnologias que precisam estar à disposição da sociedade em curto espaço de tempo. Muitas pesquisas realizadas são convergentes e complementares, portanto, a interação e integração dos pesquisadores envolvidos em mesmas áreas se fazem necessárias. Porém, a distância física é um desafio no sentido de acelerar os processos inovativos no Estado. Com isso, a criação dos Novos Arranjos de Pesquisa e Inovação (NAPI's), pela Fundação Araucária, foi uma estratégia acertada, pois o incentivo a projetos em rede tem fortalecido o desenvolvimento de pesquisas e acelerado as respectivas aplicações pelo Paraná a fora.

O uso de fontes de energia limpa e barata é um caminho a ser percorrido em todas as atividades produtivas, e como já mencionado, vem sendo estudadas em diferentes frentes. Nesta óptica, se consolidou um grupo de Pesquisadores de três importantes Universidades do Paraná: a Universidade Estadual de Londrina, a Universidade Estadual de Maringá e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Curitiba e Pato Branco), denominado de NAPI SOLAR.

Formado o grupo, buscou-se uma linha de Estudo que pudesse aglutinar o interesse de pesquisa dos participantes e também gerar conhecimento aplicado à Sociedade Paranaense. As características econômicas do Estado apontaram que o Agronegócio seria um segmento importante a ser vinculado aos estudos de uso da

Energia Solar. Neste momento, a parceria com o Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-PR) foi indispensável, uma vez que, está em andamento um programa denominado de RENOVA-PR, que busca facilitar o acesso a pequenas Usinas Fotovoltaicas em propriedades rurais do Paraná, com uma meta ousada de 90.000 unidades até o ano de 2030.

O Programa RENOVA-PR é ousado em suas metas, porém ao final de 2030 o número de unidades geradoras será responsável por parte significativa da geração de energia paranaense, inclusive com impacto no sistema interligado. Desta forma, garantir que cada uma das unidades instaladas, gere o máximo de energia por mais tempo, é importante para o equilíbrio de contas das propriedades e também para estabilidade do sistema elétrico interligado.

A proposta de trabalho feita pelos integrantes do NAPI-SOLAR é de relevância inestimável, pois por meio de uma equipe de pesquisadores, composta por professores, alunos e interessados, elaborou uma metodologia de auditoria nas usinas instaladas no Programa RENOVA-PR que se aplicadas poderão evitar impactos negativos ao final da vida útil das placas componentes das usinas, hoje estimadas de 25 a 30 anos, se devidamente acompanhadas.

Em resumo, esta obra contribui para orientar os usuários de usinas fotovoltaicas a tirarem o máximo desempenho delas, impactando nos índices de lucratividade das propriedades rurais do Paraná a partir da geração limpa de energia, colocando o Estado na vanguarda destes processos e, portanto, abrindo novos mercados aos produtos. O Paraná agradece a todos os envolvidos nesta iniciativa.

RAMIRO WAHRHAFTIG  
PRESIDENTE DA FUNDAÇÃO ARAUCÁRIA

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: ENERGIA E SOCIEDADE .....</b>	<b>9</b>
1.1 A Energia e o Desenvolvimento Humano.....	9
1.2 Transição Energética.....	16
1.2.1 Transição Energética no Brasil.....	20
1.3 Energias Renováveis e o Agronegócio.....	21
<b>CAPÍTULO 2: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: APLICAÇÕES E CONFIGURAÇÕES.....</b>	<b>25</b>
2.1 Energia Solar Fotovoltaica no Mundo e no Brasil.....	25
2.1.1 Energia solar fotovoltaica no Brasil.....	32
2.1.2 Energia solar fotovoltaica no Paraná.....	37
2.2 Configuração e Tipos de Sistemas Fotovoltaicos.....	45
2.2.1 Componentes principais.....	45
2.2.2 Classificação dos sistemas fotovoltaicos.....	48
<b>CAPÍTULO 3: NORMAS E LEGISLAÇÕES.....</b>	<b>51</b>
3.1 Hierarquia da Legislação Brasileira.....	51
3.2 Normas e Legislações Brasileiras.....	54
3.3 Normativas e legislações do estado do Paraná.....	60
3.4 Normativas e legislações nos municípios.....	61
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISE DE FALHAS E TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>62</b>
4.1 Fatores que Afetam a Eficiência dos Sistemas Fotovoltaicos.....	62
4.1.1 Irradiância e sua influência na geração de energia elétrica..	63
4.1.2 Sujidade e acúmulo de detritos.....	63
4.1.3 Sombreamento.....	65
4.1.4 Ângulo de inclinação e orientação dos painéis fotovoltaicos.....	66
4.1.5 Efeito da temperatura sobre os módulos fotovoltaicos.....	67
4.1.6 Perdas na fiação elétrica.....	69
4.1.7 Sobrecarga de inversores (Overload).....	69
4.1.8 Mismatch entre módulos fotovoltaicos.....	71
4.1.9 Degradação das células FV ao longo do tempo.....	76
4.2 Inspeções.....	78
4.2.1 Inspeção Visual.....	78
4.2.1.1 Módulos Fotovoltaicos.....	78
4.2.1.2 Condutores, conexões e demais materiais.....	82

4.2.1.3 Aterramento.....	83
4.2.1.4 Equipamentos de conversão de energia elétrica.....	84
4.2.1.5 Microambiente local.....	85
4.2.2 Inspeção Termográfica.....	86
4.2.2.1 Módulos Fotovoltaicos.....	87
4.2.2.2 Condutores, conectores e demais materiais.....	88
4.2.2.3 Aterramento.....	90
4.2.2.4 Equipamentos de conversão de energia elétrica.....	92
4.2.3 Inspeção Elétrica.....	93
4.2.3.1 Inspeção anterior à energização da UFV.....	94
4.2.3.2 Inspeção durante o funcionamento da UFV.....	94
4.2.4 Inspeção Civil e Mecânica.....	99
<b>CAPÍTULO 5: METODOLOGIA DE AUDITORIA E EXPERIÊNCIAS DE CAMPO.....</b>	<b>100</b>
5.1 Premissas de Estudo.....	100
5.2 Organização Inicial.....	101
5.3 Desenvolvimento da Metodologia.....	105
5.3.1 - Primeira etapa.....	105
5.3.2 - Segunda etapa.....	107
5.4 Experiências de Campo e Recomendações.....	108
5.4.1 Acervo Documental Processual.....	108
5.4.2 Documentação Técnica.....	109
5.4.3 Operação e Manutenção.....	110
<b>CAPÍTULO 6: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A ENERGIA SOLAR NO AMBIENTE RURAL.....</b>	<b>117</b>
6.1 Desafios e Barreiras para a Expansão da Energia Solar Fotovoltaica.....	117
6.2 Oportunidades e Inovações para o Setor.....	119
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>144</b>
1.1 Formulário de Recebimento das Instalações Parte Produtor.....	143
1.2 Formulário de Inspeção Visual do Extensionista Parte Extensionista.....	147
1.3 Formulário de Laudo Técnico de Eficiência Parte Técnico.....	151



# **CAPÍTULO 1: ENERGIA E SOCIEDADE**

Neste capítulo são discutidas as relações entre a energia e o desenvolvimento da sociedade, examinando como a busca por fontes energéticas mais eficientes e abundantes moldou as civilizações. Um exemplo é a transição da sociedade agrícola para a industrial, que foi catalisada pela exploração de combustíveis fósseis e seu uso intensivo, culminando com a crise climática atual. Em seguida, apresentam-se os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e a importância das fontes renováveis de energia para promover a transição energética. Por fim, discute-se a oportunidade do uso de fontes renováveis no agronegócio, incluindo toda a sociedade em um modelo energético sustentável.

## **1.1 A Energia e o Desenvolvimento Humano**

Desde os primórdios da civilização humana, a busca por recursos energéticos tem sido fundamental para o desenvolvimento e a evolução das sociedades. A energia pode ser definida como a capacidade que um corpo ou substância possui de realizar trabalho ou de transferir calor. Para o ser humano, as necessidades energéticas estão em constante evolução, e desde os primórdios de sua existência, os homens têm lutado para encontrar e utilizar recursos energéticos que atendam às suas necessidades básicas de alimentação, calor, abrigo e outras (SOLOMON; KRISHNA, 2011).

A humanidade tem dependido de uma variedade de formas de energia, as quais têm evoluído e se transformado em resposta às necessidades em constante mudança e aos avanços tecnológicos. Essa evolução ocorre devido a diversos fatores, como escassez de recursos, preocupações ambientais e econômicas, e o progresso contínuo na inovação técnica, qualidade da energia e capacidade de armazenamento (SOLOMON; KRISHNA, 2011).

No início da história da humanidade, a principal fonte de energia era derivada das cadeias ecológicas. Nessas cadeias, a energia tem origem do Sol, que fornece energia aos vegetais, através da

fotossíntese. Esses vegetais, por sua vez, são eventualmente consumidos, fornecendo energia para os animais.

Vestígios indicam que os seres humanos começaram a utilizar o fogo há cerca de 1 milhão de anos (SMIL, 2008). No entanto, foi entre aproximadamente 200 mil e 50 mil anos atrás que o homem começou a cozinhar seus alimentos (JACOMY, 1990), o que possibilitou um consumo adicional de cerca de 2000 kcal por dia (COOK, 1971). Além disso, o domínio do fogo possibilitou aos seres humanos aquecer-se e estender suas atividades para além do pôr do sol (FONSECA, 1972).

O próximo marco ocorreu entre 10 mil e 8 mil anos atrás, impulsionado pelo desenvolvimento da agricultura e da pecuária. Esse avanço permitiu ao ser humano armazenar energia excedente (HÉMERY; BEBIER; DELÉAGE, 1993), possibilitando-lhe dedicar mais tempo a outras atividades (TESSMER, 2002).

As primeiras civilizações apareceram há cerca de 6 mil anos, marcando um período de grandes avanços no aproveitamento energético. Entre esses avanços, destacam-se a construção de bacias de retenção pela civilização egípcia, com o objetivo de estender as terras inundáveis, o desenvolvimento de carros de combate e carroças agrícolas, a construção de diques e canais para a navegação na Mesopotâmia, além do uso da força motriz proveniente de um grande número de escravos nas sociedades egípcia e romana. Outras inovações incluíram a utilização do vento como fonte de energia para a navegação de barcos à vela, bem como o aproveitamento energético da energia cinética dos cursos de água, da tração animal e da lenha (HÉMERY; BEBIER; DELÉAGE, 1993) (ANTHONY; TELEGIN; BROWN, 1991).

No século XV, moinhos de água e de vento já eram amplamente utilizados na Europa. Veleiros e carruagens, impulsionados pela força do vento ou por tração animal, serviam como meios de transporte. Nessa mesma época, a Inglaterra já empregava o carvão como fonte de calor para aquecimento (MATTICK; WILLIAMS; ALLENBY, 2010).

Na Inglaterra, no século XVIII, devido à escassez da madeira, iniciou-se um investimento significativo no carvão, que era mais abundante e barato, o que incentivou a evolução das máquinas a vapor. Embora as primeiras versões dessas máquinas tenham surgido durante o período de Alexandre, o Grande, foi por meio das adaptações realizadas por Thomas Newcomen e James Watt, na metade do século XVIII, que as máquinas a vapor modernas emergiram. Essas máquinas começaram a ser empregadas em diversas aplicações, como fábricas, locomotivas e navios, marcando o início da Primeira Revolução Industrial (CARVALHO, 2014).

O interesse pela aplicação da eletricidade surgiu entre os anos 1830 e 1840, inicialmente impulsionado pela sua utilização no telégrafo e na galvanoplastia na metalurgia. No entanto, foi somente por volta de 1880 que a eletricidade ganhou impulso significativo. Nesse período, Thomas Edison introduziu a primeira lâmpada incandescente de filamento comercialmente viável, enquanto Werner Siemens revelava a primeira locomotiva elétrica (CARVALHO, 2014). No final do século XIX, a energia elétrica era uma das principais fontes energéticas (TESSMER, 2002).

A indústria petrolífera moderna surgiu em 1847, na Escócia, quando o químico James Young descobriu que o petróleo podia ser extraído do carvão e xisto betuminoso, e a partir desta descoberta, criou processos de refinação que permitiram destilar diversos produtos, incluindo óleo leve para iluminação e óleo mais denso para lubrificação. O marco inaugural da indústria petrolífera ocorreu em agosto de 1859, quando o americano Edwin Laurentine Drake perfurou o primeiro poço de petróleo moderno na Pensilvânia, considerado o marco inicial dessa indústria (USP, 1999). Já por volta de 1965, o petróleo superou o carvão como principal fonte de energia primária, consolidando sua posição dominante no panorama energético global (RITCHIE; ROSEN; ROSADO, 2022).

A Segunda Revolução Industrial, por sua vez, foi marcada pelo emprego da energia elétrica e do petróleo como principais fontes de energia. Com o objetivo de suprir a crescente demanda por energia

elétrica na sociedade, foram desenvolvidas técnicas para geração de energia elétrica a partir de diversas fontes, incluindo a hidráulica, eólica, solar, nuclear, entre outras.

Por volta de 1880 também houve um aperfeiçoamento da turbina hidráulica para a geração de eletricidade, como uma alternativa à turbina a vapor. Em 1882, foi criada a primeira usina hidrelétrica, no Rio Fox, localizado em Wisconsin, Estados Unidos. Posteriormente, em 1895, foi construída a usina hidrelétrica das cataratas de Niágara, sendo a primeira a gerar energia elétrica em corrente alternada, permitindo transmitir eletricidade por grandes distâncias (IBERDROLA, 2022).

A energia eólica começou a ser utilizada para geração de eletricidade em 1888, quando o americano Charles F. Brush instalou um aerogerador de 12 kW em corrente contínua na cidade de Cleveland, EUA, para o carregamento de baterias. Contudo, esses sistemas inicialmente satisfaziam apenas demandas pequenas e isoladas. Somente em 1931, na Rússia, foi desenvolvido um aerogerador de corrente alternada conectado à rede elétrica (CRESESB, 2022).

Embora conhecida desde 1940, a energia nuclear carrega consigo uma dualidade intrínseca. A primeira usina nuclear comercial entrou em operação em 1955, em Calder Hall, Inglaterra. Por um lado, era associada a aspectos negativos devido à devastação causada pelas bombas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki no final da Segunda Guerra Mundial. Por outro lado, era reconhecida por seu potencial positivo em aplicações como radiofármacos e usos biomédicos dos radioisótopos (CARVALHO, 2014). Apesar dessa dualidade de percepções, a energia nuclear experimentou um rápido crescimento em investimentos até a década de 1970. Entretanto, a partir desse período, novos investimentos foram paralisados devido à oposição da opinião pública, motivada pelos graves acidentes ocorridos em Three Mile Island, em 1979, e em Chernobyl, em 1986. Além disso, os elevados investimentos associados à construção de usinas nucleares também contribuíram para essa desaceleração (BRASIL, 2009).

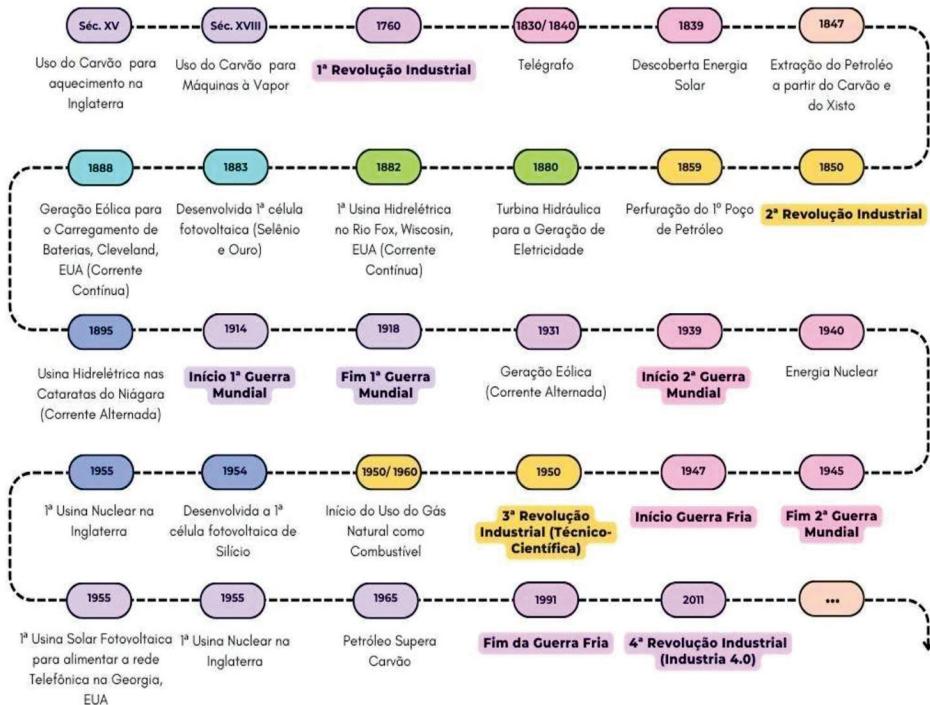
Na década de 1990, a Europa ocupava a liderança mundial na produção de energia nuclear. No entanto, ao longo dos anos, sua indústria nuclear sofreu um encolhimento significativo. Atualmente, cerca de metade dos novos projetos nucleares estão concentrados na China, que deverá ultrapassar tanto a União Europeia quanto os Estados Unidos até 2030. Em 2023, 32 países utilizam energia nuclear em suas matrizes elétricas, sendo a França e a República Tcheca os únicos em que essa fonte representa mais de 60% da matriz. Já o Brasil figura entre os últimos colocados, à frente apenas do Irã, com a energia nuclear correspondendo a apenas 0,94% de sua matriz elétrica. Em termos de potência instalada, os Estados Unidos continuam na liderança, seguidos por China e França (IEA, 2025a). Desde o terremoto ocorrido em 2011 na costa leste do Japão, seguido pelo acidente na Usina de Fukushima Daiichi, a energia nuclear enfrentou um período de intensa desconfiança e retração. No entanto, mais recentemente, impulsionada por políticas governamentais, avanços tecnológicos e o crescente interesse do setor privado, a energia nuclear voltou a ser considerada uma alternativa viável por alguns países (IEA, 2025a).

A utilização da energia solar para a geração de eletricidade teve início em 1839, com as primeiras descobertas sobre o efeito fotovoltaico. Em 1883, foi desenvolvida a primeira célula fotovoltaica, composta por selênio revestido com uma fina camada de ouro. No entanto, o marco da tecnologia fotovoltaica moderna ocorreu em 1954, quando o inventor americano Russel Shoemaker Ohl criou a primeira célula fotovoltaica de silício. No ano seguinte, essas células foram empregadas pela primeira vez em um sistema prático, que passou a abastecer uma rede telefônica no estado da Geórgia, nos Estados Unidos (PORTAL SOLAR, 2020).

A utilização do gás natural começou a crescer de forma significativa após o fim da Segunda Guerra Mundial, por volta das décadas de 1950 e 1960. Nesse período, avanços em metais, técnicas de soldagem e fabricação de tubos tornaram a construção de oleodutos mais economicamente viável. Antes disso, o gás natural era primariamente utilizado para o aquecimento de edifícios

e para o preparo de alimentos (TENNESSEE, 2016). A Figura 1.1 apresenta uma linha do tempo da evolução do uso da energia.

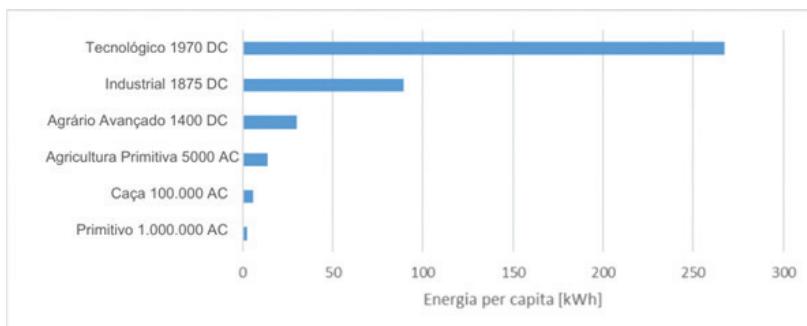
Figura 1.1 - Linha do Tempo da Evolução do Uso da Energia



Fonte: Adaptado de MATTICK, WILLIAMS, ALLEMBY (2010); CARVALHO (2014); USP (1999); IBERDROLA (2022); CRESES (2022); PORTAL SOLAR (2020); TENNESSEE (2016); RITCHIE, ROSER, ROSADO (2022).

O consumo total de energia ao longo do tempo também variou drasticamente, refletindo uma crescente demanda por energia não apenas para as necessidades básicas de subsistência, mas também para impulsionar indústrias e meios de transporte (COOK, 1971). A Figura 1.2 apresenta a evolução do consumo energético individual diário (em kWh) ao longo de diferentes períodos da humanidade.

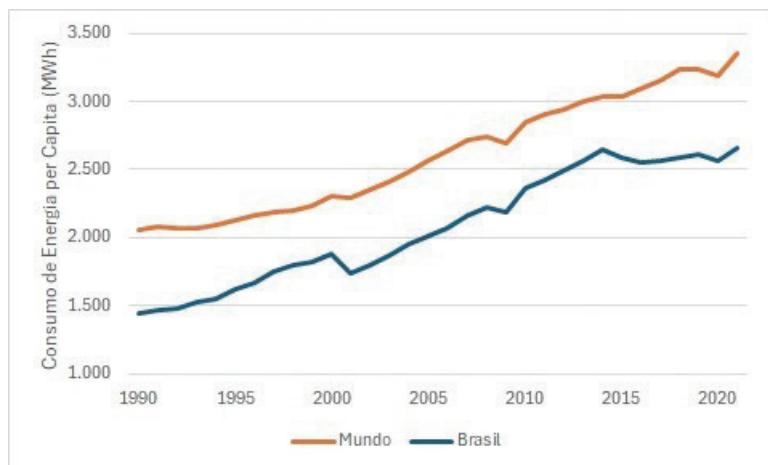
Figura 1.2 - Evolução do consumo energético individual em diferentes períodos históricos (kWh/pessoa/dia)



Fonte: Adaptado de COOK (1971).

Com a evolução das sociedades, torna-se evidente o aumento da demanda por energia, bem como sua importância nas atividades cotidianas. Nas últimas décadas, esse crescimento foi particularmente notável no consumo de energia elétrica em escala global. A Figura 1.3 apresenta essa tendência, ao mostrar o consumo médio de eletricidade por pessoa (em MWh), no período de 1970 a 2020, no Brasil e no mundo.

Figura 1.3 - Evolução do consumo per capita de energia elétrica (MWh).



Fonte: adaptado a partir de IEA (2024a).

Diante da elevada demanda por energia, a atual ordem decrescente de fornecimento de energia primária por tipo de combustível no mundo é: petróleo, carvão, gás natural, biocombustíveis, energia nuclear, hidrelétrica e outras fontes renováveis (IEA, 2021a). Embora a matriz energética global ainda seja majoritariamente composta por fontes não renováveis, a preocupação com a escassez desses recursos, aliada à urgência no enfrentamento das mudanças climáticas, têm impulsionado a comunidade internacional a promover uma transição rumo a um sistema energético mais renovável e sustentável.

## **1.2 Transição Energética**

O princípio do desenvolvimento sustentável baseia-se na preservação das condições essenciais para a produção humana e suas atividades, promovendo uma relação equilibrada entre os seres humanos e o meio ambiente. Seu objetivo é assegurar que as futuras gerações tenham acesso aos mesmos recursos naturais disponíveis na atualidade (FIORILLO; FERREIRA, 2010). Contudo, como destaca Sachs (2000), “*o desenvolvimento sustentável é um desafio planetário*”, ao buscar, de forma simultânea, o equilíbrio entre três pilares fundamentais: o social, o ambiental e o econômico.

A relevância das fontes de energia renováveis para o desenvolvimento sustentável está diretamente ligada ao fato de que cerca de 60% das emissões globais de gases de efeito estufa estão associadas ao consumo de energia. Dessa forma, garantir o acesso à eletricidade implica, necessariamente, investir em fontes renováveis, como a solar e a eólica (UN, 2023).

Diante dessa situação, tanto o Acordo de Paris, discutido na Conferência das Partes, quanto a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) são acordos internacionais a fim de tornar os países mais resilientes em relação às mudanças climáticas, ambos foram discutidos e ratificados em 2015. Assim, estes dois acordos podem estar alinhados a fim de garantir o desenvolvimento sustentável, uma vez que os países podem revisar seus respectivos planos climáticos para que estes atendam a Agenda 2030. Além

disso, ambos os acordos requerem espírito de solidariedade entre os países participantes visto que estes acordos determinam que países desenvolvidos devem oferecer apoio financeiro e técnico para aqueles em desenvolvimento (MDS, 2016).

O Acordo de Paris é um tratado juridicamente vinculativo a fim de mitigar as mudanças climáticas. Ele foi adotado por 196 países ou partes na COP 21 (Conferência das Partes) em 12 de Dezembro de 2015 em Paris. O acordo entrou em vigor em 4 de novembro de 2016 e o objetivo principal é manter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir esforços para limitar o aumento da temperatura em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. O acordo de Paris trabalha em ciclos quinquenais de planos de ação climática. Desde 2020, os países submetem seus planos chamados Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) e cada NDC sucessiva deverá refletir um grau cada vez maior de ambição em relação à versão anterior (UN, 2024).

A Agenda 2030 da ONU, por sua vez, reconhece que o principal desafio do desenvolvimento sustentável é a erradicação da pobreza em todas as suas formas. Essa agenda foi elaborada como um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade, pautado na paz mundial (MDS, 2015). Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) ilustrados na Figura 1.4, são integrados, indivisíveis e equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável (MDS, 2015).

Figura 1.4 - 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU



Fonte: UN (2023).

Os ODS 7 e 13 estabelecem diretrizes essenciais para a promoção da sustentabilidade por meio da adoção de fontes renováveis de energia. O uso de tecnologias limpas, como a energia solar fotovoltaica, vai além da preservação ambiental, impulsionando também o progresso econômico e social, promovendo o bem-estar das gerações presentes e futuras (COELHO, 2014). O ODS 7 trata especificamente da energia, com o compromisso de assegurar o acesso universal a sistemas energéticos confiáveis, sustentáveis, modernos e a preços acessíveis. Já o ODS 13 aborda as mudanças climáticas, propondo ações urgentes para enfrentá-las, incluindo a substituição progressiva dos combustíveis fósseis por fontes renováveis nas matrizes energéticas globais (MDS, 2015).

A energia solar fotovoltaica contribui diretamente para o cumprimento dos ODS 7 e 13, e também exerce impactos indiretos positivos sobre outros Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, como os ODS 1, 2 e 11. Os ODS 1 e 2, que tratam da erradicação da pobreza e da fome, respectivamente, são beneficiados pela ampliação do acesso à energia elétrica, especialmente em comunidades vulneráveis, onde a disponibilidade de eletricidade favorece o preparo e a conservação adequada dos alimentos, promovendo maior segurança alimentar. Já o ODS 11, que busca tornar as cidades e comunidades mais sustentáveis, é fortalecido com a implantação de fontes limpas e descentralizadas de energia.

O Estado do Paraná com uma economia forte no Agronegócio, tem vinculação a todos os 17 ODS, de forma especial, com o Objetivo 2, na produção de Alimentos para alcançar a “FOME ZERO” no mundo. Neste caso, fica evidente que os Objetivos 2 e 7 se conectam, uma vez que a produção de alimentos em larga escala exige um consumo significativo de energia e a transição para um modelo energético mais limpo e eficiente é fundamental para reduzir os custos de produção, diminuir as emissões de gases de efeito estufa e garantir a sustentabilidade do setor a longo prazo.

Neste contexto, a transição para energias limpas e renováveis tem acelerado nos últimos anos, especialmente por conta de políticas de Estado e estratégias da indústria. Em 2023 foram adicionadas ao

sistema elétrico mundial mais de 650 GW provenientes de fontes renováveis, com investimentos de mais de US\$ 2 trilhões ao ano. A China foi responsável por mais de 60% da energia renovável adicionada no mundo, impulsionada especialmente pela geração solar fotovoltaica (IEA, 2024c).

O Brasil se destaca globalmente por sua matriz energética predominantemente renovável, com as grandes usinas hidrelétricas (UHE) desempenhando um papel central na geração de eletricidade. No entanto, a construção dessas usinas frequentemente acarreta impactos significativos nos ecossistemas e na produção agrícola, em razão da inundação de extensas áreas. As crescentes restrições ao uso de combustíveis fósseis, somadas aos desafios para aproveitamento do potencial remanescente de energia hidrelétrica, decorrem, sobretudo, da necessidade de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e de reduzir os impactos sociais e ambientais associados à construção de novas usinas com grandes reservatórios (DRANKA; FERREIRA, 2020). Embora as hidrelétricas continuam sendo uma importante fonte de energia limpa, torna-se essencial diversificar a matriz energética por meio da incorporação de novas tecnologias, de modo a garantir um desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

Nesta visão conservacionista, o território brasileiro privilegiado em extensão e devido às condições climáticas favoráveis, oferece um potencial promissor para a instalação de novas fontes, principalmente de energia solar e eólica. Os elevados índices de irradiação solar em grande parte do território e os ventos constantes em diversas regiões proporcionam boas condições para a geração de eletricidade.

Portanto, as energias renováveis desempenham um papel central na limitação do aumento da temperatura média global a no máximo 1,5 °C, sendo um dos principais facilitadores para alcançar esse objetivo. No contexto da meta de emissões líquidas zero até 2050 (*Net Zero*), essas fontes possibilitam a descarbonização da geração de eletricidade. O setor elétrico continua sendo a principal área de aplicação das energias renováveis, com destaque para o expressivo

crescimento da energia solar fotovoltaica e da energia eólica nos últimos anos, complementando a já significativa participação da energia hidrelétrica. No entanto, a eletricidade representa apenas cerca de um quinto do consumo global de energia. Por isso, ampliar a participação das fontes renováveis na eletrificação de outros setores, especialmente o de transportes, é essencial para o sucesso da transição energética (IEA, 2024d; IEA, 2025b).

### **1.2.1 Transição Energética no Brasil**

A segunda Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) foi apresentada na COP29 do Azerbaijão em novembro de 2024. Neste novo pacto, o Brasil se comprometeu em reduzir de 59% a 67% a emissão dos gases do efeito estufa em relação aos níveis de 2005. Em valores absolutos, significa uma redução de 850 milhões a 1,05 bilhão de toneladas de dióxido de carbono equivalente até 2035. Esta nova NDC permitirá que o país avance em direção ao Net Zero até 2050, além de estar alinhado com o Tratado de Paris cujo objetivo é limitar as médias globais de temperatura em 1,5 °C em relação ao período pré-industrial (PLANALTO, 2024).

Entre os compromissos listados na NDC, tem-se a aceleração do processo de transição energética justa, com investimento em descarbonização da matriz energética, aquisição e produção de tecnologias limpas e incentivos para a agropecuária de baixo carbono. No setor de energia, onde o país já se destaca pela elevada participação de energias renováveis, a NDC visa ampliar a geração elétrica com o aumento da participação de fontes e tecnologias limpas. Em médio e longo prazo, haverá a substituição dos combustíveis fósseis por eletrificação e biocombustíveis avançados, incluindo combustíveis sustentáveis de aviação. Além disso, será associada a captura de carbono para atender a demanda por emissões negativas de gases do efeito estufa.

Prospecta-se também uma ampliação de ações de eficiência energética e o desenvolvimento de mercados para hidrogênio de baixa emissão de carbono, além da viabilização de tecnologias avançadas para a remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera. A fim de mitigar as

emissões, promover o uso eficiente da energia elétrica e aumentar o uso de combustíveis de fontes renováveis tem-se também os programas: Plano Nacional de Transição Energética, Programa Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), o Programa Combustível do Futuro, o Programa Nacional de Hidrogênio e o Programa Mobilidade Verde-Mover (MMA, 2024). O Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten), é uma iniciativa estratégica que reforça o compromisso do Brasil com o desenvolvimento sustentável e a liderança global na descarbonização. O Programa terá a adequação dos projetos coordenados pelo Ministério de Minas e Energia (MME), e é considerado um marco na promoção de tecnologias limpas e na ampliação da matriz energética renovável (MME, 2025).

### **1.3 Energias Renováveis e o Agronegócio**

O setor agropecuário no Brasil terminou o primeiro semestre de 2024 com superávit acumulado de 71,96 bilhões de dólares. As importações do setor representam 7,5% do total importado no primeiro semestre de 2024. Considerando as exportações, estas por sua vez somam 81,40 bilhões no mesmo período, movimentados principalmente pelo açúcar, algodão, café, carne bovina e produtos florestais (IPEA, 2024). O açúcar obteve um aumento de 62,7% (p.p.) em suas exportações, o que representou um valor de 8.663,77 milhões de dólares. O algodão obteve um aumento de 236,3% (p.p.), o que representou um valor de 2.691,15 milhões de dólares. O café, por sua vez, obteve um aumento de 46,1% (p.p.) em suas exportações, o que representou um valor de 5.311,10 milhões de dólares. A carne bovina obteve um aumento 16,9% (p.p.), o que representou um valor de 5.678,78 milhões de dólares. Por fim, os Produtos Florestais, onde encontra-se a celulose, a madeira e o papel, obtiveram um aumento de 11,8% (p.p.) em suas exportações o que representou um valor de 8.245,89 milhões de dólares (IPEA, 2024).

As principais quedas, no mesmo período, foram observadas no Complexo de Soja, onde encontra-se a soja em grãos, farelo e o óleo de soja, nas carnes e nos cereais, onde encontra-se o milho, o trigo

e o arroz. No complexo de soja as exportações somaram 33.528,06 milhões de dólares devido à queda de 17,6%(p.p.). Nas carnes as exportações somaram 10.911,04 milhões de dólares devido à queda de 2,8%(p.p.). Por fim, nos cereais as exportações somaram 2.636,53 milhões de dólares devido à queda de 38,6%(p.p.) (IPEA, 2024).

Dentro do contexto nacional, o estado do Paraná está entre os quatro maiores exportadores do agronegócio do país em fevereiro de 2025, somando 2.561,65 milhões de dólares, ficando atrás apenas de Minas Gerais, Mato Grosso e São Paulo (MAP, 2025).

Em 2023, os principais produtos da agricultura foram a soja em grão, cuja produção somou 51.315,62 milhões de reais, o milho em grão, cuja produção 15.043,43 milhões de reais e a cana-de-açúcar, cuja produção somou 4.672,94 milhões de reais. Os principais produtos da pecuária foram os galináceos com 453.394.749 milhões de cabeças, os bovinos com 8.774.410 milhões de cabeças e os suínos com 6.938.140 milhões de cabeças (IBGE, 2023).

O setor agropecuário, por sua vez, expandiu de forma sustentável garantindo a segurança alimentar e a segurança energética e para isso irá utilizar a produção sustentável de biocombustíveis. Neste setor, o país executará os seguintes planos: Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+), Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar(Pronaf),Programa Bioeconomia Brasil Sociobiodiversidade, o Programa Nacional de Bioinsumos e o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradas em Sistemas Sustentáveis de Produção Agrícola e Florestal (PNCPD) (MMA, 2024).

Considerando a relevância do setor agropecuário no Brasil - em especial no estado do Paraná - e o crescimento acelerado das fontes renováveis no país e no mundo, impulsionado principalmente pela geração solar fotovoltaica, observa-se uma oportunidade estratégica de alavancar o agronegócio por meio da redução dos custos com energia elétrica, viabilizada pela geração distribuída. O Paraná destacou-se como pioneiro ao implementar uma política pública voltada à promoção das energias renováveis no meio rural, por meio do Programa Paraná

Energia Rural Renovável – RENOVA-PR, coordenado pelo Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná).

A ideia do RENOVA-PR é auxiliar na redução do custo de eletricidade de pequenos produtores no meio rural, podendo representar até 30% dos custos da produção, dependendo das técnicas empregadas. Para apoiar o produtor rural, vigorava até janeiro de 2023 o Programa Tarifa Rural Noturna, que concedia descontos de 60% sobre o consumo de energia de propriedades rurais atendidas em baixa tensão e que realizavam atividades produtivas no período das 21h30 às 6h, limitando-se ao consumo de 6 mil kWh por proprietário. Findado esse subsídio, os esforços do governo do estado passaram para o RENOVA-PR, na forma de concessão de linhas de crédito rural mais acessíveis para produtores de todos os portes, capacitação técnica e investimentos em pesquisa e desenvolvimento em conjunto com instituições acadêmicas públicas. Dessa forma, pretende-se instalar 100 mil unidades produtivas de energia renovável via programa até 2030, realizando cerca de 10 mil projetos ao ano, sendo 9 mil de energia solar fotovoltaica e 1 mil de biogás, podendo-se alcançar um total de R\$ 1 bi em alavancagem anual em investimentos e R\$ 10 bi até 2030. A Figura 1.5 mostra uma Usina Solar Fotovoltaica do modelo cobertura instalada em uma propriedade rural pelo programa RENOVA-PR:

Figura 1.5 - Exemplo de usina solar fotovoltaica instalada em propriedade rural



Fonte: IDR-PR

O programa RENOVA-PR já demonstra impactos positivos na vida dos produtores rurais e na economia do estado do Paraná, com perspectivas de resultados ainda mais expressivos até 2030. Diante desse cenário, tornou-se evidente a necessidade de buscar o melhor desempenho das usinas, tanto em termos de geração de energia quanto em sua vida útil, o que exige acompanhamento técnico contínuo. A geração fotovoltaica, ao possibilitar a redução significativa das despesas com energia elétrica, revela-se uma ferramenta estratégica para impulsionar o agronegócio, ao liberar recursos financeiros para novos investimentos nas atividades produtivas. Nesse contexto, promove-se uma transição energética justa e sustentável, por meio do uso de uma fonte limpa, geração de renda indireta, melhoria nas condições de trabalho e maior engajamento do agricultor no processo produtivo.

## **CAPÍTULO 2: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: APLICAÇÕES E CONFIGURAÇÕES**

Neste capítulo, são discutidos os avanços e aplicações da energia solar fotovoltaica, tanto em nível global quanto nacional, com ênfase no cenário brasileiro e paranaense. Inicialmente, apresenta-se um panorama mundial do setor, abordando as tendências de crescimento da capacidade instalada e os fatores que impulsionam a adoção dessa tecnologia, como a redução dos custos dos módulos solares e o aumento da eficiência dos sistemas. Em seguida, analisa-se o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no Brasil, destacando a evolução do mercado, o impacto das políticas públicas e regulamentações, bem como o crescimento da geração distribuída e centralizada. Na sequência, explora-se o cenário específico do estado do Paraná, considerando sua potencialidade para geração solar, os desafios e oportunidades para expansão da tecnologia e os fatores econômicos que impulsionam sua adoção. Além disso, este capítulo aborda a configuração e os tipos de sistemas fotovoltaicos, apresentando os principais componentes dos sistemas, como painéis fotovoltaicos, inversores, controladores de carga, baterias, estruturas de suporte e cabeamento. Também são discutidas as classificações dos sistemas fotovoltaicos, diferenciando entre sistemas *on-grid* (conectados à rede), *off-grid* (isolados) e híbridos, que combinam diferentes fontes de energia para maior eficiência e autonomia.

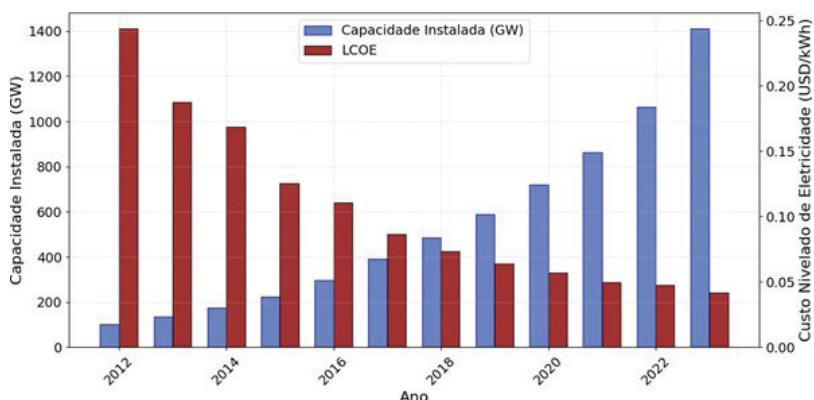
### **2.1 Energia Solar Fotovoltaica no Mundo e no Brasil**

Diante das crescentes preocupações com o aquecimento global e a iminente escassez de combustíveis fósseis, observa-se um esforço coletivo de diversos países para mitigar esses desafios. Acordos internacionais como o Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2023a) e o Acordo de Paris (UNFCCC, 2023b) desempenharam um papel fundamental nesse cenário, ao estabelecer metas para a redução da emissão de gases de efeito estufa e a limitação do aumento da temperatura global média. Esses compromissos impulsionaram o

desenvolvimento e a adoção de fontes de energia renováveis, com destaque para a energia solar fotovoltaica.

De acordo com a International Renewable Energy Agency (IRENA, 2024a), a capacidade global de energia fotovoltaica instalada atingiu 710 GW em 2020. Entre 2020 e 2023, houve um crescimento expressivo, ultrapassando 1400 GW em 2023, o que representa um acréscimo de aproximadamente 350 GW no período. A evolução desta capacidade instalada está ilustrada na Figura 2.1. Conforme ilustrado na Figura 2.1, a queda do custo nivelado de eletricidade (LCOE) da tecnologia fotovoltaica desempenhou um papel fundamental no estímulo aos investimentos no setor.

Figura 2.1: Evolução da Capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica Global e Redução do Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) (2012-2023).

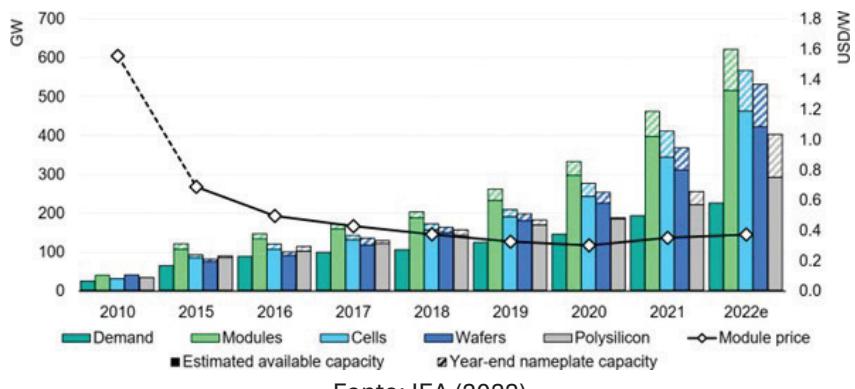


Fonte: Adaptado de IRENA (2024a, 2024b).

Portanto, a diminuição dos custos aliado à crescente maturidade da energia solar fotovoltaica, tem impulsionado significativamente a expansão da capacidade instalada de usinas solares ao redor do mundo. A Figura 2.2 apresenta a capacidade global de produção de energia fotovoltaica, a demanda e o preço médio de venda dos módulos solares entre 2010 e 2022. Durante esse período, o custo dos módulos fotovoltaicos caiu significativamente, passando de

1,6 USD/W em 2010 para 0,4 USD/W em 2022, tornando a energia solar mais acessível e competitiva. O crescimento da demanda por materiais para a fabricação de módulos fotovoltaicos também é evidente (IEA, 2022). Segundo Melnyk et al. (2020), essa expansão, aliada ao desenvolvimento de outras fontes renováveis, desempenha um papel essencial na transição para um sistema energético mais sustentável e economicamente viável em escala global.

Figura 2.2: Capacidade global de produção de energia fotovoltaica, demanda e preço médio de venda de módulos, 2010-2022.



Fonte: IEA (2022)

Nos últimos anos, a capacidade global de fabricação de energia solar fotovoltaica passou por uma mudança geográfica significativa. Antes concentrada na Europa, Japão e Estados Unidos, a fabricação desses componentes migrou progressivamente para a China, que se tornou a principal potência da indústria solar. O país investiu mais de US\$ 50 bilhões na expansão de sua infraestrutura produtiva – dez vezes mais do que a Europa – e gerou aproximadamente 300.000 empregos de manufatura em toda a cadeia de valor do setor fotovoltaico desde 2011. Em 2022, a China fabricou mais de 150 GW em painéis solares, correspondendo a aproximadamente 80% da produção global, consolidando sua posição como líder no setor fotovoltaico (JÄGER-WALDAU, 2022).

Além disso, a China abriga os 10 maiores fornecedores mundiais de equipamentos de fabricação de energia solar fotovoltaica, consolidando sua posição de liderança na indústria. O país desempenha um papel fundamental na redução dos custos globais da energia solar, viabilizando uma transição mais acessível para fontes renováveis. No entanto, essa alta concentração geográfica da produção também apresenta desafios estratégicos, forçando governos ao redor do mundo a buscar alternativas para reduzir sua dependência do mercado chinês.

Para compreender como a China se tornou a principal potência na produção de tecnologia solar fotovoltaica, é essencial analisar os fatores que impulsionaram esse crescimento. A adesão da China ao Protocolo de Kyoto, em 1998, marcou o início de uma nova fase de conscientização global sobre a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, incentivando o investimento em energias renováveis. Em 1999, o governo chinês incluiu as tecnologias de energia limpa entre suas prioridades estratégicas, com o objetivo de fomentar a industrialização da tecnologia fotovoltaica. Para isso, foram implementadas políticas fiscais favoráveis e programas de eletrificação rural, ampliando a demanda por sistemas solares no país.

Outro marco decisivo ocorreu em 2001, quando a China ingressou na Organização Mundial do Comércio e aumentou suas exportações em vários setores. Este foi um ponto crítico na história da indústria solar chinesa. O governo chinês aproveitou este “afrouxamento” das barreiras comerciais para alcançar os países do ocidente. O setor solar foi um dos principais beneficiados por esse cenário, impulsionado, também, pelo investimento significativo de capital estrangeiro, especialmente de empresas americanas.

A combinação de custos de produção mais baixos e o aumento da competitividade produtiva permitiu que a China conquistasse rapidamente uma fatia dominante do mercado global de células fotovoltaicas. Isso resultou em uma queda drástica nos preços dos módulos solares, forçando empresas concorrentes a se adaptarem. Em 2006, os lucros médios do setor de fabricação de

módulos solares caíram para apenas 9%, evidenciando o impacto da competitividade chinesa sobre o mercado global.

Com a crescente demanda por polissilício - matéria-prima essencial para células solares - empresas chinesas adotaram estratégias de integração vertical, expandindo suas operações para áreas como pesquisa e desenvolvimento, instalação e fabricação de componentes. Até meados dos anos 2000, o mercado depolissilício era dominado por poucas empresas na Alemanha, Japão e Coreia do Sul, enquanto os Estados Unidos controlavam o setor, com margens de lucro superiores a 50%. Durante o auge da demanda, entre 2005 e 2007, os preços do polissilício ultrapassaram 300 dólares por quilograma, enquanto o custo de produção permanecia em apenas 35 dólares por quilograma 35 USD/kg (BERNREUTER, 2024).

Diante da dificuldade de entrada no setor de polissilício, a China investiu fortemente na produção local de equipamentos para fabricação de células solares. Essa decisão gerou uma redução de até um terço nos custos de importação e melhorou o desempenho das fabricantes chinesas em comparação às estrangeiras. Em apenas cinco anos, os fabricantes chineses reduziram pela metade sua dependência de tecnologia estrangeira, consolidando sua liderança global no setor.

A crise financeira global e a crise da dívida europeia, por volta de 2009, tiveram um efeito devastador na indústria solar ocidental. A redução das tarifas de “Feed-in” - mecanismo que permitia a venda de energia renovável à rede por valores superiores ao preço de mercado, desencadeou o colapso da bolha de crescimento solar. Como consequência, diversas empresas do setor enfrentaram dificuldades financeiras, levando a uma onda de falências.

Com esse cenário desfavorável, as empresas chinesas que até então dependiam fortemente das exportações, precisaram reorientar suas estratégias de crescimento. Em 2010, o Banco de Desenvolvimento da China (CDB) injetou US\$ 43,2 bilhões em 15 empresas solares, fortalecendo os fabricantes contra a instabilidade global e viabilizando a modernização tecnológica da indústria por

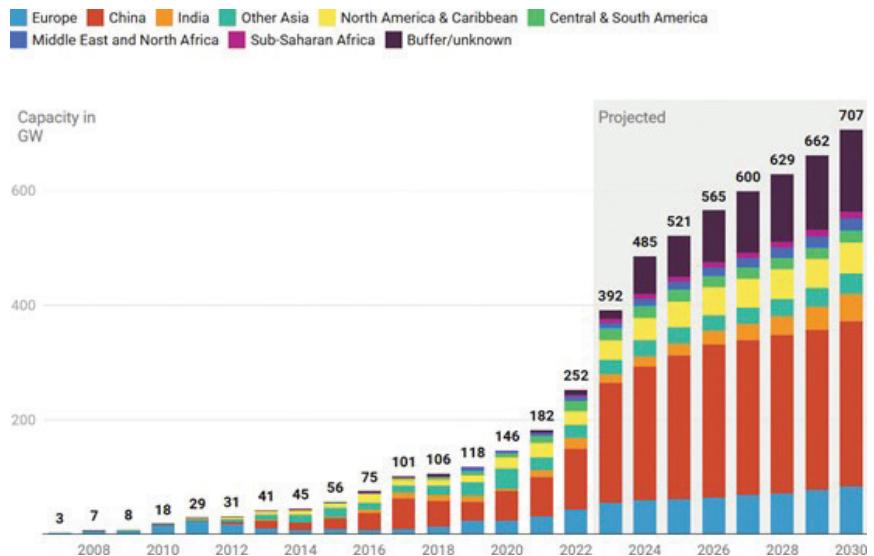
meio da expansão da capacidade produtiva e da aquisição de novos equipamentos (SOO; SANDERSON 2012).

Além desse suporte financeiro, o governo chinês implementou políticas para impulsionar a demanda interna. Por exemplo, a China estabeleceu metas para reduzir o consumo de energia, a emissão de carbono e a dependência do carvão, com o objetivo de alcançar 15% da matriz energética composta por fontes não fósseis até 2020 (LIU; LIANG, 2013). Para viabilizar essa transição, foram introduzidos subsídios energéticos favoráveis à energia solar, além de incentivos para ampliação da capacidade instalada, estimulando investimentos no setor.

Outro fator crucial para o crescimento da indústria solar chinesa foi a dimensão de sua rede elétrica nacional, que representava uma grande oportunidade de longo prazo. Mesmo com uma infraestrutura ainda dependente de fontes fósseis, a China viu na expansão da geração fotovoltaica um caminho estratégico para fortalecer sua segurança energética e consolidar sua liderança no setor.

Dessa forma, o governo chinês estabeleceu uma abordagem coordenada para acelerar o desenvolvimento do mercado doméstico de energia solar, reduzindo a vulnerabilidade da indústria às oscilações dos mercados internacionais. Essa estratégia não apenas impulsionou o crescimento das empresas locais, como também contribuiu para o avanço das metas ambientais e de desenvolvimento sustentável (HOPKINS; LI, 2016). O impacto dessa política pode ser observado na Figura 2.3, que ilustra a evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica na China e em outros mercados entre 2008 e 2022 e a respectiva projeção até o ano de 2030 (CANARY MEDIA, 2023).

Figura 2.3: Crescimento da Capacidade de Energia Solar Fotovoltaica: Tendências Históricas e Projeções Futuras (2008-2030).



Fonte: Canary Media (2023).

Além da China, a Alemanha também se destaca no contexto da geração solar fotovoltaica. No ano de 2005, a Alemanha ultrapassou o Japão e assumiu o posto de país com maior capacidade de energia fotovoltaica instalada, atingindo 2056 MW. Esse crescimento foi impulsionado principalmente pela implementação da *Erneuerbare-Energien-Gesetz* (Lei de fontes de energia renováveis) q, que introduziu a *Feed-in Tariff* (FIT). Esse mecanismo remunera os produtores de energia renovável com valores fixos garantidos (como por exemplo, por cerca de 20 anos), tornando o investimento em energia solar financeiramente atrativo (CHANGES, 2014; FEED-IN, 2022).

A partir de 2013, no entanto, emendas na legislação reduziram gradualmente os valores das tarifas FIT, desacelerando a expansão da energia solar no país. Como resultado, em 2015, a Alemanha perdeu o posto de maior capacidade instalada para a China, que acelerava sua produção e instalação de sistemas fotovoltaicos em

larga escala. Em 2021, com a formação de um novo governo de coalizão, a Alemanha reforçou seu compromisso com a transição energética, estabelecendo metas ambiciosas, como a eliminação do uso de carvão para geração de energia até 2030, garantindo que 80% da eletricidade do país seja proveniente de fontes renováveis até o final da década e a redução progressiva do uso de gás natural, visando a total eliminação até 2040 (IEA, 2023).

Com a escalada da guerra na Ucrânia em 2022 e a consequente diminuição da distribuição do gás natural russo, a Alemanha, que era fortemente dependente desse fornecimento para o funcionamento de suas indústrias e sistemas de aquecimento, encontrou-se de frente a uma potencial crise energética. Diante desse impasse, o governo alemão aprovou em 7 de Julho de 2022 emenda à lei de fontes de energia renováveis implantando a medida mencionada anteriormente objetivando reduzir sua dependência da importação de combustíveis, acelerando em alguns anos a meta anterior do ano de 2010 em que planejava-se ter praticamente toda a rede elétrica abastecida por energias renováveis até 2050. Como consequência, fomentou-se todo o setor de energia renovável para atingir tais objetivos (GUARDIAN, 2010; ROOKS, 2022).

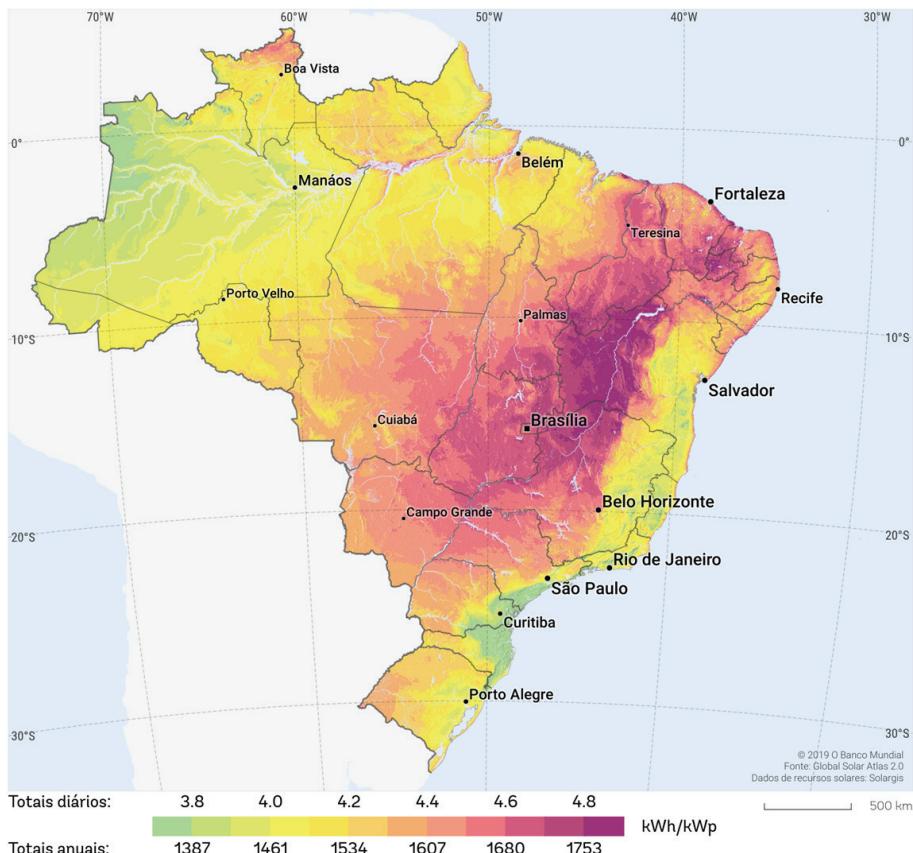
### **2.1.1 Energia solar fotovoltaica no Brasil**

O Brasil destaca-se como um dos mercados mais promissores para a energia solar no mundo, graças à sua localização geográfica privilegiada e aos elevados níveis de irradiação solar. Grande parte do território brasileiro está situada na zona tropical, recebendo entre 3,7 e 5,0 horas de sol pleno por dia - uma das maiores médias de exposição solar em nível global (GLOBAL SOLAR ATLAS,2025; SARTORI, 2024).

A Figura 2.4 apresenta o mapa do Brasil para indicar a média do potencial de energia fotovoltaica brasileira entre os anos de 1999 e 2018. As cores variam de amarelo claro a roxo escuro, representando um aumento no potencial de energia solar. Uma legenda abaixo do mapa associa essas cores a valores de irradiação solar diária (em kWh/kWp) que variam de 3.8 a 4.8, e a valores anuais

correspondentes que variam de 1387 a 1753 kWh/kWp. As áreas em roxo escuro, localizadas principalmente no Nordeste e parte do Sudeste, indicam o maior potencial de energia solar, enquanto as áreas em amarelo claro, concentradas mais ao sul e em partes da Amazônia, apresentam o menor potencial.

Figura 2.4: Mapa do Potencial Médio Anual e Diário (kWh/kWp) de Energia Fotovoltaica no Brasil (1999-2018).



Fonte: Global Solar Atlas (2025).

Embora o efeito fotovoltaico tenha sido observado pela primeira vez ainda no século XIX, a utilização da energia solar no Brasil só ganhou relevância no século XXI. O marco inicial ocorreu em 2011, com a instalação da primeira usina solar comercial do país, localizada no município de Tauá, no sertão do Ceará (Figura 2.5). Além de ser pioneira no Brasil, essa também foi a primeira usina solar de grande porte na América Latina.

Figura 2.5 - Usina fotovoltaica de Tauá.

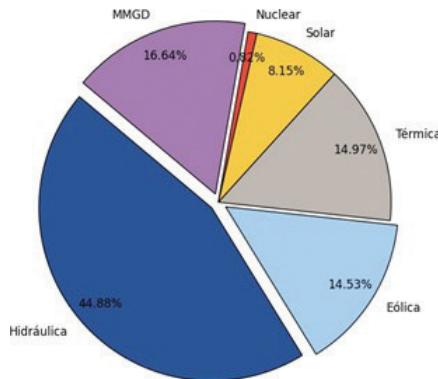


Fonte: ENEVA (2025)

A escolha de Tauá para sediar o projeto deve-se aos altos índices de radiação solar na região, tornando-a um local estratégico para a geração de energia fotovoltaica em larga escala. A usina foi projetada para contar com 4.680 painéis solares fotovoltaicos, com uma capacidade inicial de geração de 1 MW e possibilidade de expansão para até 77 MW. Atualmente, a usina pertence ao Grupo Eneva, que planeja expandi-la para 65 MW. Além desse empreendimento, a Eneva também opera a Usina Termelétrica do Porto do Pecém II e a Usina Termelétrica Porto do Itaqui (movidas a carvão mineral), bem como o Complexo Termelétrico Parnaíba, que utiliza gás natural.

Até fevereiro de 2025, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o Brasil contava com 263 usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada em operação, somando uma capacidade instalada de 19 GW, com previsão de alcançar 23 GW até 2029. No caso da geração distribuída (GD), a potência instalada já havia ultrapassado 26 GW até o ano de 2023 (ONS, 2025a). Ressalta-se que o ONS classifica as usinas fotovoltaicas como “Conjuntos Fotovoltaicos”, os quais podem agrupar diversas unidades geradoras. Um exemplo é o Conjunto Fotovoltaico de Lavras, composto por oito unidades geradoras identificadas como Lavras 1 a Lavras 8. A relevância da fonte solar na matriz elétrica nacional pode ser observada na Figura 2.6, que apresenta a participação das diferentes fontes de geração em 2025, evidenciando o crescimento da energia solar, especialmente no contexto da micro e mini geração distribuída (MMGD).

Figura 2.6: Matriz de energia elétrica brasileira por fonte em 2025.

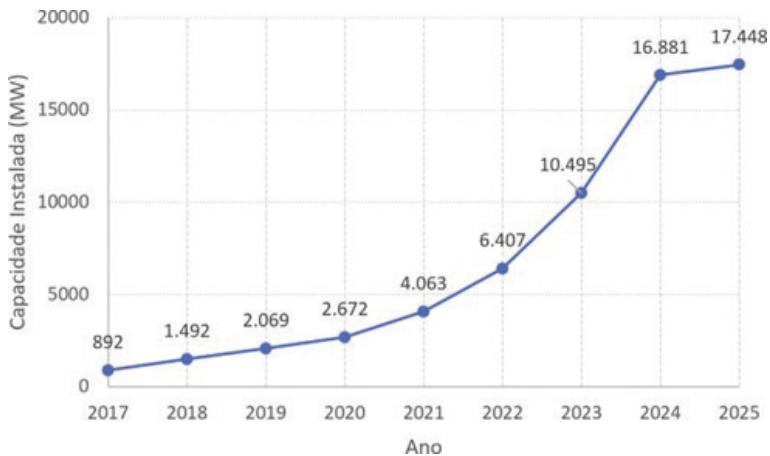


Fonte: Adaptado de ONS (2025a).

O crescimento da geração solar fotovoltaica centralizada no Brasil tem sido exponencial nos últimos anos, saltando de 892 MW em 2017 para 16.881 MW em 2024, um aumento de quase 19 vezes. Esse crescimento pode ser visualizado nas Figuras 2.7 e 2.8, que apresentam a evolução da capacidade instalada (MW) da fonte solar fotovoltaica no Brasil, de geração centralizada

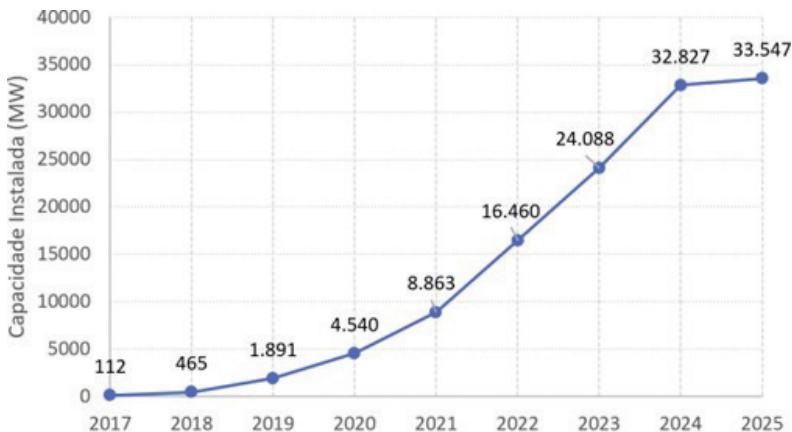
(grandes usinas, gerenciadas geralmente pelo ONS) e distribuída (unidades geradoras individuais, como residências e empresas), respectivamente.

Figura 2.7: Evolução da Capacidade Instalada (MW) da fonte solar fotovoltaica centralizada no Brasil.



Fonte: ONS (2025b)

Figura 2.8: Evolução da Capacidade Instalada (MW) da fonte solar fotovoltaica de geração distribuída no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2025)

O crescimento acelerado da geração solar fotovoltaica no Brasil pode ser atribuído a uma combinação de fatores, incluindo incentivos governamentais, regulamentações favoráveis e a redução dos custos da tecnologia. Desde 2012, com a publicação da Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, houve um avanço significativo na geração distribuída, permitindo que consumidores pudessem instalar sistemas fotovoltaicos e compensar a energia excedente gerada. Além disso, essa regulamentação facilitou o acesso a financiamentos para pessoas físicas e jurídicas, tornando a energia solar mais acessível. Em 2015, a criação da Resolução Normativa 687/2015 estabeleceu novos critérios e parâmetros para a geração distribuída.

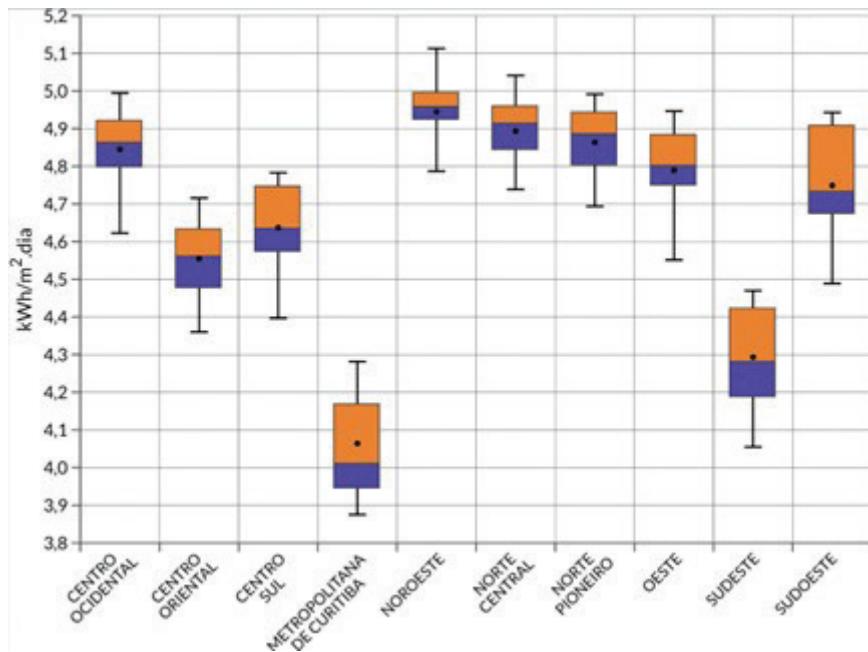
A evolução do setor foi acompanhada de novas regulamentações, como a Resolução Normativa 1000/2021, que consolidou as principais regras do serviço público de distribuição de energia elétrica, e a Resolução Normativa 1059/2023, que regulamentou a Lei 14.300/2022, trazendo mudanças nas regras de compensação de energia e na cobrança pelo uso da rede de distribuição. No Capítulo 3 deste livro, é apresentada uma análise completa das normas e regulamentações aplicáveis à geração distribuída solar, destacando seus impactos e as perspectivas futuras para o setor no contexto brasileiro.

## **2.1.2 Energia solar fotovoltaica no Paraná**

O estado do Paraná apresenta uma variabilidade expressiva na irradiação solar global horizontal ao longo de seu território. Essa heterogeneidade é evidenciada na Figura 2.9, que mostra a variabilidade interanual da média diária de irradiação em diferentes regiões paranaenses (TIEPOLO et al., 2017). Em comparação com outras regiões brasileiras, como o Nordeste e o Centro-Oeste - que apresentam índices médios de irradiação superiores - o Paraná possui uma incidência solar relativamente menor. Essa diferença é ilustrada na Figura 2.10, a qual apresenta a variabilidade interanual da irradiação global horizontal média nas macrorregiões do país (TIEPOLO et al., 2017).

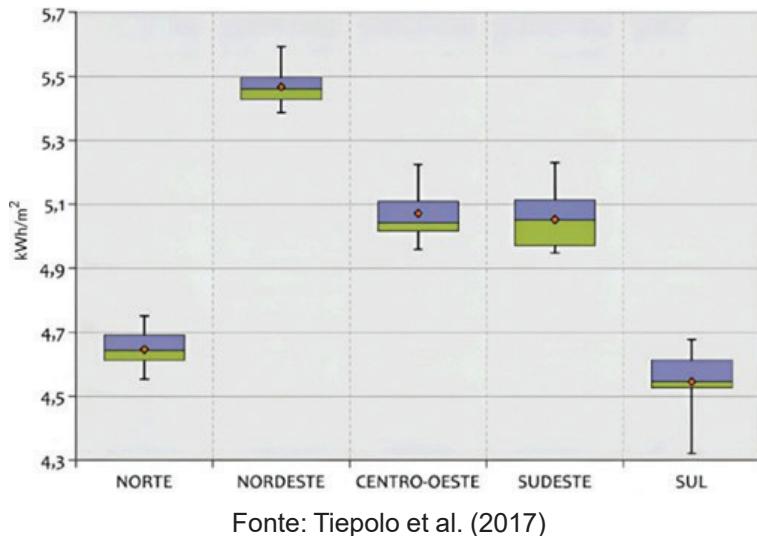
Apesar dessa desvantagem relativa no contexto nacional, o Paraná ainda se destaca internacionalmente. Seus níveis de irradiação solar superam os de muitos países europeus, tornando o estado uma região promissora para a geração de energia solar fotovoltaica. A Figura 2.11 reforça esse potencial ao exibir o mapa de irradiação solar do estado, evidenciando uma boa distribuição espacial, com destaque para as regiões oeste e norte, onde os índices anuais ultrapassam 1.900 kWh/m<sup>2</sup>.ano (TIEPOLO et al., 2017).

Figura 2.9 - Variabilidade interanual da média diária de irradiação global horizontal no Paraná.



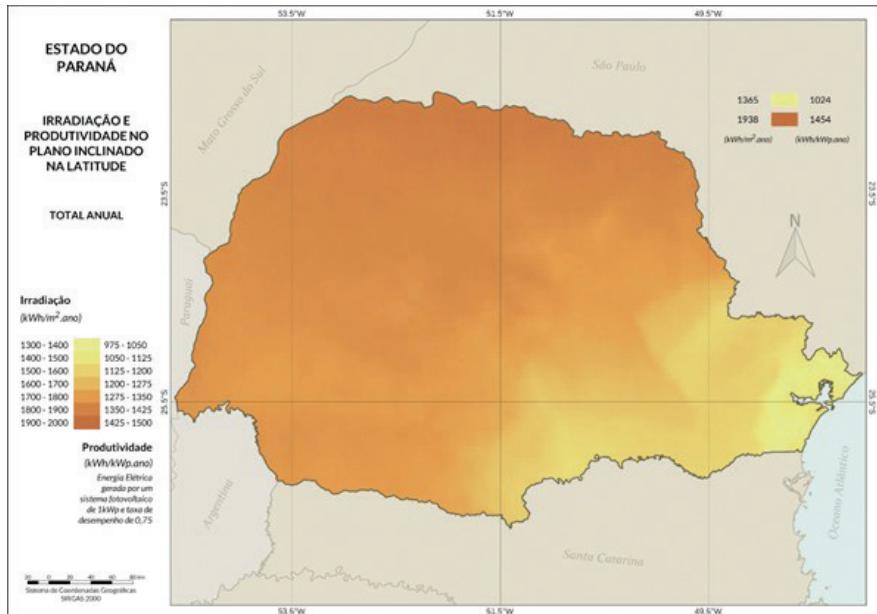
Fonte: Tiepolo et al. (2017)

Figura 2.10 - Gráfico da Variabilidade interanual irradiação global horizontal ( $\text{kWh/m}^2$ ).



Fonte: Tiepolo et al. (2017)

Figura 2.11 - Mapa de irradiação solar do Paraná.



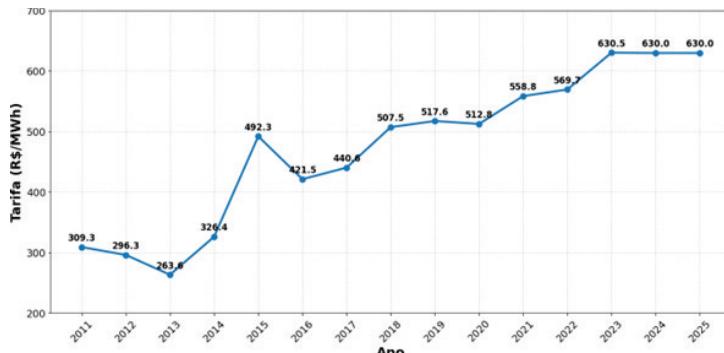
Fonte: Tiepolo et al. (2017)

Nesse contexto, o estado do Paraná tem apresentado um crescimento expressivo no número de sistemas de MMGD instalados. Esse avanço pode ser atribuído a uma combinação de fatores favoráveis, como a disponibilidade de áreas adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos, políticas públicas de incentivo e o crescente interesse da população por alternativas sustentáveis.

Em outubro de 2022, o Paraná alcançou a marca de 1 GW de potência instalada, tornando-se o quarto maior gerador de energia solar do Brasil. Apenas quatro meses depois, em fevereiro de 2023, essa capacidade saltou para 1,76 GW, distribuída em 152.366 sistemas de MMGD presentes nos 399 municípios paranaenses. Com esse desempenho, o estado ficou atrás apenas de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul em termos de capacidade instalada (ANEEL, 2025; ABSOLAR, 2023).

Outro fator decisivo para o crescimento da geração fotovoltaica no estado foi a viabilidade econômica, especialmente diante do aumento contínuo das tarifas de energia elétrica cobradas pelas concessionárias. Esse comportamento tarifário, que tem pressionado consumidores a buscar alternativas mais econômicas e sustentáveis, é ilustrado na Figura 2.12 (ANEEL/SGT, 2023).

Figura 2.12 - Tarifa média anual de aplicação Copel do grupo B1 (R\$/MWh);  
Valores sem impostos.



Fonte: ANEEL/SGT (2023).

As Figuras 2.13, 2.14 e 2.15 ilustram o crescimento da geração fotovoltaica no estado do Paraná sob diferentes perspectivas. A Figura 2.13 apresenta a capacidade instalada por ano, evidenciando um salto significativo entre 2018 e 2019, quando a potência passou de 28 MW para 210 MW. Essa tendência de crescimento contínuo se manteve até 2022. No entanto, em 2023, observou-se uma desaceleração na expansão da capacidade instalada, atribuída principalmente a mudanças regulatórias no setor.

A Figura 2.14 mostra a evolução no número de unidades consumidoras com sistemas fotovoltaicos implementados no estado, abrangendo todos os segmentos (residencial, comercial, industrial, rural, entre outros). Nota-se um crescimento praticamente linear no número de novas unidades entre 2020 e 2024, resultando em um aumento percentual superior a 660% no período.

Complementando essa análise, a Figura 2.15 demonstra que o aumento no número de unidades também refletiu diretamente na elevação da potência total instalada no Paraná, confirmando a consolidação da geração distribuída como uma importante fonte de energia no estado.

Figura 2.13 - Capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos por ano, no Paraná.



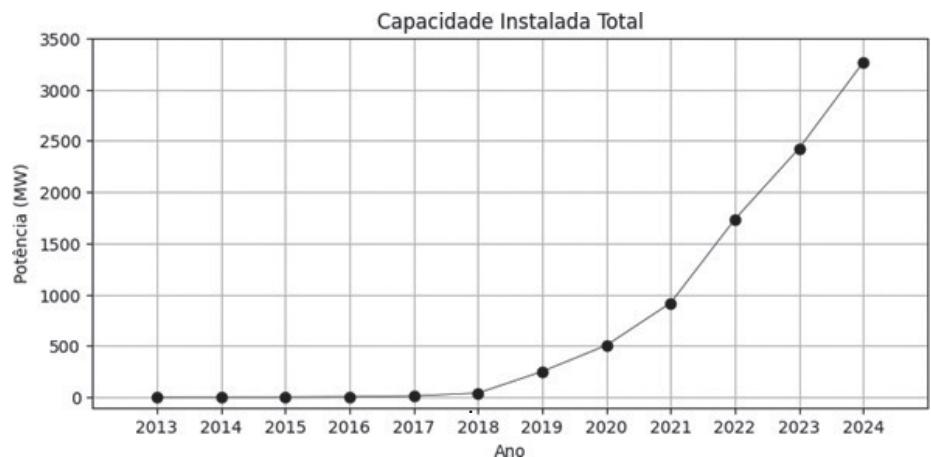
Fonte: EPE (2025)

Figura 2.14 - Número de sistemas de geração fotovoltaicos no Paraná.



Fonte: EPE (2025)

Figura 2.15 - Capacidade Instalada total de energia fotovoltaica no Paraná



Fonte: EPE (2025)

O aumento nas tarifas de energia elétrica nos últimos anos tem sido um dos principais impulsionadores da implantação de novos sistemas fotovoltaicos, especialmente em unidades residenciais atendidas pela Copel. Em 2025, a classe de consumo residencial foi responsável por 34,1% do total de geradores fotovoltaicos instalados no estado do Paraná, conforme apresentado no Quadro 2.1, que ilustra os empreendimentos fotovoltaicos por classe (ANEEL, 2025). Esse percentual representa uma contribuição aproximada de 1.130,76 MW da potência total instalada.

Nesse contexto, destaca-se a microgeração distribuída, que se consolida como a principal modalidade de geração fotovoltaica no estado. De acordo com o Quadro 2.2 (empreendimentos fotovoltaicos por modalidade), essa categoria responde por mais de 78% da potência total instalada no Paraná (ANEEL, 2025), reforçando sua relevância no cenário energético estadual.

Quadro 2.1: Empreendimentos fotovoltaicos por classe

<b>Classe de consumo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência (kW)</b>
Comercial	29.063	920.225,71
Serviço Público	36	3.753,67
Rural	38.927	858.213,20
Residencial	172.494	1.130.758,55
Poder Público	498	37.637,74
Industrial	9.727	363.769,12
Iluminação pública	8	1.203,20
Total	250.753,00	3.315.561,19

Fonte: ANEEL (2025)

Quadro 2.2: Empreendimentos fotovoltaicos por modalidade

<b>Modalidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência (MW)</b>
Microgeração	248.954	2.267,900
Minigeração	1.799	636,66

Fonte: ANEEL (2025)

Os destaques em geração solar fotovoltaica dentre os municípios paranaenses são Foz do Iguaçu, Maringá e Londrina, respectivamente (Quadro 2.3). Isso demonstra um certo fenômeno de interiorização da produção energética através da fonte solar, favorecendo os pequenos centros e seus entornos, em comparação com a capital Curitiba, que possui níveis de irradiação inferiores e assume somente a quinta posição no ranking de potência instalada dos municípios do Paraná.

Quadro 2.3: Ranking dos cinco principais municípios paranaenses

<b>Município</b>	<b>Quantidade de empreendimentos</b>	<b>Potência (MW)</b>	<b>Percentual da potência total no estado</b>
Foz do Iguaçu	17.327	146.496,09	4,42%
Maringá	14.226	139.966,65	4,22%
Curitiba	10.162	114.519,22	3,45%
Londrina	10.252	108.101,96	3,26%
Cascavel	7.391	100.872,83	3,04%

Fonte: ANEEL, 2025.

## **2.2 Configuração e Tipos de Sistemas Fotovoltaicos**

A energia solar tem se destacado como uma das principais alternativas energéticas sustentáveis, proporcionando eletricidade limpa e renovável. O avanço tecnológico e a crescente preocupação com a sustentabilidade têm impulsionado o desenvolvimento e a popularização dos sistemas fotovoltaicos, tornando-os uma solução viável tanto para pequenos consumidores quanto para grandes instalações.

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por diversos componentes que operam em conjunto para converter a energia solar em energia elétrica utilizável. Cada um desses componentes desempenha um papel importante na eficiência e segurança do sistema, garantindo que a eletricidade gerada possa ser utilizada de maneira confiável.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados conforme sua conexão com a rede elétrica, podendo ser *On-grid*, *Off-grid* ou híbridos. A seguir, serão abordados os principais componentes desses sistemas e suas classificações, detalhando suas funcionalidades, aplicações e exemplos de marcas e modelos disponíveis no mercado.

### **2.2.1 Componentes principais**

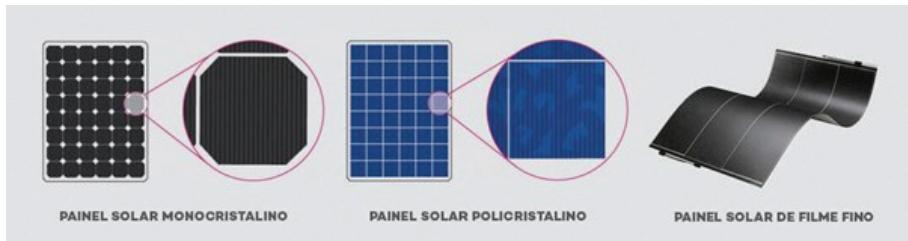
Os sistemas fotovoltaicos são constituídos por diversos componentes essenciais que garantem sua eficiência e funcionamento adequado. Dentre eles, destacam-se os módulos fotovoltaicos (ou painéis solares), inversores, controladores de carga, baterias, estruturas de fixação e o cabeamento elétrico.

Os painéis solares são dispositivos responsáveis por converter a luz solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. São compostos por células fotovoltaicas, geralmente feitas de silício, que captam a radiação solar e geram corrente elétrica. Esses painéis são essenciais para o funcionamento do sistema, sendo instalados em locais com boa exposição ao sol para maximizar sua eficiência.

Eles são amplamente utilizados tanto em sistemas residenciais quanto industriais e em usinas solares de grande escala.

Os painéis podem ser classificados em monocristalinos, policristalinos e de filme fino (Figura 2.16). Os monocristalinos possuem maior eficiência devido à pureza do silício utilizado, sendo ideais para espaços reduzidos. Já os policristalinos apresentam um custo mais acessível, sendo uma opção viável para instalações de maior escala. Os painéis de filme fino, por sua vez, são mais flexíveis e leves, podendo ser aplicados em superfícies diversas.

Figura 2.16 - Empreendimentos fotovoltaicos por modalidade



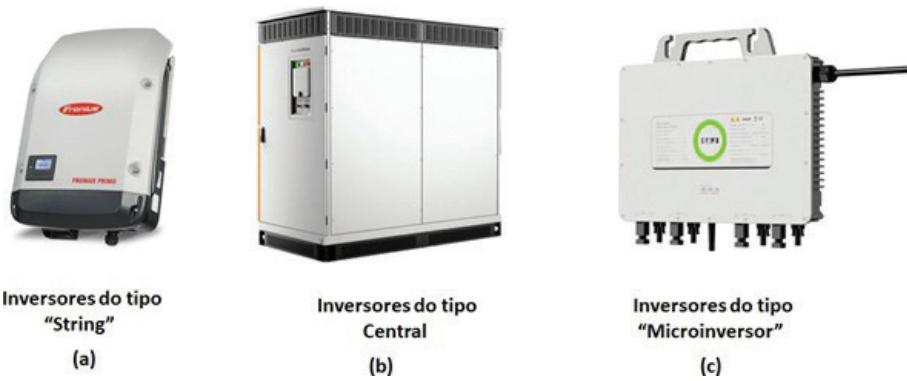
Fonte: ANEEL (2025)

Os inversores têm a função de converter a corrente contínua (CC), gerada pelos painéis solares, em corrente alternada (CA), que é o tipo de eletricidade utilizada na maioria dos equipamentos elétricos e na rede elétrica convencional. Além disso, os inversores podem ter funcionalidades adicionais, como monitoramento da geração de energia e proteção contra surtos elétricos. Eles são amplamente empregados em sistemas *On-grid* e híbridos, garantindo que a energia solar seja utilizada de forma eficiente.

Os inversores podem ser classificados em inversores *string*, inversores centrais e microinversores (Figura 2.17). Os inversores *string* são utilizados em sistemas de pequeno e médio porte, conectando vários módulos solares em série. Os inversores centrais são mais robustos e aplicados em sistemas de grande escala, como usinas solares.

Os microinversores são uma alternativa inovadora dentro do segmento de inversores. Diferentemente dos inversores *string*, que conectam diversos módulos a um único equipamento, os microinversores são instalados individualmente em cada painel solar. Isso proporciona uma série de vantagens, como maior eficiência na conversão de energia, redução de perdas por sombreamento parcial e maior flexibilidade na instalação do sistema. Outra vantagem dos microinversores é a possibilidade de monitoramento individualizado de cada módulo solar, permitindo diagnósticos mais precisos e facilitando a manutenção do sistema. Sua durabilidade e eficiência compensam o investimento em diversas aplicações, especialmente em sistemas residenciais e comerciais de pequeno porte.

Figura 2.17 - Tipos de Inversores.

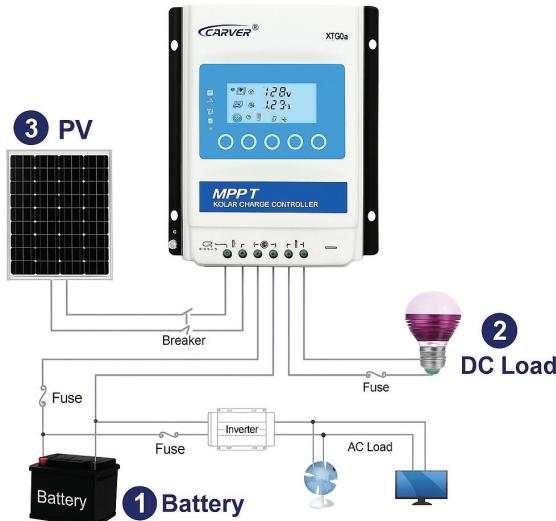


Fonte: Adaptado de Fronius (2025), Sungrow (2025) e Meu Gerador (2025)

Os controladores de carga são dispositivos utilizados em sistemas *Off-grid* e híbridos para gerenciar a carga das baterias, evitando sobrecarga ou descarga excessiva. As baterias, por sua vez, armazenam a energia gerada pelos painéis solares para uso posterior, especialmente em horários sem incidência solar, como à noite ou em dias nublados. Esses componentes são essenciais para garantir a autonomia do sistema em regiões isoladas ou para proporcionar uma fonte de energia de *backup* em sistemas híbridos.

As baterias podem ser de chumbo-ácido, lítio-íon ou outras tecnologias emergentes. As baterias de lítio-íon têm se tornado mais populares devido à sua eficiência e maior vida útil, apesar do custo inicial mais elevado. Um diagrama de ligação entre esses componentes é mostrado na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Exemplo de um controlador de carga, com diagrama de ligação.



Fonte: Adaptado de DGTEC (2025)

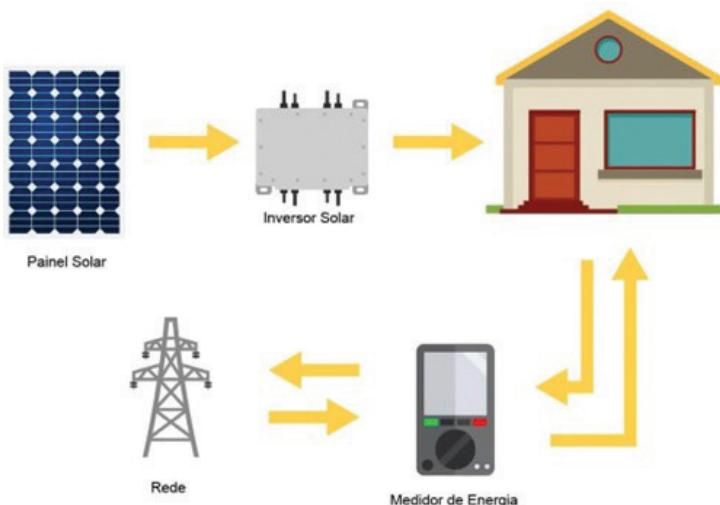
Por fim, as estruturas de suporte são responsáveis por fixar os painéis solares de maneira segura e em um ângulo adequado para maximizar a captação da luz solar. Elas podem ser instaladas em telhados, solo ou outras superfícies adequadas. Já o cabeamento elétrico interliga todos os componentes do sistema, garantindo a transmissão eficiente da energia gerada pelos painéis solares até os inversores, baterias ou dispositivos consumidores de eletricidade.

## 2.2.2 Classificação dos sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três principais categorias, dependendo de sua configuração e conexão com a rede elétrica. Os sistemas *On-grid* são aqueles conectados

diretamente à rede elétrica pública (Figura 2.19). Nesse tipo de sistema, a energia gerada pelos painéis solares é usada para abastecer os equipamentos elétricos, e o excedente é injetado na rede, gerando créditos de energia que podem ser utilizados posteriormente. São amplamente utilizados em áreas urbanas e comerciais, onde há acesso contínuo à eletricidade e a necessidade de reduzir custos com energia.

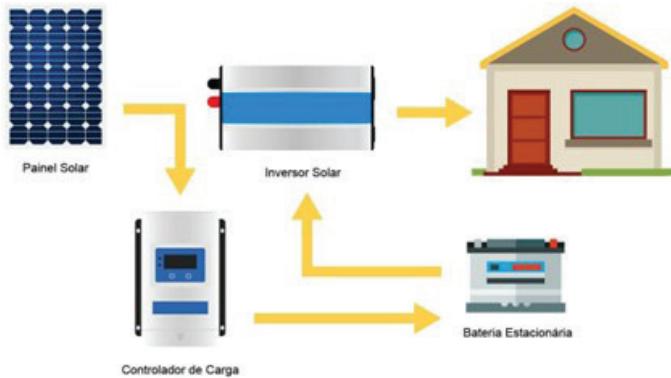
Figura 2.19 - Exemplo de sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: NeoSolar (2025b)

Os sistemas *Off-grid*, por outro lado, funcionam de maneira independente da rede elétrica (Figura 2.20). Eles são projetados para fornecer energia a locais remotos ou áreas onde a rede elétrica não está disponível. Para garantir o fornecimento contínuo de energia, esses sistemas utilizam baterias para armazenar a eletricidade gerada durante o dia e suprir a demanda noturna ou em períodos de baixa geração. Embora ofereçam autonomia, seu custo inicial é mais elevado devido à necessidade de baterias e controladores de carga.

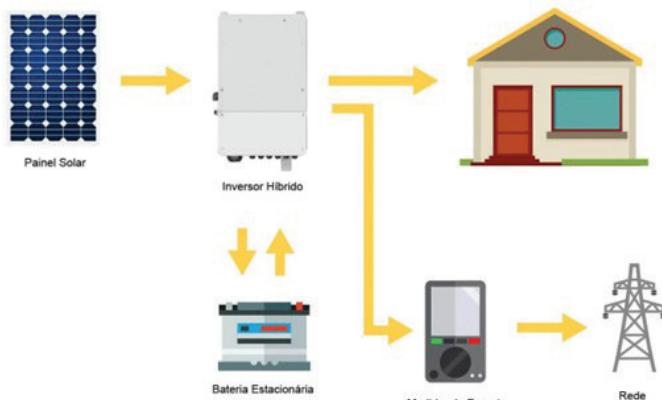
Figura 2.20 - Exemplo de sistema fotovoltaico *Off-grid*.



Fonte: NeoSolar (2025b)

Por fim, os sistemas híbridos combinam características dos sistemas *On-grid* e *Off-grid* (Figura 2.21). Eles podem operar conectados à rede elétrica, mas também possuem baterias para armazenar energia, garantindo segurança energética em caso de falhas na rede. Esse tipo de sistema é ideal para locais onde há oscilações no fornecimento de energia ou onde se deseja maximizar o autoconsumo da energia gerada, reduzindo ainda mais a dependência da rede elétrica.

Figura 2.21 - Exemplo de sistema fotovoltaico híbrido.



Fonte: NeoSolar (2025b)

# **CAPÍTULO 3: NORMAS E LEGISLAÇÕES**

Neste capítulo são apresentadas, como foco principal, a estruturação hierárquica da legislação brasileira, para orientar o leitor sobre a relevância e a segurança jurídica de cada norma a ser aplicada em projetos, instalações e operação de sistemas fotovoltaicos. É apresentada uma revisão da regulamentação brasileira atualizada e as principais entidades que tratam do assunto, listando as normas mais utilizadas no Brasil, incluindo o Marco Legal da Geração Distribuída. Na sequência, são apresentadas as referências específicas do Estado do Paraná e um exemplo de regras municipais.

## **3.1 Hierarquia da Legislação Brasileira**

Diante do grande interesse e demanda mundial pela expansão de fontes renováveis para a geração de energia elétrica, incontáveis soluções técnicas, quer sejam para projetos, instalações ou manutenção, se apresentam a esse mercado consumidor mundial. Tais soluções necessitam de regramentos (rol de normas, instruções, decretos, leis etc.) visando um crescimento sustentável, considerando os pilares econômico, social e ambiental, garantindo índices de qualidade, retorno de investimento e segurança para os empreendimentos e usuários.

Cabe destacar que as normas direcionam condutas esperadas que podem ser elaboradas pela sociedade civil ou autoridades, enquanto as leis são elaboradas por aqueles que têm o poder de legislar, baseando-se nas normas, e determinam os procedimentos (PEO, 2024).

Embora para geração de energia fotovoltaica, a pauta principal sejam as normas técnicas de engenharia, o ordenamento jurídico brasileiro tem que ser respeitado, uma vez que muitos contratos de projetos, de instalação e de uso de sistemas de energia solar fotovoltaica, são celebrados com base nas normas técnicas, relações consumeristas e tópicos de ordem jurídica.

Existe, portanto, uma lógica de hierarquia que se inicia com as normas e regulamentos da sociedade civil, passando por leis e decretos específicos, quer sejam instituídas por municípios, estados ou federação, culminando com as chamadas Leis Maiores, como a Constituição da República Federativa do Brasil (Lei Magna de 1988 e suas emendas posteriores) o Código de Processo Civil (Lei nº 12328/2015) e o Código de Defesa do Consumidor (Lei nº 8.078/1990) conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Hierarquia das Normas e Leis Brasileiras.



Fonte: Autores.

Em território nacional, a lei maior do ordenamento jurídico é a Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988). Nela estão elencados os direitos individuais e coletivos dos brasileiros, com destaque à proteção da família, cultura, direitos humanos, educação e saúde. Abaixo da Carta Magna, e de suas emendas, estão as Leis Complementares, que têm como propósito justamente regular pontos da Constituição que não estejam suficientemente

explicitados. Na sequência estão as chamadas Leis Ordinárias que se tratam de normas de competência exclusiva do Poder Legislativo. As Leis Delegadas e as Medidas Provisórias (MP) têm a mesma hierarquia das ordinárias (CNJ, 2018).

Já os Decretos Legislativos são atos normativos de competência do Congresso Nacional, e ocupam o quarto lugar na pirâmide hierárquica, juntamente com as Normas Regulamentadoras (NR) que são aprovadas por portarias ministeriais, possuem força de lei e devem ser seguidas em locais onde sua aplicação é obrigatória, como em etapas de projetos e em ambientes e postos de trabalho. Por outro lado, temos as Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que são um conjunto de normas elaboradas pela sociedade civil, como guia de boas práticas, e em princípio não são obrigatórias, até que dispositivos legais as tornem. As normas da ABNT, também denominadas Normas Brasileiras Registradas (NBR) devem ser usadas em todo o território nacional e orientam os projetos e instalações de engenharia e demais assuntos técnicos. Já as normas de concessionárias de energia, aplicáveis em seus locais de concessão, seguem as preconizações contidas em um rol de normas nacionais (NR e ABNT/NBR) e internacionais (ISO, IEC, IEEE, IES etc.).

Por último, as normas estrangeiras ou normas internacionais, as quais podem ser usadas como base se não existirem normas nacionais, como as da ABNT/NBR. É também possível usar uma norma estrangeira ou internacional caso ela seja mais restritiva que a norma ABNT correlata, mas neste caso a aplicação da norma passa a ser caracterizada como norma de empresa.

É importante destacar que, devido ao crescimento acelerado da energia solar no mundo todo, e à necessidade da implementação de políticas de governo, para esse tipo de fonte de energia e seu uso, as leis e normas estão em constante reformulação ou atualização, por isso, é recomendado sempre buscar as suas últimas versões para projetos, instalações e uso de sistemas fotovoltaicos (SFV) e sua energia.

### **3.2 Normas e Legislações Brasileiras**

No Brasil, o marco regulatório para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR ou *On-Grid*) é composto por um conjunto de leis, decretos, normas e resoluções que visam incentivar o desenvolvimento do setor, garantir a segurança jurídica e estabelecer critérios técnicos para a instalação e operação dos sistemas.

Cronologicamente, após a Resolução Normativa (REN) nº 482/2012, publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) especificamente em relação a geração distribuída, em 2012, houve o primeiro grande marco regulatório através da Resolução Normativa nº 482/2012, publicada pela ANEEL. Esta REN estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de energia elétrica e também contribuiu para o avanço dos sistemas de Geração Distribuída (GD) *on-grid*, além de apresentar um sistema de compensação de créditos aos consumidores (ANEEL, 2012).

Diante do aumento da demanda pela energia solar fotovoltaica no Brasil, houve a necessidade de criação de critérios e parâmetros novos. Neste momento foi desenvolvida a Resolução Normativa nº 687/2015, para estabelecer diferenças entre microgeração, minigeração, autoconsumo remoto e geração compartilhada. Além disso, foram determinadas as faixas de geração de energia fotovoltaica para microgeração, até 75 kW, e minigeração, acima de 75 kW até 5 MW (ANEEL, 2015).

Na esteira da modernização da legislação, a fim de acompanhar os avanços e demandas por utilização de energia solar no país, foi publicada pela ANEEL a Resolução Normativa nº 1000/2021, a qual veio para consolidar as principais regras de prestação de serviço público de distribuição de energia elétrica. Foi agregado ao seu escopo, também, atos normativos relacionados aos direitos e deveres do consumidor e dos demais usuários do serviço público de distribuição de energia elétrica. Tal publicação, que revogou as Resoluções Normativas nº 414/2010, nº 470/2011 e nº 901/2020, tem por intuito simplificar a definição de responsabilidades dos

consumidores e demais usuários do serviço (ANEEL, 2021). Em sua composição, consolida-se o conteúdo de sessenta e uma resoluções publicadas anteriormente pela ANEEL, e agrega-se parcialmente o conteúdo de três resoluções. Os principais pontos reunidos são:

- Contratação de energia elétrica por consumidor livre no Sistema Interligado Nacional (antiga Resolução Normativa nº 376/2009).
- Condições gerais de fornecimento de energia elétrica (antiga Resolução Normativa nº 414/2010).
- Modelo e condições de atendimento de energia elétrica para comunidades isoladas (constava na antiga Resolução Normativa nº 493/2012).
- Condições de acesso ao sistema de distribuição (antiga Resolução Normativa nº 506/2012 e Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)).
- Bandeiras Tarifárias - Procedimentos comerciais (antiga Resolução Normativa nº 547/2013).
- Aplicação da modalidade tarifária horária branca (antiga Resolução Normativa nº 733/2016).

Entremeando as questões específicas da geração fotovoltaica, foi publicada a Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021 que estabeleceu os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Esses procedimentos são aplicados a todas as empresas de distribuição de energia elétrica no país e têm como objetivo garantir a qualidade, segurança, eficiência e transparência no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. O PRODIST estabelece, em seus módulos ou anexos, de I a XI, regras em áreas como conexão de novos clientes, qualidade do fornecimento de energia, interrupção programada e emergencial do fornecimento, medição e faturamento da energia elétrica, além de padrões técnicos de instalação e manutenção do sistema.

elétrico. As empresas devem seguir as normas rigorosamente e estão sujeitas a penalidades em caso de descumprimento, enquanto os consumidores têm direito a recorrer à ANEEL em caso de prejuízo (ANEEL, 2021).

Mais recentemente, a Lei 14.300/2022, instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); alterando as Leis nº 10.848, de 15/03/2004, e 9.427, de 26/12/1996. Além de modificar outras resoluções, ela altera a REN nº 1.000/2021 no que diz respeito à conexão e faturamento de centrais de micro e minigeração distribuída (MMGD) em sistemas de distribuição de eletricidade, além de aprimorar as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) (ANEEL, 2022).

Tal lei foi regulamentada pela Resolução Normativa (REN) nº 1.059/2023, após extensa discussão do setor elétrico, que passou pela Consulta Pública nº 51/2022 e Audiência Pública nº 15/2022, realizadas pela ANEEL. A Resolução ANEEL nº 1059/2023 aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, e dá outras providências.

Dentre os principais pontos abordados pela REN nº 1.059 estão: a cobrança pelo uso de rede de distribuição, a modificação do prazo para conexão dos sistemas, o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica e alteração de regras do Sistema CNEE (Compensação de Energia Elétrica) em sistemas de distribuição (ANEEL, 2023).

Ao final dessa cronologia se encontra a Resolução Normativa nº 1.098/2024 que Aprimora a Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, em função da publicação da Lei nº 14.620, de 2023, que dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida, e dá outras providências.

Ainda, existem leis e normas no contexto nacional atual, que servem de apoio à legislação diretamente ligada a sistemas fotovoltaicos. Algumas destas foram destacadas a seguir:

- Lei nº 12.187/2009 (Política Nacional sobre Mudança do Clima): Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima, estabelecendo metas e instrumentos para a redução das emissões de gases de efeito estufa, incluindo incentivos à geração de energia renovável.
- Decreto nº 5.163/2004: Regulamenta a Lei nº 10.871/2004. Dispõe sobre o desconto do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) na aquisição de painéis solares.
- Decreto nº 7.156/2010: Institui o Programa Nacional de Apoio à Geração Distribuída de Energia Elétrica por Fontes Renováveis.
- Resolução Gecex nº 666 (Anexo II). Eleva a tarifa de importação de módulos fotovoltaicos de 9,6% para 25%, com vigência desde novembro de 2024 e, apesar de estar em vigor, permite que alguns importadores tenham acesso a uma cota de isenção até 30 de junho de 2025.
- ABNT/NBR 10899:2020: Energia solar fotovoltaica — Terminologia. Especifica os termos técnicos relativos aos sistemas de conversão fotovoltaica de energia radiante solar em energia elétrica.
- ABNT/NBR-IEC 62116:2012: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Fornece um procedimento de ensaio para avaliar o desempenho das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR).
- ABNT/NBR-IEC 61643-32:2022: Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão Parte 32: DPS conectado no lado corrente contínua das instalações fotovoltaicas -

**Princípios de seleção e aplicação.** Descreve os princípios de seleção, instalação e coordenação dos DPS destinados à utilização em sistemas fotovoltaicos (FV) até uma tensão máxima de 1.500 V em corrente contínua e no lado de corrente alternada, em um sistema fotovoltaico com tensão nominal máxima de 1.000 V em valor eficaz, com frequência de 50 Hz / 60 Hz.

- ABNT/NBR-IEC 61643-31:2022: Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão. Parte 31: DPS para utilização específica em corrente contínua - Requisitos e métodos de ensaio para os dispositivos de proteção contra surtos para instalações fotovoltaicas. Esta Parte da ABNT NBR IEC 61643 é aplicável aos dispositivos de proteção contra surtos (DPS), destinados à proteção contra os efeitos diretos e indiretos das descargas atmosféricas ou contra as sobretensões transitórias. Estes dispositivos são projetados para serem conectados no lado corrente contínua nas instalações fotovoltaicas de tensão contínua nominal até 1.500 V.
- ABNT/NBR 16612:2020: Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores - Requisitos de desempenho. Especifica os requisitos mínimos para a qualificação e aceitação de cabos singelos de condutor flexível para uso em corrente contínua em instalações de energia fotovoltaica, com tensão contínua máxima de 1,8 kV C.C. entre condutores e entre condutores e terra.
- ABNT/NBR 16767:2019 Versão Corrigida: 2021: Elementos e baterias estacionárias para aplicação em sistemas fotovoltaicos não conectados à rede elétrica de energia (*off-grid*) - Requisitos gerais e métodos de ensaio. Especifica os requisitos técnicos e métodos de ensaios aplicados às baterias estacionárias aplicadas em sistemas de energia fotovoltaica (SEFV) não conectadas à rede de energia elétrica (*off-grid*).

- ABNT/NBR-IEC 61215: Define os requisitos de qualificação para módulos fotovoltaicos.
- ABNT/NBR-IEC 61730: Estabelece os requisitos de segurança para módulos fotovoltaicos.
- ABNT/NBR 16690: Estabelece os requisitos para cabos utilizados em sistemas fotovoltaicos.
- ABNT/NBR 16274: Estabelece os requisitos de desempenho e segurança para inversores conectados à rede.
- Guia ABNT ISO/IEC 62548: Segurança Fotovoltaica - Requisitos de Documentação, Ensaios e Inspeção para Sistemas Fotovoltaicos.
- Resolução Normativa ANEEL nº 942/2021: Estabelece as regras e procedimentos para a geração distribuída de energia no âmbito do Mercado Livre de Energia. A resolução permite que os consumidores que optarem pelo Mercado Livre de Energia instalem seus próprios sistemas fotovoltaicos e vendam o excedente de energia para a rede elétrica.

Finalizando, tem-se o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), que tem como função assegurar a qualidade de produtos e serviços, a segurança e a saúde dos cidadãos, e promover a inovação e a competitividade do país e que instituiu a Portaria INMETRO Nº 140/2022 (e retificações posteriores) que aprova o regulamento técnico da qualidade e os requisitos de avaliação da conformidade para equipamentos de geração, condicionamento e armazenamento de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos (INMETRO, 2022).

O INMETRO também disponibiliza, em seu sítio de Internet, uma lista de inversores fotovoltaicos, uma lista de módulos fotovoltaicos e uma lista de baterias certificados e com suas respectivas eficiências energéticas, classificados pelo programa brasileiro de etiquetagem (PBE).

### **3.3 Normativas e legislações do estado do Paraná**

No âmbito estadual, as Secretarias de Governo são responsáveis pelo estabelecimento de políticas voltadas à regulamentação e ao incentivo da instalação de fontes geradoras renováveis. As companhias de energia elétrica definem as regras e procedimentos da distribuição de energia elétrica, assim como para a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede de distribuição.

No caso do Paraná, a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) atualmente denominada Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo (SEDEST) é o órgão responsável por formular, coordenar, executar e desenvolver políticas voltadas à proteção, conservação e restauração do patrimônio natural, bem como gerenciamento de recursos hídricos, saneamento ambiental, resíduos sólidos, gestão territorial, política agrária, fundiária, mineral e geológica.

A regulamentação ambiental no estado foi regida inicialmente pela Resolução SEMA/IAP nº 09/2010 e a Portaria IAP nº 19/2017, posteriormente revogadas e substituídas pela Resolução SEDEST nº 11/2021 a qual estabelece definições, critérios, diretrizes e procedimentos para licenciamento de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar, no âmbito do Estado do Paraná. Neste caso, também define o porte, o tipo de licenciamento e o estudo ambiental a que serão submetidas a geração de energia elétrica a partir de fonte solar, indicando a disponibilização de termos de referência para cada tipo de estudo ambiental a ser aplicado, em função de seu campo solar (SEDEST, 2021).

Por outro lado, no que tange às normas próximas dos projetos elétricos e acessos à rede de distribuição e transmissão, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL-Dis) é a responsável por ditar as regras pois, é concessionária de energia que opera quase a totalidade das redes de distribuição do estado, sendo 414 municípios, 5.224.635 unidades consumidoras (UC) (ANEEL, 2025).

Assim, destacam-se aqui algumas de suas normas e procedimentos relacionados à geração fotovoltaica:

- NTC-903105/2011 - Geração Própria - Operação em Paralelismo Momentâneo.
- NTC-891001 a 1004/2016 – Sistemas de Geração Fotovoltaico – Tipos 1 a 4 (Montagem).
- NTC-891006 a 1009/2016 – Sistemas de Geração Fotovoltaico – Tipos 1 a 4 (Esquemas).
- NTC-905100/2017 - Acessantes de Geração Distribuída (com comercialização de energia).
- NTC-903107/2019-Sistema de Geração Própria - Operação Isolada.
- NTC-905200/2024 - Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da Copel com compensação de energia e Anexo.
- NTC-903108/2024 - Geração Própria - Atendimento aos Fumicultores.

### **3.4 Normativas e legislações nos municípios**

No âmbito Municipal as prefeituras podem definir regras e procedimentos específicos para a instalação de sistemas fotovoltaicos em seus municípios, como a necessidade de licenciamento e autorização.

Como exemplo, para o município de Curitiba, podem ser citadas a Lei nº 15.277/2018 que autoriza o município a conceder o uso de bens públicos municipais para geração de energias renováveis (CURITIBA, 2018) e a Lei Ordinária nº 15.778/2020, que dispõe sobre a geração de energia elétrica fotovoltaica nos lagos e parques municipais (CURITIBA, 2020).

Nessa esteira, quando da ausência de legislação municipal específica, deve ser sempre observado o Código de Postura e Obras de cada município.

# **CAPÍTULO 4: ANÁLISE DE FALHAS E TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Neste Capítulo são apresentados os principais problemas e técnicas de verificação para garantir o funcionamento eficaz dos Sistemas Fotovoltaicos (SFV), especialmente em áreas rurais. A inspeção de SFVs é fundamental para garantir a eficiência, segurança e confiabilidade desses sistemas (VERMA, 2024). Os desafios operacionais, enfrentados ao longo da vida útil dos SFVs, podem ser minimizados se identificados com rapidez e precisão. Para isso, devem ser verificados desde os módulos solares, inclinação e orientação, os inversores, o conjunto de cabos, bem como o sistema de proteção e a estrutura geral da instalação. Além disso, podem ser empregadas nas inspeções ferramentas tecnológicas, como câmeras termográficas e drones. Primeiramente, são apresentados os principais fatores que afetam o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, e posteriormente, as técnicas de inspeção que possibilitam a sua constatação para posterior correção.

## **4.1 Fatores que Afetam a Eficiência dos Sistemas Fotovoltaicos**

Nesta seção são apresentados os principais tipos encontrados na literatura atualmente. Primeiramente, são tratados os problemas de irradiação esperada e real, influenciada também pelas condições de sujidade, sombreamento e ângulo de inclinação e orientação dos painéis. Na sequência são abordadas as possíveis interferências devido a temperatura ambiente, perdas nos condutores elétricos e dimensionamento inadequado dos inversores. Por fim, são apresentadas as condições de descasamento (*mismatch*) do sistema e fatores intrínsecos de degradação dos módulos fotovoltaicos.

### **4.1.1 Irradiância e sua influência na geração de energia elétrica**

Os módulos fotovoltaicos captam a irradiação solar (instantânea) para a geração de energia elétrica. Trata-se da potência radiante incidente por unidade de área ( $\text{W/m}^2$ ) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Por isso, medir ou estimar a irradiação solar é crucial para prever o desempenho e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos (AL-ADDOUS ET AL., 2017; MA et al., 2016).

Com o aumento da irradiação, a temperatura da célula solar também aumenta. Para cada aumento de 100 W/m<sup>2</sup> na irradiação, a temperatura da célula aumenta em 4,93 °C e sua potência de saída aumenta em 2,94 W (RAHMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2015).

Existem dispositivos específicos para medir a irradiação solar, como piranômetros e medidores de irradiação (AL-ADDOUS et al, 2017; SEAWARD, 2019; PANDEY, 2013). Além disso, há ferramentas econômicas disponíveis para estimar a irradiação solar (AL-TAANI; ARABASI, 2018). A maior fonte de erro nas classificações de potência dos dispositivos fotovoltaicos é geralmente associada ao instrumento e ao procedimento usado para medir a irradiação (KING et al., 2004).

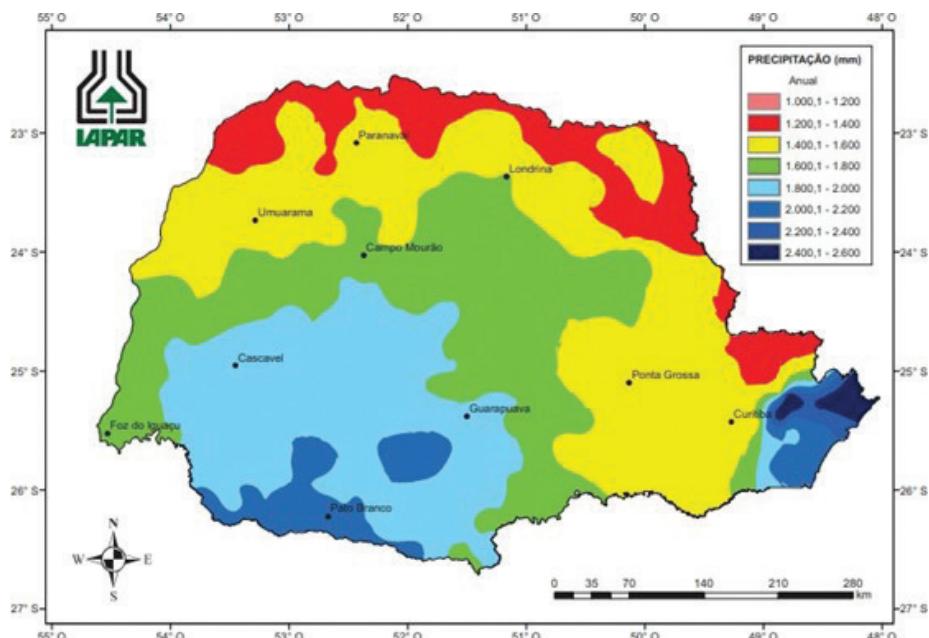
#### **4.1.2 Sujidade e acúmulo de detritos**

Sujidade refere-se aos resíduos de compostos inorgânicos encontrados em poeira, pólen de plantas, carbono amorfo proveniente da queima de combustíveis fósseis e incêndios florestais, bem como resíduos oleosos originados de processos produtivos e tráfego de veículos (Junior, et al., 2018). A acumulação de sujeira nos módulos de um sistema solar fotovoltaico é um processo natural, e suas características e taxas de deposição variam conforme a localização, influenciadas pela geografia, clima e urbanização da região em questão. As características típicas da sujeira incluem tamanho, distribuição, densidade, formato, composição química e carga. Condições ambientais importantes que afetam essas características incluem a umidade, o vento (com suas variações de velocidade, direção e intensidade) e as variações sazonais. Por exemplo, em ambientes com alta umidade, as partículas de sujeira tendem a ficar mais viscosas nos painéis fotovoltaicos, o que reduz o efeito da limpeza do vento (TONOLO, 2019).

No caso específico do Paraná, segundo o Atlas Climático (NITSCHE, 2019) do estado as regiões litorâneas e centro-sul do território têm maior precipitação anual, indicando uma maior taxa de auto-limpeza, vide Figura 4.1. Já para o caso das regiões de Curitiba, Ponta Grossa e toda a região Norte do estado, há menor precipitação anual, indicando maiores períodos de estiagem e, por consequência, maior acúmulo de sujeira sobre os sistemas fotovoltaicos instalados nessas regiões.

A precipitação é apenas um dos fatores que impactam nisso, uma vez que cada localidade possui características específicas, desde o tipo de solo, vegetação próxima, atividades econômicas desenvolvidas no entorno da instalação, relevo e até mesmo o material de construção da superfície.

Figura 4.1: Precipitação Anual no Estado do Paraná.



Fonte: NITSCHE (2019)

No caso de acúmulo de sujeira nos módulos fotovoltaicos, uma parte da luz solar que deveria ser absorvida pelo painel é bloqueada ou desviada, resultando na redução da potência de saída do sistema fotovoltaico e, por consequência, diminuição na geração de energia elétrica em até 3% (SINHA et al., 2014).

Quando os módulos são instalados com alguma inclinação, na maioria dos casos, eles são naturalmente limpos pela chuva e pelo vento. No entanto, alguns tipos de sujeira, como excrementos de pássaros, podem aderir à superfície mesmo após chuvas intensas, requerendo intervenção humana para realizar a limpeza. A região mais crítica de um módulo é geralmente a borda inferior, especialmente quando a inclinação é menor, pois é onde a sujeira tende a se acumular na moldura (TONOLO, 2019; ALVES, 2018).

Algumas características físico-químicas devem estar presentes na superfície de um módulo fotovoltaico para minimizar o acúmulo de sujeira, como: elevada dureza, que reduz a incrustação de partículas e aumenta a resistência ao desgaste; baixa rugosidade para diminuir a probabilidade de incorporação de partículas; hidrofobicidade que reduz a atração por compostos iônicos, a absorção de sólidos e a retenção de água; e baixa energia superficial, diminuindo a propensão a reações químicas com o meio.

#### **4.1.3 Sombreamento**

O sombreamento é um fator importante de perdas em um SFV. Mesmo que a sombra atinja um único módulo, toda a *string* é afetada. Patel e Agarwal (2008) desenvolveram um método para obter as curvas I-V (corrente-tensão) e P-V (potência-tensão) de um arranjo fotovoltaico em condições de sombreamento parcial. Nestas condições, as curvas apresentaram múltiplos picos de potência, inviabilizando os métodos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) tradicionais, que assumem a existência de um único ponto de máxima potência. Ou seja, o pico de potência depende da configuração do arranjo PV e do padrão de sombreamento.

Além disso, Ganesan et al. (2025) destacam que diferentes configurações de conexão de painéis fotovoltaicos podem melhorar

significativamente a geração de energia sob sombreamento parcial. Algumas delas proporcionam melhorias expressivas no desempenho energético, chegando a um aumento de até 57%. Sendo assim, em condições onde não é possível extinguir o sombreamento, a modelagem preditiva, baseada em inteligência artificial, pode orientar configurações para um SFV mais eficiente.

Quando há acúmulo de sujeira sobre o módulo, como folhas de árvores, também pode haver configuração de sombreamento parcial, implicando em problemas como pontos quentes e redução da vida útil dos módulos (ALVES, 2018).

Sempre que possível, recomenda-se avaliar o local de instalação do SFV para evitar o sombreamento por elementos fixos, como árvores, edificações e demais elementos construtivos.

#### **4.1.4 Ângulo de inclinação e orientação dos painéis fotovoltaicos**

O ângulo de inclinação ideal para um sistema fotovoltaico é aquele que maximiza a produção anual de energia em um local específico. Como o arco do Sol muda ao longo do ano, os ângulos de inclinação mais rasos geralmente geram mais energia durante os meses de verão, enquanto os ângulos mais íngremes são mais eficazes durante os meses de inverno. Portanto, é importante determinar o ângulo de inclinação ideal para cada local de instalação a fim de otimizar a geração de energia ao longo do ano (ABDEEN et al., 2017; MONDOC; POP, 2010).

Estudos recentes têm demonstrado que a otimização do ângulo de inclinação e a orientação do módulos PV impactam significativamente na produção de energia (SEPÚLVEDA-OVIDEO, 2025). Tajjour et al. (2023) verificaram que a correta inclinação e orientação, baseada na localização geográfica, podem gerar um ganho de 7,22% na energia gerada. A orientação quanto à localização geográfica sugere que para instalações no hemisfério sul, a orientação dos PV deve ser para o norte geográfico, enquanto que, para SFV localizados no hemisfério norte global, a orientação deve ser para o sul.

Sob o ponto de vista da inclinação, sugere-se que seja acompanhada a latitude da instalação. Em Xu et al (2017), observa-se que alguns autores sugerem que o ângulo ótimo de inclinação é baseado na latitude local com uma variação de  $\pm 15^\circ$ , enquanto outros recomendam uma modificação de  $\pm 8^\circ$ , além de outros que sugerem  $\pm 2.8^\circ$ . Por isso, diversos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para a estimação do ângulo ideal, indicando a necessidade de monitoramento e ajustes constantes para maximizar a produção de energia em condições climáticas cada vez mais diversas (SEPÚLVEDA-OVIEDO, 2025).

Ainda, o ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico desempenha um papel fundamental na taxa de perda de eficiência devido à sujeira e na frequência necessária de limpeza dos módulos fotovoltaicos em qualquer local. Levando em consideração a influência da gravidade, superfícies horizontais têm uma tendência maior de acumular poeira em comparação com superfícies inclinadas, portanto é recomendável que, mesmo em regiões próximas à linha do Equador, os sistemas fotovoltaicos sejam instalados com uma inclinação mínima de  $10^\circ$  para reduzir o acúmulo de sujeira e favorecer a auto limpeza (TONOLO, 2019).

#### **4.1.5 Efeito da temperatura sobre os módulos fotovoltaicos**

A temperatura desempenha um papel significativo no desempenho dos painéis fotovoltaicos (FV), afetando sua eficiência e produção de energia. À medida que a temperatura de um painel fotovoltaico aumenta, várias características e grandezas físicas sofrem alteração, influenciando o seu desempenho geral.

Primeiramente, a eficiência dos materiais semicondutores dentro das células fotovoltaicas diminui à medida que a temperatura aumenta. Isto se deve às propriedades intrínsecas desses materiais; à medida que a temperatura aumenta, os elétrons ganham mais energia e movem-se mais livremente dentro do semicondutor, levando ao aumento das perdas por recombinação (perda relacionada a perda de lacunas) e à redução da mobilidade dos elétrons. Como resultado, a conversão da luz solar em eletricidade

torna-se menos eficiente, levando a uma diminuição na produção geral de energia do painel (PINHO; GALDINO, 2014).

Além disso, as temperaturas elevadas podem causar um aumento na resistência das ligações elétricas dentro do painel fotovoltaico, conhecido como resistência em série. Esta resistência leva a perdas adicionais de energia nos circuitos do painel, reduzindo ainda mais a sua eficiência geral. Além disso, as altas temperaturas podem acelerar a degradação dos materiais fotovoltaicos ao longo do tempo, afetando a sua confiabilidade a longo prazo e a vida útil dos painéis. O calor excessivo pode causar estresse térmico nos materiais, levando à delaminação, corrosão e outras formas de degradação que podem comprometer o desempenho e a durabilidade do painel (RAHMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2015)

No entanto, é importante observar que a temperatura também pode ter alguns efeitos benéficos nos painéis fotovoltaicos. Por exemplo, um aumento moderado na temperatura pode levar a uma leve diminuição no gap de energia dos materiais semicondutores, o que pode aumentar a absorção da luz solar e melhorar a eficiência do painel sob certas condições.

#### **4.1.6 Perdas na fiação elétrica**

Em um sistema fotovoltaico, o cabeamento elétrico desempenha um papel crucial, pois é responsável pela condução da energia elétrica transformada para as cargas. Com tensões que podem atingir 1.500 V, é fundamental garantir a devida isolação dos condutores. Além disso, uma porção dos cabos fica exposta às condições ambientais, exigindo a necessidade de proteção contra os raios ultravioleta, à chuva e a outras intempéries (TONOLO, 2019).

Um projeto de sistema fotovoltaico é, antes de tudo, um projeto de instalações elétricas e, portanto, deve seguir as normas reguladoras vigentes para tal tipo de projeto. Dessa forma, para a parte em corrente alternada de tal sistema, deve-se praticar as recomendações presentes na NBR 5410, incluindo as recomendações quanto à dimensionamento dos condutores e eletrodutos, isolamento compatível, condutores com proteção

correta, respeitar os limites de queda de tensão, entre outras recomendações compatíveis a toda gama de projetos elétricos (VILLALVA, 2020).

Em projetos de corrente contínua, a norma NBR 16690 recomenda que a queda de tensão máxima no circuito CC seja de 3%. Uma queda de tensão elevada causaria uma perda de geração, afastando o sistema do ponto de máxima potência (PMP) (NBR 16690, 2019). O dimensionamento dos cabos da parte CC segue os mesmos critérios presentes na NBR 5410, porém comercialmente é mais comum a utilização de cabo de 4 mm<sup>2</sup> e 6 mm<sup>2</sup>. As conexões são realizadas utilizando conectores do tipo MC4, que devem ser do mesmo fabricante em um arranjo fotovoltaico (NBR 16690, 2019; VILLALVA, 2020).

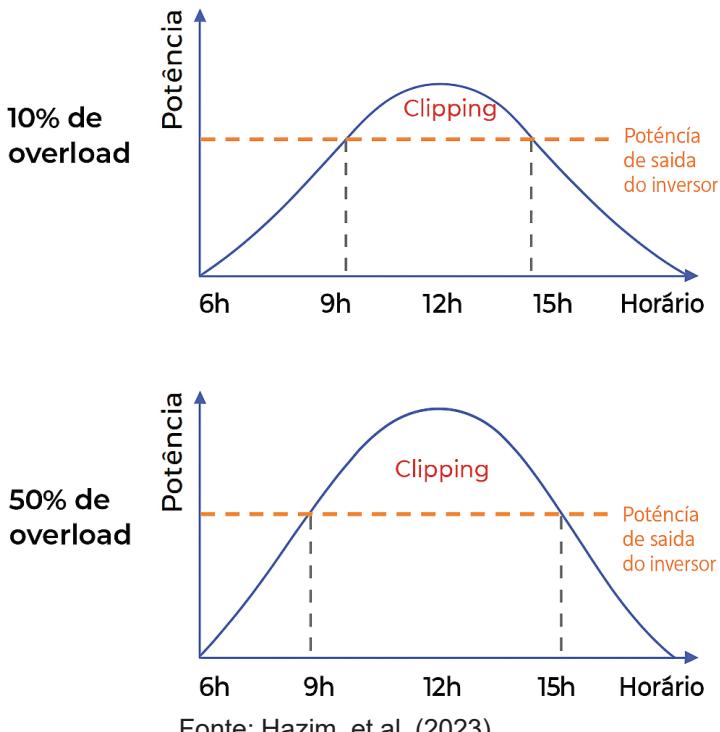
#### **4.1.7 Sobrecarga de inversores (Overload)**

O dimensionamento dos inversores em sistemas fotovoltaicos tem sido extensivamente estudado na literatura. Durante esses experimentos, o tamanho do inversor fotovoltaico foi determinado utilizando uma das duas abordagens descritas nos estudos: (1) ele era dimensionado para ser igual à capacidade nominal do conjunto fotovoltaico; e (2) como uma regra geral, o inversor era projetado com capacidade reduzida, representando 70% da capacidade do conjunto fotovoltaico. (CHEN et al., 2013). Porém, ambas abordagens falham em levar em consideração elementos cruciais que determinam o tamanho ideal do inversor fotovoltaico. Estudos adicionais recentes têm determinado o tamanho ideal dos inversores fotovoltaicos por meio de abordagens sistemáticas que consideram uma variedade de variáveis, como circunstâncias específicas, fatores econômicos e características intrínsecas do inversor (CHEN et al., 2013, PÉREZ-HIGUERAS et al., 2018).

O termo sobrecarga do inversor geralmente se refere à relação entre a potência nominal de saída CA do inversor e sua potência máxima de entrada CC em um ambiente de teste controlado. O superdimensionamento é uma métrica essencial para avaliar o desempenho do inversor e é um dos principais fatores considerados

na instalação de usinas fotovoltaicas (HAZIM, et al., 2023). A Figura 4.2 ilustra como o subdimensionamento do inversor afeta a potência de saída.

Figura 4.2. Comparativo de potência de módulos conectados a diferentes tecnologias de inversores.



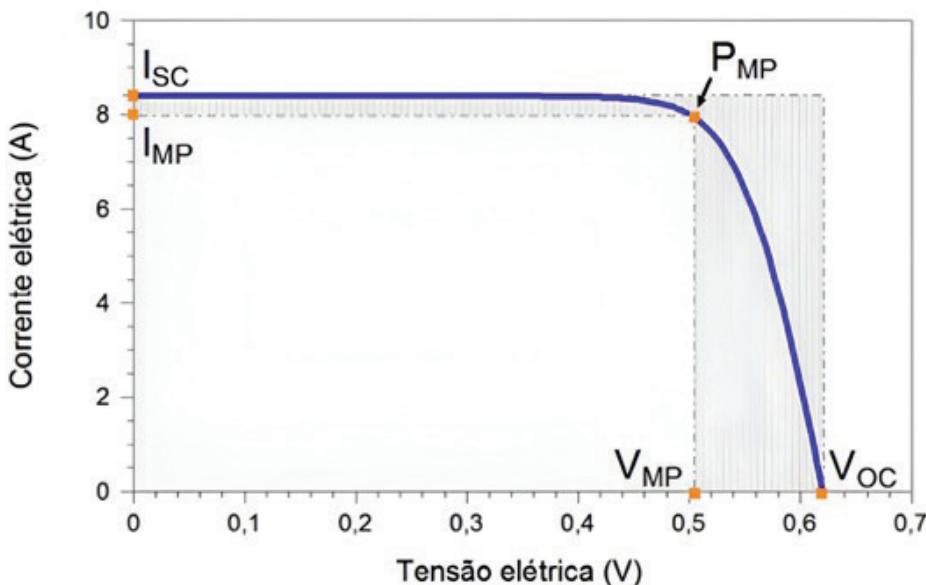
Fonte: Hazim, et al. (2023)

É evidente que em situações de carga excessiva, o fenômeno de clipping é mais pronunciado, o que significa que, mesmo que o inversor opere por um período prolongado em sua potência nominal, uma quantidade maior de energia é desperdiçada. A solução ideal para um sistema FV nem sempre é ter uma carga excessiva, do ponto de vista econômico. A incorporação de módulos FV aumenta os custos do sistema, portanto é crucial estabelecer uma relação entre a energia gerada e os custos de implementação. Essa relação é conhecida como custo nivelado de energia (LCOE).

#### 4.1.8 Mismatch entre módulos fotovoltaicos

Segundo o dicionário online da Universidade de Cambridge, a palavra “*mismatch*” encontra seu significado equivalente no português brasileiro através dos termos “incompatibilidade” ou “falta de combinação” (GALDINO; PINHO, 2014). No âmbito da geração de energia solar fotovoltaica, o termo é empregado para se referir à divergência dos pontos de máxima potência dos módulos fotovoltaicos em operação série ou paralelo, fator este que impossibilita a maximização da potência total de sistemas geradores convencionais, onde há uma pluralidade de módulos para um único MPPT. Para compreender este conceito, convém revisar o comportamento de uma célula fotovoltaica através de sua curva característica, conforme pode ser visto na Flgura 4.3.

Figura 4.3. Curva característica de uma célula de Si.

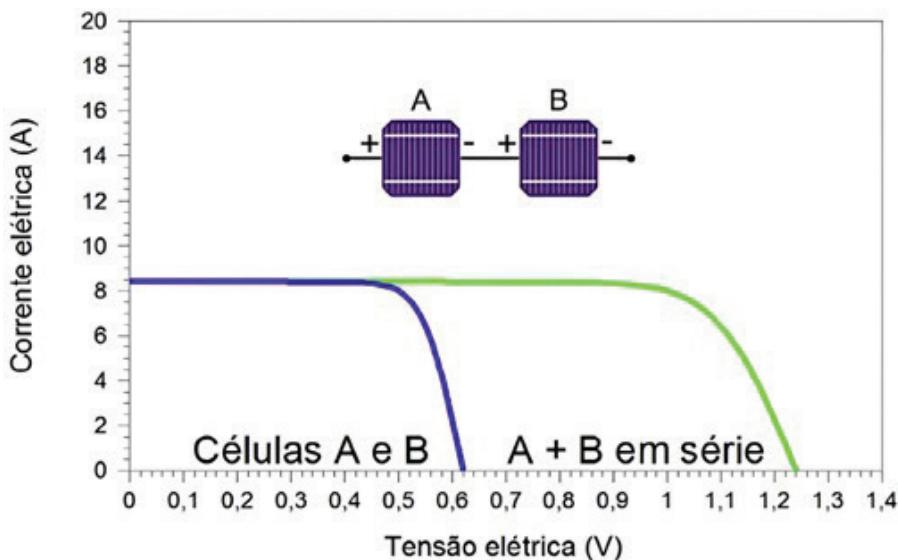


Fonte: Galdino e Pinho (2014)

Observa-se, através da Figura 4.3, que a célula FV opera em seu ponto de máxima potência no “joelho” da curva I-V, onde a multiplicação dos parâmetros de corrente e tensão resultam no seu melhor desempenho (PMP), a uma dada condição de irradiação e temperatura.

Agora, deve-se lembrar também que um módulo fotovoltaico é caracterizado principalmente pela conexão de dezenas de células fotovoltaicas em série (normalmente 72 células). Desta forma, a tensão gerada por cada uma delas é somada, e a corrente de toda a malha é fixada, conforme pode ser visto na Figura 4.4.

Figura 4.4. Curva característica de uma associação série de duas células de Si iguais.

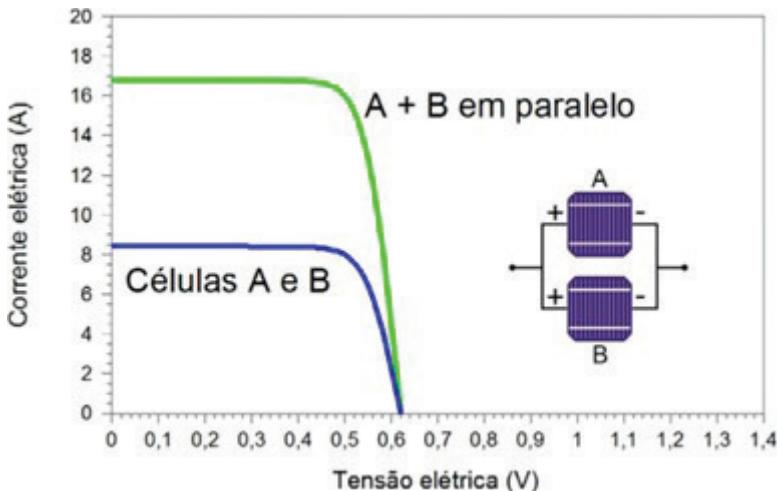


Fonte: Galdino e Pinho (2014)

Apesar de ser menos comum a nível das células, mas ainda muito presente nos arranjos de módulos, as associações de células em paralelo também podem ser feitas, de forma a somar as correntes

de cada elemento e de fixar, neste caso, a tensão das malhas. Isso pode ser exemplificado pela Figura 4.5.

Figura 4.5. Curva característica de uma associação paralelo de duas células de Si iguais.



Fonte: Galdino e Pinho (2014)

Um outro ponto a ser analisado, é a complexidade (ou impossibilidade) de fabricação das células com ideal precisão, para perfeita padronização dos parâmetros elétricos. As limitações físicas do material impedem que todas tenham a mesma curva característica de operação, resultando em ligeiras diferenças nos valores de tensão e corrente de máxima potência para cada uma delas. Sendo essa, a essência do problema conhecido como *mismatch*.

Durante a operação de um grupo de células, a corrente de toda a malha é limitada pela menor corrente de máxima potência da série. De maneira análoga, caso haja uma associação paralelo, a tensão de todas as malhas é limitada pela célula com menor tensão de máxima potência. Em outras palavras, a célula menos potente impede as outras de alcançarem seu ponto de máxima potência,

resultando na fabricação de painéis com pequenas diferenças de potência máxima.

No entanto, a divergência das potências pico em termos de valores fica abaixo dos 5% (MANSUR; AMIN; ISLAM, 2019), sendo mínima o suficiente para garantir uma boa operação do módulo sem grandes perdas. O *mismatch* só começa a representar um fator significativo para perdas quando se considera uma ótica maior, do ponto de vista de arranjos de módulos. Assim como as células são dispostas em ligações em série no circuito de um módulo, os SFV caracterizam-se principalmente por arranjos em série de dezenas de módulos comumente chamados de *strings*.

A diferença é que quanto mais significativa for a área de operação dos painéis, mais sujeito o sistema estará às diferenças pontuais de irradiância solar, incidências de sombras localizadas, concentrações de sujeira, pequenas divergências de temperatura, entre outros fatores limitantes à plena produção dos módulos.

Desta forma, o *mismatch* configura-se não como uma fonte primária de perdas para a geração de energia solar fotovoltaica, mas sim como um fator potencializador daquelas causadas por outras fontes, ao transmitir as características elétricas do módulo com o pior desempenho para todo o arranjo ao qual está conectado.

Assim, mesmo que um único módulo opere com baixa potência, qualquer que seja o motivo, todo o arranjo ao qual está conectado é afetado e forçado a operar com seus parâmetros elétricos reduzidos, o que, ao decorrer do tempo, acarreta em uma perda de energia significativa para os módulos em condições de operar com um melhor desempenho.

É importante observar que o *mismatch* é muito mais uma complicação atribuída à tecnologia empregada ao inversor de frequência utilizado na planta do que um problema de fabricação e operação das células FV, visto que existem soluções de conversão em que há o rastreamento do ponto de máxima potência a nível de módulo. Como por exemplo, a aplicação do MLPE (*Module-Level Power Electronics*), que são soluções de inversores capazes

de contornar as piores situações proporcionadas pelo *mismatch*, obtendo a operação de cada módulo no seu melhor desempenho possível, a despeito do tradicional inversor *string*. Outras técnicas também são utilizadas, como o uso de microinversores e otimizadores de potência.

De maneira simplificada, os microinversores configuram uma resposta ao problema do *mismatch* por fracionar a conversão da potência total do sistema em vários inversores pequenos (normalmente até 2 kW), cada um com o número de MPPTs geralmente igual à quantidade de módulos aos quais se conectam. Assim, atuam rastreando os melhores parâmetros de operação para cada módulo de maneira específica sem que um influencie no outro. A desvantagem é refletida no custo mais elevado e na maior ocorrência de falhas na operação ao se dividir a inversão do sinal CC em numerosos equipamentos com um circuito de potência completo para chaveamento de alta frequência. Adicionalmente, a dificuldade na manutenção dos microinversores é significativamente agravada pelo fato de serem instalados juntamente aos módulos, na maioria das vezes em telhados de residências e edifícios de difícil acesso.

Já a solução por otimizadores de potência é uma espécie de união das tecnologias micro e *string*, obtendo as vantagens de cada uma delas, de forma combinada. A inversão de sinal é feita de maneira centralizada, tal qual o inversor tradicional. No entanto, o rastreamento do ponto de máxima potência é feito a nível de módulo, assim como na solução por microinversores. Desta forma, os chamados otimizadores de potência nada mais são do que circuitos MPPTs que são instalados juntamente aos módulos e que enviam o sinal CC condicionado para o inversor realizar a conversão em CA. Apesar de contar com menos circuitos complexos em comparação aos microinversores, a solução por otimizadores de potência é a mais onerosa das três tecnologias citadas, a respeito da sua elevada eficiência e imunidade ao efeito do *mismatch* combinada à centralização da inversão do sinal um único circuito mais robusto.

#### **4.1.9 Degradação das células FV ao longo do tempo**

Quando o assunto é degradação de células fotovoltaicas, dois efeitos se destacam: o LID e o PID. Ambos são caracterizados pela redução do potencial elétrico, resultando em uma eficiência de conversão atenuada. A diferença entre esses dois efeitos está no fator desencadeador. Enquanto o primeiro é induzido pela exposição das células à luz, o segundo está associado à aplicação de tensões negativas elevadas nos arranjos fotovoltaicos.

A degradação induzida pela luz, ou LID (*Light-Induced Degradation*), trata-se de um modo de falha ativado pela exposição à radiação luminosa, com diferentes causas e efeitos, a depender da tecnologia utilizada nos módulos FV. Nas células constituídas por c-Si, o efeito LID é causado, principalmente, pela ativação induzida por elétrons da combinação entre o oxigênio e o material dopante das células do tipo P, presentes na grande maioria dos módulos FV no mercado mundial atual. As células de silício do tipo P são costumeiramente dopadas com átomos de boro, que podem ser contaminados pelo oxigênio utilizado na fabricação dos wafers pelo processo Czochralski, formando estruturas que atuam como centros de recombinação. Por sua vez, na presença de luz, esses complexos boro-oxigênio capturam elétrons que ficam indisponíveis para formação da corrente fotogerada, acarretando em uma redução na condutividade das células. O fenômeno do LID começa a ocorrer já no momento inicial de exposição das células à luz, e desenvolve-se com maior intensidade no decorrer do primeiro ano de utilização do módulo FV, configurando uma queda de eficiência média de 2,5% para a tecnologia policristalina e 3% para a monocristalina (VILLALVA, 2021).

Uma variação do LID que também é muito presente nas células de silício cristalino do tipo P, especialmente as passivadas (PERC) de alta eficiência, é o fenômeno conhecido por LeTID (*Light and Elevated Temperature Induced Degradation*), que ocorre de forma mais prolongada ao longo da vida útil do módulo fotovoltaico, sobretudo em locais com irradiação e temperatura mais elevadas. Enquanto o LID se desenvolve intrinsecamente como um processo

de estabilização eletrônica a uma velocidade dependente apenas da intensidade da radiação luminosa, no fenômeno LeTID a temperatura de operação do módulo também influencia ativamente na evolução da falha. Por se tratar de um fator que não ocorre apenas no momento inicial de operação do módulo, o LeTID configura uma queda de eficiência mais intensa no período total de vida útil do produto, quando comparado ao LID. No geral, os fabricantes garantem valores acima de 80% da potência pico original após 25 anos de operação para módulos monofaciais, e 30 anos para os bifaciais, ambos com células do tipo P (VILLALVA, 2021).

Uma maneira de se mitigar os efeitos do LID e LeTID, que tem sido cada vez mais explorada, é a fabricação de módulos com células de silício do tipo N, que utilizam o fósforo como elemento dopante (SOPORI et al., 2012).

Já o PID (*Potential Induced Degradation* – degradação induzida por potencial) é um efeito de degradação do módulo fotovoltaico, causando perdas significativas de potência ao longo do tempo. Trata-se de um fenômeno observado em painéis solares fotovoltaicos (PV), onde há uma diferença de potencial elétrico não intencional entre os diferentes componentes de um sistema fotovoltaico (VINTURINI, 2019). Essa diferença de potencial pode surgir devido a fatores como projeto do sistema, condições ambientais e propriedades do material. Como exemplo, tem-se o potencial entre as células solares e a estrutura aterrada do painel, levando a correntes de fuga; a alta umidade ou níveis de umidade que podem agravar a condutividade dos materiais dentro do painel; contaminantes como poeira, sujeira ou depósitos de sal na superfície do painel que criam caminhos condutores para correntes de fuga; ou projeto de sistema ou práticas de instalação inadequadas que não abordam adequadamente as possíveis diferenças (VINTURINI, 2019).

O efeito PID pode ser mitigado através do uso de materiais, como encapsulantes e folhas resistentes a PID; aterramento adequado; isolamento dos componentes elétricos da umidade e contaminantes; realização de inspeções de rotina e limpeza dos painéis solares; e a utilização de sistemas de monitoramento para detecção de perdas de potência.

## **4.2 Inspeções**

### **4.2.1 Inspeção Visual**

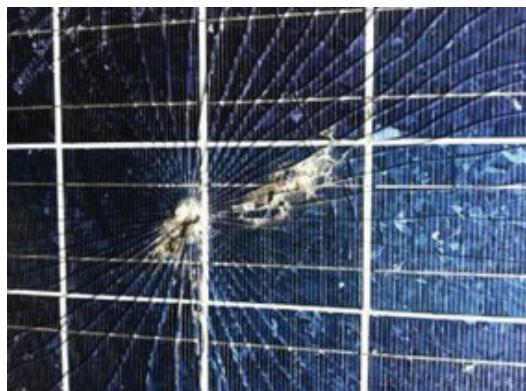
A inspeção visual é a técnica que permite a identificação de irregularidades a olho nu. Nas Usinas Fotovoltaicas (UFVs) pode-se verificar a integridade (quebra, trincas, microfissuras e delaminação), além do acúmulo de sujeira e sombreamentos nos módulos; as condições dos condutores, conexões e demais materiais empregados; a existência de aterramento; o estado de conservação dos equipamentos de conversão de energia e a ocorrência de incidência direta de insolação; assim como a sinalização adequada e isolamento da área onde a usina foi instalada. Dessa forma, a inspeção visual auxilia na detecção de perdas de performance reversíveis e irreversíveis, além da segurança das instalações (GALDINO; SILVA, 2016; MAGHAMI et al., 2016), e tem sido avaliada e incrementada em estudos recentes (JALAL; KHALIL; HAQ, 2024; MISHRA et al., 2024).

#### **4.2.1.1 Módulos Fotovoltaicos**

A não integridade dos módulos fotovoltaicos pode acontecer devido a quebras, trincas, microfissuras ou delaminação, conforme Figura 4.6, decorrentes da fabricação das placas, transporte, instalação ou exposição às condições climáticas. As quebras e trincas são visíveis a olho nu, enquanto as microfissuras se desenvolvem nas células ou nas camadas dos módulos (GALDINO; SILVA, 2016).

Quando acontece uma microfissura na camada superior do módulo, a entrada de umidade fica facilitada, assim como na ocorrência da delaminação, que consiste na perda de adesão (separação) do encapsulante-célula, vidro-encapsulante ou encapsulante-backsheet (polímero). A umidade aumenta o risco de degradação dos componentes internos, podendo ocasionar a corrosão dos metais presentes na estrutura, além da degradação das propriedades químicas e físicas das partes constituintes do módulo, consequentemente reduzindo a vida útil da usina.

Figura 4.6 - (a) Quebra ou trinca e (b) Delaminação dos Módulos fotovoltaicos.



(a)



(b)

Fonte: Galdino e da Silva (2016); Amara-e (2020)

A sujidade em módulos fotovoltaicos é um problema comum que afeta diretamente o desempenho e a eficiência (MAGHAMI et al, 2016; QUEST; BALLIF; VIRTUANI, 2024), uma vez que as instalações

são abertas e sujeitas a poeira, poluição, resíduos de animais, folhas e outros detritos. Isso fica ainda mais evidente nas instalações localizadas na zona rural, por conta da maior quantidade de material particulado. Na Figura 4.7 pode-se observar módulos fotovoltaicos com acúmulo de poeira e dejetos animais, encontrados durante as visitas às propriedades vinculadas ao Programa Renova-PR, pauta de estudo do NAPI SOLAR em 2023 e 2024.

A sujidade encontrada na superfície dos módulos leva ao bloqueio da luz solar, reduzindo a quantidade de radiação que atinge as células fotovoltaicas, reduzindo a conversão da energia e impactando a eficiência e o retorno esperado do investimento. Além disso, a falta de limpeza acelera a degradação dos materiais que compõem os módulos, podendo ocasionar a substituição de componentes prematuramente.

Figura 4.7: Poeira e dejetos de animais nos módulos.



Fonte: Autores

O sombreamento, observado na Figura 4.8, interfere na capacidade de geração de energia elétrica da UFV levando a uma perda de 10 a 40% de energia (TANG et al., 2024), uma vez que diminui a quantidade de luz solar que atinge os módulos, também foi encontrado nos trabalhos do NAPI SOLAR, em avaliação de usinas vinculadas ao projeto RENOVA-PR. O sombreamento pode ocorrer por obstruções naturais, como árvores, ou por obstruções artificiais, como estruturas de montagem mal posicionadas. Quaisquer condições que contribuam para o aumento do sombreamento sobre os módulos fotovoltaicos devem ser avaliadas durante a manutenção de rotina. Os arranjos fotovoltaicos montados no solo também podem ser suscetíveis a sombreamento de arbustos ou grama alta. Ainda, onde as observações visuais não podem determinar a extensão dos problemas de sombreamento, uma ferramenta tecnológica como o drone pode ser utilizada.

Figura 4.8: Módulos Fotovoltaicos sombreados em uma instalação no solo.



Fonte: Autores.

#### **4.2.1.2 Condutores, conexões e demais materiais**

Os cabos e conexões encontrados nos trabalhos do NAPI SOLAR (Figura 4.9a) em UFV indicam a necessidade de serem adequados para exposição às condições climáticas. Entretanto, mesmo que a escolha dos materiais tenha sido adequada, os condutores podem sofrer danos ao longo da vida útil. Por isso, a inspeção visual pode permitir a identificação de avarias no isolamento e deformações (desgastes ou rachaduras). Além disso, é possível observar visualmente se todas as conexões elétricas estão bem apertadas e seguras, uma vez que conexões mal feitas podem causar falhas e aquecimento.

Outro elemento importante nas instalações elétricas das UFVs são os eletrodutos (Figura 4.9b), já que atuam como proteção e isolamento dos condutores. Deve-se verificar as condições dos eletrodutos, se não estão amassados, rachados ou quebrados. Ainda, deve-se inspecionar se existem sinais de corrosão nos terminais e conexões, comprometendo a condução elétrica.

Figura 4.9: Elementos em boas condições de um UFV (a) conectores e condutores; (b) eletrodutos.

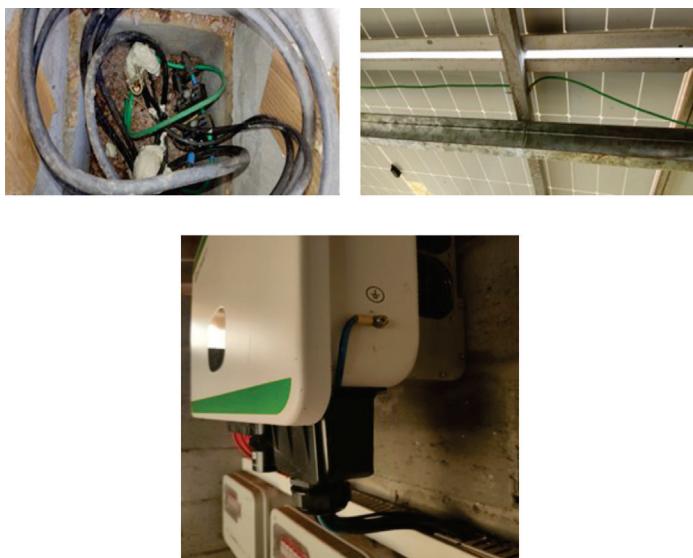


Fonte: Autores.

#### **4.2.1.3 Aterramento**

Toda UFV deve possuir aterramento para garantir a segurança da usina e do pessoal que realiza a operação e sua manutenção, trata-se de um condutor usualmente de cor verde, conforme encontrado nos trabalhos do NAPI SOLAR e indicados na Figura 4.10, que fornece um caminho para correntes elétricas indesejáveis, decorrentes de falhas no sistema, descargas atmosféricas ou cargas eletrostáticas, protegendo os equipamentos e as pessoas.

Figura 4.10: Aterramento em UFV.



Fonte: Autores.

Durante a inspeção visual do aterramento deve-se observar a existência de um condutor conectado aos módulos e levado à terra através de uma haste de cobre. É importante que toda a *string* (ligação dos módulos em série) esteja conectada ao condutor terra.

#### **4.2.1.4 Equipamentos de conversão de energia elétrica**

Outro elemento fundamental em uma UFV é a estação conversora, onde a corrente contínua (CC), vinda dos módulos, é transformada em corrente alternada (AC). A estação conversora normalmente fica em um cubículo abrigado do sol, calor e chuva. Os elementos que compõem a estação conversora devem estar livres de sujeira para seu bom funcionamento. Uma inspeção visual deve ser feita para garantir que todos os indicadores, como as luzes de LED, estejam funcionando, e que os condutores conectados a esses dispositivos não estejam soltos. Alguns problemas elétricos, tais como curto-circuitos, podem ocorrer nos equipamentos de conversão por conta da presença de pequenos animais como ratos e/ou lagartixas.

A Figura 4.11 ilustra um cubículo aberto encontrado em uma propriedade visitada no projeto do NAPI SOLAR, indicando a necessidade de se verificar se os componentes estão diretamente expostos ao sol em algum período do dia. Isso pode impactar nas condições de temperatura e operação dos equipamentos, reduzindo a vida útil desses elementos.

Figura 4.11: Cubículo de uma UFV.



Fonte: Autores.

#### **4.2.1.5 Microambiente local**

A inspeção visual ao redor da UFV é importante para a minimização de impactos para o ambiente e as pessoas. O perímetro ao redor de usinas de solo deve ser isolado, impedindo o acesso de pessoas inaptas e animais, conforme Figura 4.12, que mostra a situação encontrada em visitas do NAPI SOLAR, cabendo lembrar que esta não foi a regra.

Deve-se verificar também as condições da vegetação local, especialmente o crescimento de plantas que podem sombrear os módulos fotovoltaicos, como encontrados em visitas a propriedades na execução do projeto e mostrados na Figura 4.13. Também deve-se observar se existem sinais de erosão capazes de deslocar a terra, movimentando a UFV. Além disso, é necessário acompanhar as condições das estradas que possibilitam o acesso à instalação fotovoltaica, especialmente na zona rural, garantindo a entrada de profissionais habilitados para a fiscalização e manutenção.

Figura 4.12: UFV cercada e identificada para impedir o acesso indevido.



Fonte: Autores.

Figura 4.13: UFV sem cerca, identificação e vegetação sem manutenção.



Fonte: Autores.

#### **4.2.2 Inspeção Termográfica**

A inspeção termográfica, também conhecida como inspeção baseada em imagem a partir do infravermelho (IR), é uma metodologia não invasiva dependente de um instrumento, a câmera termográfica. Existem variadas opções tecnológicas, e podem ser utilizadas por um operador ou adaptadas em Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT). A inspeção permite identificar defeitos, falhas, ou sobrecarregamento nas instalações da UFV, e a análise deve ser realizada com o sistema em operação, preferencialmente em horário de máxima geração. As informações obtidas por meio da termografia possibilitam a criação de um plano de manutenção corretiva, garantindo que a UFV siga funcionando adequadamente (TANG et al., 2024).

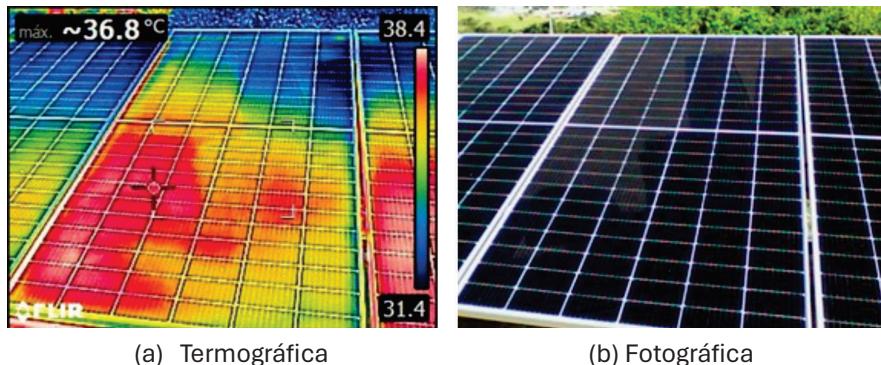
#### 4.2.2.1 Módulos Fotovoltaicos

É possível identificar áreas com defeitos em módulos fotovoltaicos através da termografia. Tais regiões podem apresentar temperatura mais alta, emitindo maior radiação infravermelha. Entretanto, classificar o defeito não é uma tarefa fácil, porque problemas distintos podem apresentar aparências similares (TANG et al., 2024).

A área aquecida identificada em uma imagem pode indicar defeitos internos, danos provocados durante o transporte/instalação dos módulos, falha no diodo bypass ou caixa de junção superaquecida. A Figura 4.14, produzida durante uma visita de auditoria do NAPI SOLAR, a propriedades selecionadas para análise, apresenta uma situação de área quente provocada por sombreamento. Isso pode acontecer porque a capacidade de corrente das células sombreadas fica reduzida, e a corrente mais alta vinda de outra célula que está irradiada pode sobreregar a sombreada, formando os pontos de calor que podem danificar permanentemente o módulo (GALDINO; SILVA, 2016).

Em instalações no solo, a inspeção pode ser realizada por profissional habilitado. Já as UFV em telhados devem ser inspecionados por VANT equipado com câmera termográfica.

Figura 4.14 - Módulo fotovoltaico (a) captado através de câmera termográfica e (b) através de fotografia comum.



Fonte: Autores.

#### **4.2.2.2 Condutores, conectores e demais materiais**

Os cabos utilizados em UFVs devem ser robustos e seguros. Os isolamentos de Cloreto de Polivinila (PVC) nos condutores suportam uma temperatura de até 70 °C em serviço contínuo, enquanto o isolamento de borracha Etileno-Propileno (EPR) ou Polietileno Reticulado (XLPE) asseguram uma temperatura de até 90 °C (ABNT - NBR 7286, 2022; ABNT - NBR 7287, 2023; ABNT - NBR 7288, 2018). Entretanto, os chamados cabos solares, expostos diretamente à radiação solar e presentes na parte DC da instalação, devem apresentar estrutura ainda mais resistente com proteção ultravioleta, compostos termofixos, têmpora mole e classe de isolação mínima de 1,5 kVcc e máxima de 1,8 kVcc (ABNT - NBR 16612, 2020). Por isso, as condições de temperatura nos condutores, conexões e demais materiais não devem exceder os limites do isolamento. A inspeção termográfica é uma excelente ferramenta para verificar essas condições de temperatura, prevenindo danos à instalação.

A Figura 4.15 apresenta uma caixa de passagem, localizada no piso, próximo à UFV. Observa-se que o condutor apresenta temperatura de 152 °C, muito acima do suportado pelo isolamento, indicando necessidade de intervenção. Esta imagem também foi retirada das instalações encontradas durante a visita de pesquisadores do NAPI SOLAR, para consolidar dados de pesquisa que já indicam a necessidade de planos de manutenção.

Figura 4.15 - Caixa de passagem retratada em (a) termografia e (b) fotografia.



Termográfica

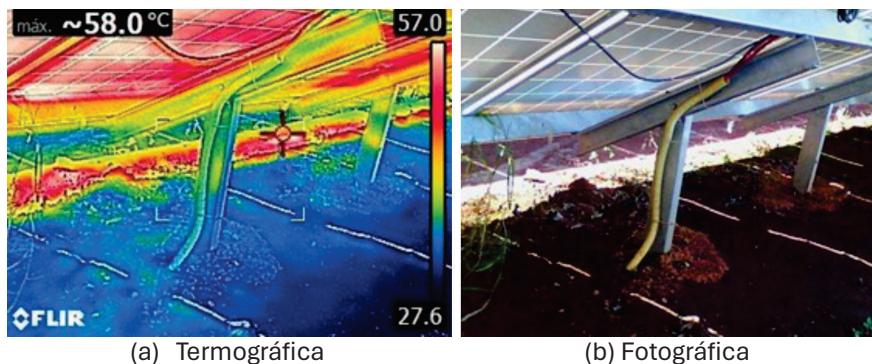


(b) Fotográfica

Fonte: Autores.

A Figura 4.16 mostra uma instalação da fiação protegida com eletroduto de PVC, classe leve flexível não-propagante de chama, abrigando os condutores da parte DC do sistema, e não apresentando qualquer anomalia térmica. Este tipo de eletroduto pode ser utilizado em instalações até 1.500 VDC ou 1.000 VAC, e podem ser utilizados em condições padrões de temperatura de -5 a 60 °C (NBR-15465, 2020). Durante as visitas de auditoria diversas situações foram encontradas, algumas adequadas e outras já necessitando de intervenção.

Figura 4.16 - Eletroduto abrigando condutores dos painéis fotovoltaicos até o solo retratado item (a) termografia e (b) fotográfica.



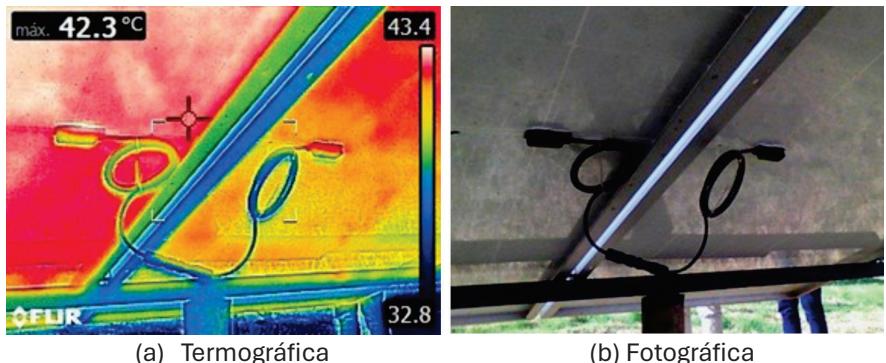
(a) Termográfica

(b) Fotográfica

Fonte: Autores

A Figura 4.17 mostra conexões feitas com conectores apropriados, que são importantes para evitar acidentes, perdas e danos nas UFVs. O modelo macho e fêmea mais comum disponível no mercado (MC4 da empresa Staubli) foi aprovado para uso em 1.500 VDC ou 1.000 VAC, com temperatura limite de 105 °C e faixa de temperatura de operação entre -40 e +85 °C (STAUBLI, 2024). A imagem termográfica feita durante uma inspeção de trabalho do NAPI SOLAR, permite verificar que os conectores estão trabalhando dentro da faixa normal de temperatura, porém sabe-se que o bom funcionamento de um UFV é diretamente influenciada pela qualidade dos serviços prestados pela instaladora, sendo também um elo a ser acompanhado no projeto RENOVA-PR.

Figura 4.17 - Interligação entre módulos através de conectores retratados em  
(a) termografia e (b) fotografia.

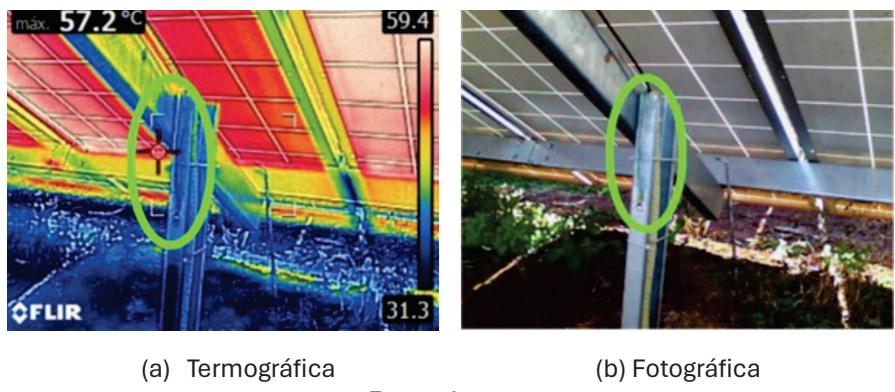


Fonte: Autores.

#### 4.2.2.3 Aterramento

Os cabos de aterramento não podem apresentar aquecimento, uma vez que, em condições normais de operação, não há passagem de corrente elétrica. A Figura 4.18 apresenta o condutor de aterramento, circulado em verde, conectado à estrutura metálica da UFV. As condições de temperatura do condutor são adequadas.

Figura 4.18 - Aterramento das placas nas estruturas metálicas retratadas em  
(a) termografia e (b) fotografia.



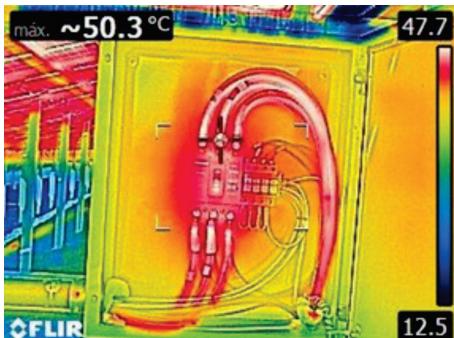
Fonte: Autores

A *String Box* é, de acordo com a norma NBR 16690 Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto:

*um invólucro no qual sub arranjos fotovoltaicos, séries fotovoltaicas ou módulos fotovoltaicos são conectados em paralelo, e que pode alojar dispositivos de proteção e/ou de manobra (ABNT - NBR 16690, 2019).*

Na Figura 4.19, as fotos foram feitas nas instalações visitadas nas auditorias e mostram o barramento de terra presente na *String Box*. Pode-se observar que a temperatura dos condutores é normal, especialmente se comparada aos condutores mais robustos que transportam a corrente elétrica, indicando que o todo aterrramento está sendo adequado.

Figura 4.19 - Condutor de Aterramento na string box.



(a) Termográfica



(b) Fotográfica

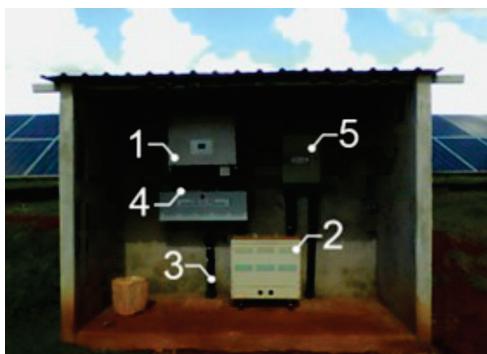
Fonte: Autores.

#### **4.2.2.4 Equipamentos de conversão de energia elétrica**

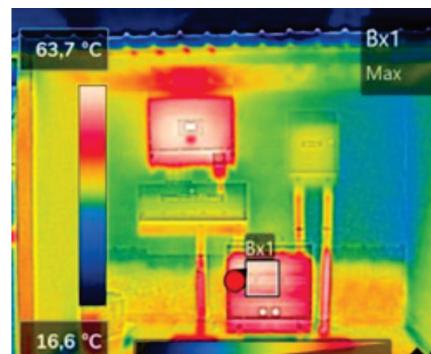
Nas fotos retiradas em visitas a propriedades e mostradas na Figura 4.20(a) pode-se observar os equipamentos que fazem parte do processo de conversão de energia, proteção e conexão da UFV. Nos cubículos das usinas podem-se encontrar os seguintes elementos:

- 1 -inversor de energia, o qual é responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) em corrente alternada (AC) para a rede elétrica;
- 2 -transformador, responsável por ajustar os níveis de tensão requeridos;
- 3 -cabos ou condutores de energia;
- 4 -*string box* e conexões;
- 5 -dispositivos de proteção contra surtos (DPS), contra sobrecorrentes e sobrecargas (disjuntor) do lado AC. Na Figura 4.20(b), pode-se notar que os equipamentos que operam em maior temperatura são o inversor e o transformador, respectivamente 60 e 63 °C.

4.20 - Cubículo geral de uma usina fotovoltaica.



(a) Termográfica



(b) Fotográfica

Fonte: Autores.

Os inversores fotovoltaicos são projetados para funcionar dentro de uma faixa limite de temperatura. Uma vez extrapolados esses limites, podem ocorrer falhas por superaquecimento, ciclos térmicos e desgaste dos componentes eletrônicos. Além disso, as altas temperaturas podem diminuir a eficiência e a vida útil dos inversores, reduzindo ou até interrompendo o fornecimento de potência. As principais causas de superaquecimento incluem instalação inadequada, sobrecarga devido à quantidade excessiva de módulos fotovoltaicos (potência de entrada do lado CC do inversor) e ventilação insuficiente.

Nos transformadores, o superaquecimento diminui a eficiência e acelera o envelhecimento do isolamento, aumentando as perdas do equipamento e impactando sua vida útil (NUNES, 2024). As causas do problema podem ser internas, devido a condições construtivas, de operação ou de acesso indevido de pequenos animais que podem provocar o deterioramento do isolamento do núcleo do transformador, ou externas, tais como ventilação inadequada, falhas nas conexões com o inversor ou rede AC.

O posicionamento do transformador logo abaixo do inversor pode contribuir para o aumento da temperatura neste último. Por isso, tal configuração não é recomendada.

#### **4.2.3 Inspeção Elétrica**

A inspeção elétrica consiste em obter dados elétricos de funcionamento da UFV através do sistema de monitoramento ou medição in loco. O monitoramento apresenta dados de potência e energia gerada. Já a medição deve ser realizada por profissional habilitado, com o uso de um medidor adequado, para a obtenção das informações de dados elétricos, como tensão e corrente.

Ainda, com o objetivo de garantir o desempenho e a segurança no longo prazo das usinas fotovoltaicas, foi publicada a norma ABNT NBR 16274 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento,

inspeção e avaliação de desempenho. Esta norma estabelece as informações e a documentação mínima que devem ser compiladas para a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Também descreve a documentação, os ensaios de comissionamento e os critérios de inspeção necessários para avaliar a segurança da instalação e a correta operação do sistema (ABNT - NBR 16274, 2014 ).

#### **4.2.3.1 Inspeção anterior à energização da UFV**

A inspeção que é realizada antes da energização da instalação deve seguir a norma ABNT NBR 16274, que descreve os procedimentos e tem como padrões de referência as normas ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão e ABNT NBR 16690 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto. Além disso, menciona as normas IEC aplicáveis a cada procedimento. As atividades de inspeção elétrica nessa fase são divididas em quatro partes:

1. Inspeção do sistema em corrente contínua.
2. Proteção contra sobretensão/choque elétrico.
3. Inspeção do sistema em corrente alternada.
4. Etiquetagem e identificação.

#### **4.2.3.2 Inspeção durante o funcionamento da UFV**

Em caso de inspeção por especialista com a usina em operação, existe uma documentação mínima necessária para garantir que os principais dados da usina fotovoltaica sejam de fácil acesso. Esta documentação inclui dados do sistema, diagramas, folhas de dados técnicos, informações de projeto mecânico, informações de operação e manutenção, bem como os resultados de ensaios anteriores, caso tenham sido realizados. Devem constar informações básicas como potência nominal, informações dos

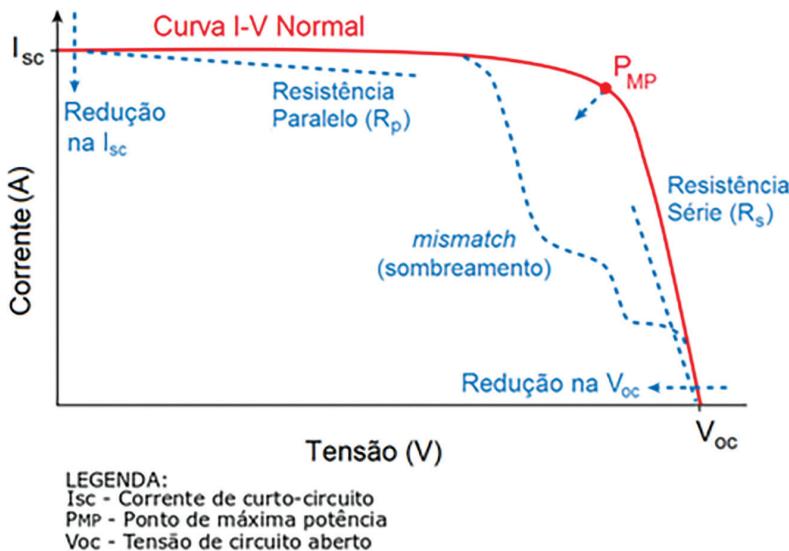
módulos, localização e datas importantes da usina fotovoltaica, bem como informações do projetista e instalador do sistema e ao menos um diagrama contendo as especificações gerais do arranjo fotovoltaico, informações da série fotovoltaica, detalhes elétricos do arranjo fotovoltaico, aterramento e proteção contra sobretensão e sistema CA (corrente alternada). Em relação à operação e manutenção, é necessário informar ao especialista que está realizando a inspeção quais os procedimentos utilizados para verificar o funcionamento correto do sistema e de desligamento de emergência, além das manutenções e limpezas já realizadas.

### ***Medições in loco***

Existem duas categorias de ensaios in loco. A primeira delas pode ser aplicada a qualquer UFV, independentemente da escala, tipo, localização ou complexidade, e consiste em: ensaio do circuito de corrente alternada, continuidade da ligação à terra e/ou dos condutores de ligação equipotencial, ensaio de polaridade, ensaio da caixa de junção, ensaio de corrente da série fotovoltaica (curto-círcito ou operacional), ensaio de tensão de circuito aberto da série fotovoltaica, ensaios funcionais e ensaio de resistência de isolamento do circuito de corrente contínua. Já a segunda categoria destina-se a sistemas maiores ou mais complexos, e devem ser realizados após os ensaios de primeira categoria listados acima. Os ensaios de segunda categoria contemplam o ensaio de curva I/V da série fotovoltaica e a inspeção com câmera infravermelha (ABNT NBR 16274, 2014).

Elaborar a curva I/V tem sido recomendada como uma forma de detecção de defeitos (RAHMAN; KHAN; ALAMEH, 2021). Comparando a curva característica I/V, com a curva obtida através do ensaio, pode-se identificar perdas por derivação, descasamento (sombreamento inclusive) e série, conforme Figura 4.21. Entretanto, o ponto crítico dessa inspeção é justamente a coleta dos dados de forma sistemática. Neste caso, recomenda-se o uso de um traçador de curva I/V (Pinho e Galdino, 2014). Além disso, detecta-se a falha, mas não a sua localização, além de que variações muito pequenas podem ser imperceptíveis (TANG et al., 2024).

Figura 4.21 - Curva padrão I/V apontando redução na corrente de curto, redução na tensão de circuito aberto e alterações do fator de forma.



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

### Sistema de Monitoramento

Atualmente, a maioria das empresas instaladoras de sistemas fotovoltaicos disponibiliza para o cliente aplicativos onde é possível acompanhar a geração de energia elétrica, fato verificado nas visitas feitas no projeto de pesquisa do NAPI SOLAR e a Figura 4.22(a) apresenta uma curva padrão diária de uma UFV. Com o nascer do sol a geração de energia é iniciada, e o pico é atingido próximo ao meio dia, depois disso a capacidade de geração começa a cair até o pôr do sol. Em dias com muitas nuvens a curva pode apresentar um comportamento diferente, com quedas representativas, conforme Figura 4.22 (b). Entretanto, o consumidor deve ficar atento caso o padrão disforme se repita dia após dia, independente da nebulosidade, indicando possível falha no sistema.

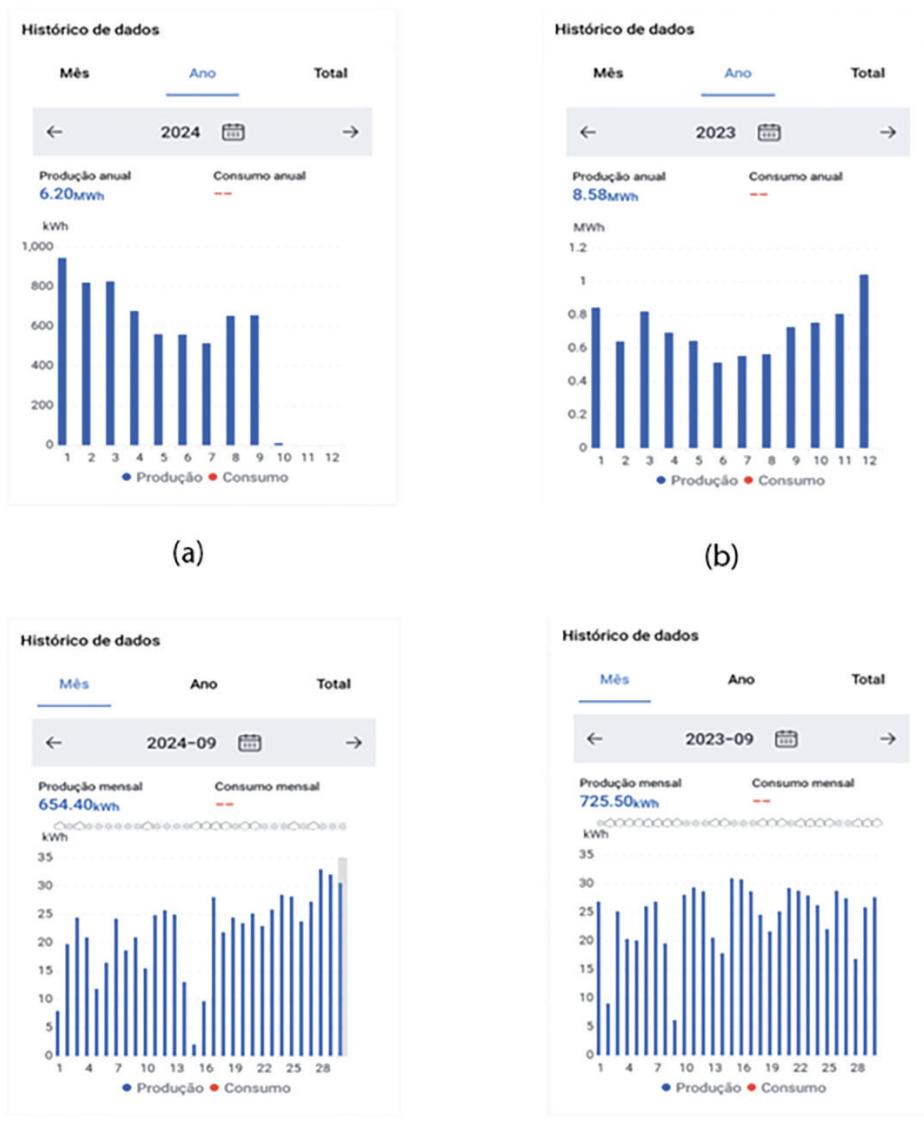
Figura 4.22 - Padrão diário de geração de uma UFV em condições de (a) céu limpo e (b) grande nebulosidade.



Fonte: Autores.

As Figuras 4.23 (a) e (b) apresentam exemplos de informações obtidas na forma de gráficos de geração ao longo dos meses do ano em propriedades visitadas por pesquisadores do NAPI SOLAR. Observa-se uma redução na capacidade nos meses de inverno, onde os dias são mais curtos. A comparação entre a geração mês a mês em diferentes anos pode indicar a necessidade de limpeza das placas. Por exemplo, observa-se na Figura 4.23 (d), referente ao ano 2023, que a geração no mês de setembro atingiu 725 kWh após limpeza. Já no ano seguinte, Figura 4.23 (c), a geração no mesmo mês foi de 650 kWh, indicando a necessidade de manutenção anual para que padrão de geração possa ser novamente atingido.

Figura 4.23 - Geração de energia mensal de uma UFV ao longo dos anos de (a) 2024 e (b) 2023, e nos meses de (c) setembro/2024 (d) setembro/2023.



Fonte: Autores.

#### **4.2.4 Inspeção Civil e Mecânica**

A inspeção civil e mecânica de uma UFV refere-se à revisão detalhada dos elementos que suportam e unem as partes não elétricas da instalação, como fundações de concreto, telhados, armaduras, elementos de fixação dos módulos (porcas e parafusos) e estruturas metálicas. As UFVs podem ser instaladas no solo ou nos telhados, e precisam ser fixadas de forma correta para evitar danos às pessoas e equipamentos (PINHO; GALDINO, 2014). Para as instalações localizadas no solo são realizadas construções de concreto ou escavações, além de canalizações e caixas de passagem para o uso de condutores subterrâneos. Nas instalações realizadas em telhados ou coberturas, os módulos costumam ser fixados usando elementos de fixação como perfis metálicos, plásticos ou sintéticos, impermeabilizados nas áreas de perfurações.

Uma inspeção civil ou estrutural apurada demanda a presença de um especialista. Entretanto, uma inspeção visual simples pode ser realizada com o intuito de identificar deformações e falhas aparentes, destacando-se:

- Observar a existência de deformações, rachaduras e trincas aparentes nas edificações.
- Verificar a ocorrência de erosão no solo que pode impactar as estruturas.
- Verificar a falta e o aperto dos parafusos e porcas.
- Observar elementos de fixação faltantes nas junções.
- Verificar se os eletrodutos que transportam cabos elétricos estão devidamente fixados às paredes ou partes metálicas da instalação.
- Observar corrosão nos elementos metálicos.

No caso de UFVs do tipo *tracker*, a inspeção deve avaliar as condições de sincronia, alinhamento e nivelamento do sistema. Os motores devem ser inspecionados, bem como cilindros hidráulicos ou elétricos, lubrificação das articulações e rolamentos, com o intuito de minimizar desgastes prematuros.

## **CAPÍTULO 5: METODOLOGIA DE AUDITORIA E EXPERIÊNCIAS DE CAMPO**

O presente capítulo apresenta a metodologia e os resultados preliminares do projeto de pesquisa, realizado no âmbito do Programa RENOVA-PR, que visa avaliar o desempenho das usinas fotovoltaicas rurais instaladas no estado do Paraná. A proposta tem como objetivo assegurar a eficácia operacional e a durabilidade dos sistemas fotovoltaicos, prevenindo interrupções no fornecimento de energia provocadas pela falta de manutenção, bem como o mau uso dos sistemas. O projeto inclui a UTFPR, UEL, UEM e o IDR-PR, e foram realizadas visitas a 44 propriedades rurais localizadas nas regionais do IDR-PR em sua 1<sup>a</sup> etapa, e 15 propriedades em sua 2<sup>a</sup> etapa, empregando instrumentos de auditoria específicos desenvolvidos pelo projeto em questão.

### **5.1 Premissas de Estudo**

A garantia de sucesso do Programa RENOVA-PR a longo prazo é precedida do entendimento dos pontos críticos de operação e manutenção dos equipamentos e o impacto gerado pela inoperabilidade de cada um deles, de imediato observa-se que 3 pontos são importantes nesta questão:

1. A vida útil estimada dos módulos fotovoltaicos é de 25 a 30 anos, enquanto do inversor é de 10 a 15 anos, quando mantidos em condições ideais de operação e manutenção. Portanto, promover as perfeitas condições de uso é fundamental para a garantia da TIR (Taxa de Retorno do Investimento).
2. Mesmo mantidas as condições ideais de operação e manutenção das usinas instaladas, seus componentes atingirão o limite de vida útil. Portanto, perceber este momento e preparar a substituição evitará despesas adicionais inesperadas.
3. A expansão do programa RENOVA-PR, com a instalação de diversas usinas fotovoltaicas, representa um avanço

significativo para a matriz energética do Paraná. No entanto, a interrupção simultânea de uma parcela considerável dessas unidades poderia causar desequilíbrios no Sistema Interligado Nacional (SIN), impactando a estabilidade da rede e a qualidade da energia fornecida aos consumidores. A garantia da operação contínua e eficiente dessas usinas é fundamental para evitar interrupções no fornecimento de energia e garantir a segurança do sistema.

Diante disso, é evidente a necessidade da criação de procedimentos que permitam avaliar o desempenho das usinas instaladas no programa RENOVA-PR, buscando seu maior rendimento em geração e tempo de operação.

## **5.2 Organização Inicial**

O Estado do Paraná é provido de muitas Instituições de Ensino Superior Federais, Estaduais e Privadas, com milhares de pesquisadores de alto nível, que na maioria das vezes desenvolvem pesquisas isoladamente. A formação de redes de pesquisadores com mesmo interesse é um desafio que virou política pública do Estado e os NAPI (Novos Arranjos de Pesquisa e Inovação) são a consolidação de redes de pesquisadores no Paraná por temas relevantes para o desenvolvimento socioeconômico do Estado, definida por meio da nota 01/2019 da Fundação Araucária, que diz:

Os NAPIs serão criados e direcionados para atender demandas setoriais, regionais e estadual, de forma integrada e racionalizada para melhor aproveitamento de atores e ativos já existentes. A ênfase está na melhor mobilização e integração entre território e ativos, empresas líderes (payers) e fatores chave de desenvolvimento. Eles focarão na criação de riqueza e bem-estar, levarão a maior assertividade dos instrumentos de apoio da Araucária e, consequentemente, melhor retorno sobre investimentos em P&D.

A Energia Solar é um tema atual e de interesse para estudos, acontecendo em todo mundo, pois o uso de fontes limpas tem se tornado imperativo para a sustentabilidade do planeta. No Estado do Paraná não é diferente, este tema está presente em estudos de todas as Instituições de Ensino Superior (IES). Desta forma, o primeiro passo para estruturação do NAPI SOLAR foi reunir os pesquisadores da UTFPR - Campus Curitiba e criar uma rede com os pesquisadores das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá (UEL e UEM). A partir de plataformas oficiais encontram-se pesquisadores com alto potencial para compor o grupo de pesquisa e quando contatados responderam de forma positiva imediatamente. Em pouco mais de duas semanas o grupo já tinha um cronograma de reuniões e passou a trabalhar na proposta de trabalho a ser apresentada para a Fundação Araucária. Em paralelo, estreitaram-se as relações com o IDR-PR, para consolidar uma estratégia de trabalho que pudesse balizar as ações a serem trabalhadas para criação de um projeto de pesquisa.

Estabelecido o acordo de criar o NAPI SOLAR, reuniões do grupo de pesquisa e representantes do IDR-PR, delinearam o projeto de pesquisa, que teve como título: “Metodologia para avaliação do desempenho de Usinas Fotovoltaicas em propriedade rurais”. Esta proposta visa alcançar o melhor desempenho de todas as 90.000 usinas fotovoltaicas instaladas até 2030 no programa RENOVA-PR, com a participação da UTFPR (Campus Curitiba e Campus Pato Branco), UEL , UEM e apoio institucional do IDR-PR.

Desde o primeiro contato com representantes das instituições envolvidas, constatou-se a necessidade de buscar representatividade geográfica das propriedades a serem vistadas no Estado do Paraná, para a criação de um modelo de auditoria. Em paralelo à discussão já eram desenvolvidos os primeiros desenhos do instrumento a ser utilizado nas auditorias, sendo uma versão em formulário escrito e outra em aplicativo para celular. A princípio foram considerados os seguintes fatores:

- Tipo de atividade econômica da propriedade:
  - Produção Aves (integrados ou não)
  - Produção Suínos (integrados ou não)
  - Produção de leite e derivados

- Produção de hortícolas
- Produção de grãos
- Piscicultura
- Tamanho da Propriedade
  - Agricultura familiar
  - Agricultura extensiva
  - Agro indústria
- Regional do IDR
- Empresa instaladora da usina fotovoltaica
- Capacidade Fotovoltaica instalada

Destas primeiras premissas, em reuniões entre os parceiros, mapeou-se o Estado do Paraná a partir das 22 regionais do IDR-PR, estabelecendo-se que seriam realizadas visitas in loco de duas propriedades por regional, para desenvolvimento da pesquisa, totalizando 44 visitas na primeira etapa do projeto. Posteriormente, foram definidas mais 15 visitas a serem realizadas durante a segunda etapa do projeto. Desta proposição, consolidaram-se as equipes de trabalho e organizaram-se as propriedades de acordo com a formação das equipes e proximidades territoriais, conforme ilustrado no Quadro 5.1 onde é possível encontrar a distribuição atual das equipes por universidade e o total de visitas realizadas ao longo de todo o projeto.

Quadro 5.1 - Composição da atual da equipe e quantidade de visitas realizadas.

<b>Componente /Instituição</b>	<b>UTFPR</b>	<b>UEL</b>	<b>UEM</b>
PROF. PESQUISADORES	3	3	2
ALUNOS MESTRANDOS	3	2	0
ALUNOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA	5	6	2
<b>TOTAL DE PARTICIPANTES</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>4</b>
<b>TOTAL GERAL PARTICIPANTES</b>			<b>26</b>
VISITAS A PROPRIEDADES RURAIS	27	16	17
<b>TOTAL GERAL PROPRIEDADES VISITADAS</b>			<b>60</b>

Fonte: Autores

O principal objetivo da proposta foi desenvolver uma metodologia de auditoria das instalações fotovoltaicas no âmbito do programa RENOVA-PR, possibilitando a identificação de eventuais problemas e garantindo o pleno funcionamento ao longo da vida útil da usina. Para isso, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

1. desenvolver a integração do grupo de pesquisadores da UTFPR, UEL e UEM para os trabalhos do NAPI - Energia Solar;
2. elaborar um calendário de consolidação de conhecimentos entre os integrantes do NAPI - Energia Solar, em parceria com o IDR com no mínimo 5 e no máximo 10 encontros virtuais de capacitação mútua;
3. identificar os parâmetros indicados para acompanhamento de sistemas de geração fotovoltaica segundo literatura especializada;
4. criar um modelo piloto de instrumento de auditoria de sistemas de geração fotovoltaica, a partir do conhecimento dos integrantes do NAPI - Energia Solar e dos parâmetros identificados na pesquisa científica;
5. definir, em conjunto com representantes do IDR, 2 (duas) instalações de Usinas fotovoltaicas em operação em cada uma das suas 22 regionais, para auditoria piloto, totalizando 44 usinas no estado;
6. elaborar cronograma de visitas às usinas fotovoltaicas conforme disponibilidade das Universidades envolvidas, otimizando recursos e deslocamentos;
7. realizar as auditorias in loco, conforme cronograma e instrumentos de Monitoramento e Controle estabelecidos pelos especialistas da UTFPR, UEL, UEM e IDR;
8. preencher relatórios das auditorias realizadas, de acordo com os instrumentos de Monitoramento e Controle aplicados;
9. aplicar a ferramenta PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), para aprimorar a ferramenta de auditoria em Sistemas de Geração Fotovoltaico;

10. consolidar um relatório final conclusivo que demonstre as características e o perfil das instalações encontradas;
11. desenvolver uma webinar para disseminar os conhecimentos adquiridos com outras IES, cujos pesquisadores demonstrarem interesse em participar do NAPI - Energia Solar;
12. ampliar o conhecimento científico e tecnológico no meio acadêmico, acerca da Energia Solar e suas aplicações, pela disponibilização dos documentos gerados para publicação eletrônica;
13. disseminar a pesquisa através de artigos científicos em evento especializado de energia renovável ou de inovação tecnológica com apoio da Fundação Araucária.

### **5.3 Desenvolvimento da Metodologia**

O projeto elaborado foi estruturado na metodologia de pesquisa-ação, que segundo Lindgren et al. (2004) se caracteriza como sendo um método intervencionista que permite ao pesquisador testar hipóteses sobre o fenômeno de interesse, implementando e acessando as mudanças no cenário real. Sendo assim, as ações realizadas no projeto foram permitindo melhorar os resultados propostos na pesquisa, avaliando os resultados e novamente atuando no processo.

#### **5.3.1 Primeira etapa**

A primeira ação realizada foi a visita de três propriedades na Região Metropolitana de Curitiba, para se ter o entendimento do programa RENOVA-PR, e estruturar o primeiro instrumento de auditoria, nesta perspectiva visitou-se um produtor de matrizes aviárias (Araucária), um produtor de queijo (São José dos Pinhais) e um produtor de hortaliças de folha (Colombo).

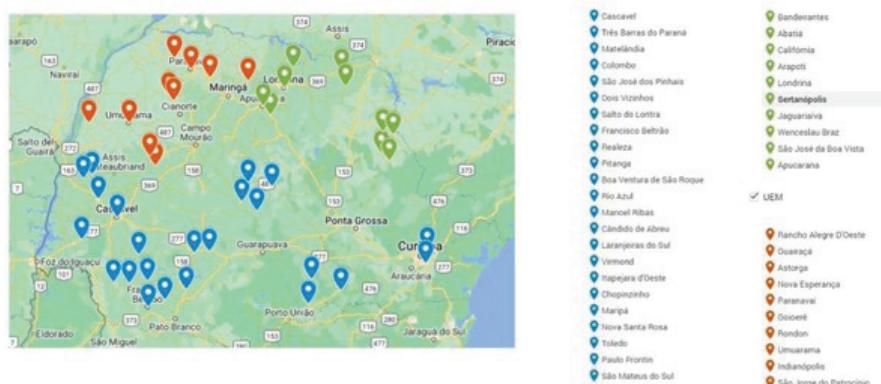
Destas visitas, reuniões foram realizadas com todo o grupo de pesquisa, definindo-se a primeira versão do questionário a ser aplicado nas propriedades que seriam visitadas durante a pesquisa de campo. Em paralelo com a confecção dos materiais, foram estabelecidas, junto ao IDR, as formas de trabalho e respectivas

distribuições entre os pesquisadores das três universidades, conforme Quadro 5.1.

Durante o segundo semestre de 2023 e primeiro de 2024 foram realizadas visitas às propriedades rurais, e nas reuniões semanais de todo grupo, foram compartilhados os resultados obtidos e as constatações encontradas. O Apêndice 1 mostra o formato do questionário aplicado nas 44 propriedades no Estado do Paraná, e a Figura 5.1 a distribuição de visitas adotada na primeira etapa do projeto.

Figura 5.1 - Distribuição das visitas realizadas pelo NAPI-SOLAR na primeira etapa.

#### 44 VISITAS TÉCNICAS EM DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO



Fonte: Autores

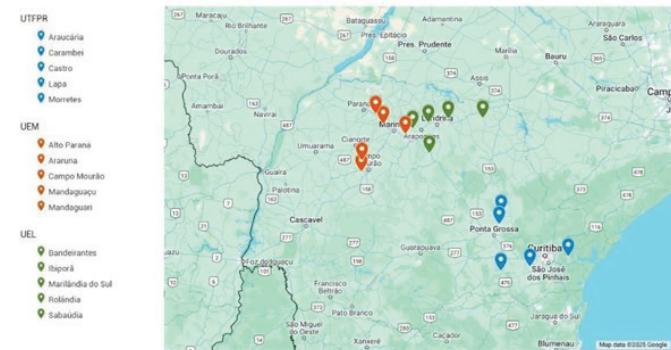
As segundas visitas compreenderam o segundo semestre de 2024 e o primeiro de 2025 e nesta foram realizadas 15 visitas, conforme Figura 5.2.

### 5.3.2 - Segunda etapa

As segundas visitas compreenderam o segundo semestre de 2024 e o primeiro de 2025 e nesta foram realizadas 15 visitas, conforme Figura 5.2.

Figura 5.2 - Distribuição das visitas realizadas pelo NAPI-SOLAR na segunda etapa.

**Mapa das visitas para auditoria**



Fonte: Autores

Durante os trabalhos do que foi chamado primeira etapa, constatou-se que o formulário elaborado precisava ser adequado com o momento de observação. Portanto, optou-se por 3 momentos de aplicação diferenciada, conforme detalhado abaixo:

- Formulário 1 - Recebimento das instalações.  
Nesta etapa o proprietário deverá receber as instalações completas e aptas a funcionar de acordo com o projeto elaborado, portanto deverão ser cumpridas as seguintes etapas:
  - Entrega de documentação técnica com desenhos da instalação.
  - Entrega de manual de operação e conservação das instalações.
  - Entrega de certificado de garantia e ART.

- Formulário 2 - Inspeção visual do Extensionista.

Esta etapa será conduzida pelo extensionista do IDR, que ao visitar a propriedade entrevistará o proprietário e observará visualmente a instalação. Quando o extensionista observar que as contas de energia sofreram variação, que as placas estão sujas, e que a instalação está depreciada deverá orientar o proprietário a procurar assistência técnica ou solicitar a garantia do fornecimento.

- Formulário 3 - Laudo técnico de eficiência.

Esta etapa será realizada por especialistas, que deverão gerar um laudo sobre o estado das instalações e quantidade de energia gerada comparativamente ao projeto original. Toda vez que a garantia de serviço for usada deve-se orientar o uso deste formulário.

## **5.4 Experiências de Campo e Recomendações**

As visitas nas propriedades rurais permitiram observar algumas demandas que podem melhorar os índices de eficiência e satisfação do uso desta tecnologia. Estão apresentadas a seguir aquelas mais recorrentes e que demandam maior atenção.

### **5.4.1 Acervo Documental Processual**

O processo adotado para que um produtor chegue ao ponto de operar a sua usina tem várias etapas que precisam ser compreendidas, portanto, o ponto de partida é uma visita do extensionista do IDR, que apresenta as vantagens econômicas e ambientais na adoção desta opção, transformando gradativamente a propriedade autossustentável.

Tendo a manifestação do interesse pelo proprietário o extensionista do IDR o orienta a buscar orçamentos em empresas cadastradas no Sistema de Informação da instituição. Nesta etapa

do processo deve ficar claro que o proprietário é o comprador direto de uma empresa previamente cadastrada, portanto, é lembrado a este, que a manutenção dos equipamentos e cumprimento da garantia, ficam muito mais factíveis se as empresas prestadoras dos serviços forem da região, cabe ao proprietário avaliar esta questão.

Quando o produtor estiver de posse do orçamento, o envia ao IDR, que o cadastra no Sistema de Informação, enviando a um agente financiador, para que o produtor de andamento a aquisição de sua usina fotovoltaica.

Deve-se compreender que o IDR apenas organiza o processo, informando ao banco, que a empresa que fez o orçamento é idônea e tem condições de cumprir o contrato, bem como, que a proposta apresentada está condizente com a carga instalada na propriedade.

Desta operação, resulta o registro de dados no Sistema de Informações, que não é necessariamente aquele que vai ser instalado, pois, este envio busca aprovar uma capacidade de investimento do produtor, e posteriormente a contratação da empresa instaladora, faz o projeto definitivo.

Quando a capacidade de crédito é aprovada, o produtor faz a contratação da empresa, que se responsabiliza pelo projeto, instalação e interligação da usina à rede da concessionária. Nesta etapa toda são gerados inúmeros documentos, que ora ficam com a empresa, ora fica com o proprietário, ora fica com o banco e em alguns casos, por segurança nos escritórios do IDR. Percebeu-se a necessidade nesta etapa de que exista no mínimo um ponto de concentração documental, virtual ou física, para que se possa fazer a gestão do conhecimento de todas as instalações ao longo dos próximos anos. No caso específico, o próprio Sistema de Informação tem robustez para comportar estes documentos.

#### **5.4.2 Documentação Técnica**

A ausência de documentação pelos proprietários foi uma ocorrência relevante em praticamente todas as visitas. Desta forma,

recomenda-se constituir uma rotina que estabeleça a documentação necessária e disponível é fundamental, destacando-se:

- Documentação apresentada à concessionária de energia local: Considerando que todas as usinas estão interligadas a rede de distribuição (*on-grid*), é importante que toda documentação pertinente à interligação esteja disponível, com dados técnicos aprovados.
- Projeto da Usina: Raros projetos foram apresentados na visita, portanto tê-los à mão é fundamental na conservação, manutenção e também no recebimento da instalação. Desta forma o projeto deve conter número de placas, formas de instalação, diagramas elétricos e cálculos de proteção, entre outros. Ressalta-se a importância destes documentos para exigência de garantias de fornecimento.
- ART's perante o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA): Toda obra de engenharia necessita da respectiva Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) junto ao CREA, documento que garante o acompanhamento e responsabilidade de profissional devidamente capacitado e em condições de garantir a qualidade do produto entregue.

#### **5.4.3 Operação e Manutenção**

Primeiramente, aconselha-se a compra de equipamentos de marcas confiáveis e qualidade comprovada, com processos de logística eficientes para a montagem dos sistemas fotovoltaicos. É necessário um cuidado especial no transporte, uma vez que os módulos são equipamentos delicados e devem ser transportados na posição vertical, a fim de eliminar a pressão que exercem um sobre o outro, dentre outros cuidados. Ainda, o manuseio deve ser cuidadoso durante a instalação do material, e é importante seguir as instruções de montagem do fabricante.

Em grande parte das propriedades visitadas as documentações não estavam disponíveis, consequentemente muitas vezes os produtores têm dificuldades de fazer o acompanhamento do

desempenho das instalações e a efetividade da economia gerada. Por isso, é essencial que os proprietários tenham acesso a um manual/aplicativo de acompanhamento da geração.

Além disso, verificou-se que o produtor se encarrega de cuidar das placas, limpá-las quando necessário, situação que merece todo cuidado. Muitas das instalações foram feitas sobre telhados, conforme Figura 5.3, logo qualquer operação precisa ser dotada de segurança, evitando assim, acidentes. Para isso, é fundamental que se capacite o proprietário em cuidados básicos como: amarração de escadas, uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs), circulação em telhado, perigos de choques elétricos, desenergização, etc. É fortemente recomendável que o serviço seja realizado por empresas especializadas e equipadas com equipamentos de segurança. A capacitação do proprietário não só orienta a sua atuação, como a fiscalização do serviço contratado.

Figura 5.3: Sistema fotovoltaico instalado em telhado.



Fonte: Autores

Ainda, a sujidade é fator preocupante no bom desempenho das placas, portanto conservá-las é essencial para garantir o bom rendimento da instalação. As instalações propostas pelo RENOVA-PR encontram-se em regiões agrícolas, sujeitas a condições específicas do campo. É fundamental que se oriente os produtores a acompanhar rigorosamente as condições das placas, lavando-as regularmente com água e sabão neutro, e com os devidos cuidados para não danificar os equipamentos. A limpeza deve ser feita preferencialmente em horários em que os módulos solares não estejam quentes para evitar choque térmico, de modo a não danificar o vidro da cobertura. Além disso, a usina deve estar completamente desligada para garantir a segurança das pessoas. A Figura 5.4 mostra um sistema fotovoltaico instalado em um telhado próximo a uma fonte de sujidade, no caso uma estrada de terra rural, em Arapoti:

Figura 5.4: Sistema fotovoltaico próximo a uma fonte de sujidade.



Fonte: Autores

A característica das usinas serem instaladas em propriedade rurais possibilita que o crescimento de vegetação acabe sombreando os painéis, diminuindo a geração de energia original do projeto. Para o controle do sombreamento é necessária a identificação de vegetação ao redor e a elaboração de um plano de poda. As árvores e a vegetação são preocupações contínuas e exigem manutenções periódicas. Assim, deve-se orientar o proprietário para que a limpeza do entorno seja um hábito, removendo também folhas, lixo ou outros detritos que possam apresentar risco de incêndio ou dificultar a drenagem. Além disso, no caso de Usina de solo, recomenda-se isolar a região com a utilização de cercas e/ou barreiras de proteção. A área deve ser sinalizada, indicando o risco de choque elétrico. A Figura 5.5 mostra um Sistema Fotovoltaico próximo a uma fonte de sombreamento, em Sertanópolis.

Figura 5.5: Sistema fotovoltaico próximo a uma fonte de Sombreamento



Fonte: Autores

Aconselha-se verificar a existência do sistema de aterramento no sistema fotovoltaico. Caso não exista, deve-se entrar em contato com os responsáveis pela instalação, ou um especialista da área, para que faça a adequação. Deve-se verificar periodicamente a condição do condutor terra com o intuito de identificar avarias no isolamento ou deformações. Nestes casos, profissionais competentes devem ser contatados. Em zonas rurais deve-se ter cuidado ao fazer a limpeza e roçagem do terreno para não danificar o aterramento. A Figura 5.6 mostra um aterramento irregular de Sistema Fotovoltaico na Lapa:

Figura 5.6: Aterramento irregular do Sistema Fotovoltaico



Fonte: Autores

Recomenda-se também uma revisão periódica de cabos, conexões e dos eletrodutos. Caso seja identificada deformidade ou avaria, sugere-se entrar em contato com os responsáveis pela instalação da UFV, ou um especialista da área, já que o manuseio

inadequado pode colocar em risco a vida. Na maioria dos casos pode ser necessária a substituição dos elementos.

Para o bom funcionamento dos inversores, deve-se remover qualquer sujeira e/ou poeira presente em tais componentes (inversor, controlador de carga, transformadores, sistema de proteção, etc.). Para realizar a limpeza utilize um pano seco. Caso seja identificada a presença de pequenos animais, sugere-se o uso de repelentes, como a naftalina. O cubículo que abriga os inversores deve ser normalmente fechado, evitando o acesso indevido e a exposição direta ao sol. Entretanto, não se pode esquecer de garantir a adequada ventilação no local, utilizando tijolos vazados ou equipamentos mecânicos como exaustores e ventiladores. A Figura 5.7 mostra um inversor exposto diretamente a uma fonte de sujeira e também a umidade em Castro:

Figura 5.7: Inversor exposto à sujeira e à umidade



Fonte: Autores

Em caso de inspeção termográfica, para determinar se a temperatura de operação dos equipamentos é prejudicial ao seu funcionamento é necessário consultar o datasheet do fabricante. Caso o equipamento esteja operando acima da temperatura recomendada, é necessário identificar a causa do problema e adotar medidas corretivas adequadas para diminuição da temperatura. Uma medida que pode ajudar a melhorar as condições térmicas dos equipamentos é o uso de ventilação forçada, deve-se verificar também a possibilidade de fuga de corrente em caso de aquecimento do condutor-terra.

Por fim, a inspeção visual é imprescindível para garantir o funcionamento eficiente da usina, confirmando o rendimento esperado e minimizando despesas excessivas com manutenções de grande porte. Recomenda-se também observar as condições dos elementos mecânicos, civis e estruturais regularmente. Em caso de alteração, solicitar a presença de um especialista para as devidas providências.

## **CAPÍTULO 6: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A ENERGIA SOLAR NO AMBIENTE RURAL**

Neste capítulo são apresentados os desafios para a expansão da geração fotovoltaica no ambiente rural. Trata-se de uma análise das principais barreiras encontradas em campo que podem desestimular o interesse dos proprietários na implementação de geração renovável em sua propriedade. Além disso, são abordadas as principais vantagens e oportunidades observadas na pesquisa, podendo orientar novas abordagens de programas e iniciativas de governo.

### **6.1 Desafios e Barreiras para a Expansão da Energia Solar Fotovoltaica**

A energia solar fotovoltaica tem registrado avanços expressivos nas últimas décadas, consolidando-se como uma solução sustentável para atender à demanda energética em diversas regiões do mundo, incluindo o meio rural. No contexto brasileiro, em especial no ambiente rural, os resultados da pesquisa conduzida pelo grupo do NAPI Solar indicam uma crescente adoção dos sistemas fotovoltaicos. De acordo com a opinião dos produtores rurais entrevistados, essa expansão ocorre, sobretudo, devido aos benefícios econômicos, pela maior independência energética das propriedades, sendo os benefícios ambientais também relevantes, embora em menor grau. O rápido retorno sobre o investimento tem sido um fator determinante para o crescente interesse na energia solar fotovoltaica, consolidando o Estado do Paraná como referência nacional na aplicação dessa tecnologia no setor agropecuário.

Apesar do potencial e das vantagens, a expansão da energia solar fotovoltaica enfrenta desafios que precisam ser superados para garantir sua ampla adoção e eficiência. Um dos principais desafios enfrentados no meio rural é a instabilidade das redes elétricas, o que compromete a integração eficiente dos sistemas fotovoltaicos. Muitas regiões carecem de infraestrutura adequada para garantir um

fornecimento estável de energia, impactando o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, a ausência de soluções robustas de armazenamento de energia limita a autonomia das propriedades rurais, especialmente em momentos de baixa incidência solar ou em situações de falha na rede elétrica. Outro desafio significativo é a necessidade de inspeção periódica dos sistemas fotovoltaicos. No meio rural, fatores como acúmulo de poeira, crescimento da vegetação e falta de conhecimento técnico podem comprometer o desempenho dos sistemas, tornando essencial a manutenção regular para garantir a eficiência da geração de energia. Um dos fatores críticos identificados é a sujidade dos painéis, especialmente em regiões próximas a plantações, estradas de terra e áreas com alta incidência de poeira. Esse aspecto reforça a importância da limpeza periódica dos módulos, uma prática frequentemente negligenciada pelos proprietários ou realizada de forma inadequada, podendo, inclusive, comprometer a segurança dos trabalhadores. Auditorias realizadas em algumas instalações identificaram riscos associados às técnicas de limpeza utilizadas, evidenciando a necessidade de maior conscientização e capacitação.

Entre os principais problemas observados, destacam-se ainda falhas na instalação das usinas, como orientação e inclinação inadequadas dos módulos, e questões operacionais, como o crescimento descontrolado de vegetação no entorno, que pode provocar sombreamento. Além disso, a presença de estruturas próximas ao sistema pode gerar sombras sazonais, reduzindo significativamente a eficiência da geração. Ademais, muitas propriedades enfrentam dificuldades para realizar inspeções regulares, seja pela falta de conhecimento técnico ou pelo alto custo de serviços especializados. A capacitação e orientação dos produtores, e a ampliação do acesso a serviços de manutenção qualificados, são essenciais para garantir a longevidade e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos no meio rural.

Além disso, é pertinente destacar a importância da atualização contínua no processo de credenciamento de fornecedores de sistemas fotovoltaicos no âmbito do programa RENOVA-PR. O

momento é oportuno, especialmente considerando que a auditoria realizada por esta pesquisa permitiu identificar pontos de atenção quanto à qualidade dos serviços prestados e ao suporte oferecido por alguns fornecedores. O aprimoramento dos mecanismos de acompanhamento das entregas, aliado à eventual substituição de empresas com desempenho aquém do esperado, contribui para assegurar a excelência e a credibilidade do programa, fortalecendo sua expansão sustentável e bem-sucedida.

Dante desses desafios, faz-se necessário o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem soluções inovadoras para melhorar a infraestrutura elétrica, expandir o acesso a sistemas de armazenamento de energia e promover treinamentos técnicos para agricultores e profissionais do setor. Apenas com a superação dessas barreiras a energia solar fotovoltaica poderá se consolidar como uma solução viável e amplamente adotada no ambiente rural, contribuindo para a sustentabilidade e a autonomia energética dos produtores.

## **6.2 Oportunidades e Inovações para o Setor**

A energia solar fotovoltaica tem um papel transformador no futuro do agronegócio, oferecendo não apenas uma alternativa sustentável de geração de energia, mas também promovendo maior autonomia e redução de custos operacionais para os produtores rurais. A expansão da geração distribuída e o avanço das tecnologias de armazenamento de energia têm permitido a otimização do uso da eletricidade, garantindo maior estabilidade no fornecimento, mesmo em regiões com infraestrutura elétrica deficiente. No entanto, a atual legislação impede a operação ilhada dos sistemas de geração distribuída, o que representa um obstáculo, pois qualquer problema na rede elétrica desativa automaticamente o sistema fotovoltaico por segurança. Assim, muitas propriedades ainda utilizam geradores a diesel para garantir o fornecimento de energia em momentos de desconexão da rede.

Os recentes avanços tecnológicos, como inversores híbridos e novas soluções de armazenamento de energia, têm ampliado as

possibilidades para os produtores rurais, permitindo que a energia gerada durante o dia seja armazenada para uso noturno ou em momentos de menor incidência solar. Essa evolução minimiza a dependência da rede elétrica convencional e garante maior segurança energética para o setor.

As políticas públicas e incentivos financeiros são fundamentais para a democratização do acesso à energia solar no meio rural. Programas como o RENOVA-PR têm desempenhado um papel essencial na expansão da tecnologia, viabilizando financiamentos acessíveis e o acesso dos produtores aos sistemas fotovoltaicos. Esses incentivos têm permitido a ampliação da geração distribuída no campo, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental das propriedades rurais.

A inovação e a digitalização também estão revolucionando o setor. Tecnologias avançadas, como sensores inteligentes e sistemas de monitoramento remoto, permitem o acompanhamento em tempo real do desempenho das usinas fotovoltaicas. A inteligência artificial desempenha um papel cada vez mais relevante nesse contexto, auxiliando na análise de padrões de geração, na previsão de manutenções e na otimização do uso da energia produzida. Essa tecnologia pode chegar ao homem do campo em um curto período de tempo.

O futuro da energia solar no agronegócio passa por uma combinação de avanços tecnológicos, apoio governamental e inovação digital. Com a evolução contínua dessas frentes, a energia solar fotovoltaica se consolidará como um dos principais pilares da transição energética no setor rural. Para isso, é essencial que políticas públicas e iniciativas privadas continuem incentivando a adoção da tecnologia, garantindo que cada vez mais produtores rurais tenham acesso a uma fonte de energia limpa, eficiente e economicamente viável.

## **REFERÊNCIAS**

- ABDEEN, E.; ORABI, M.; HASANEEN, E. Optimum tilt angle for photovoltaic system in desert environment. *Solar energy*, v. 155, p. 267–280, 2017.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Normas Brasileiras Registradas. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>>. Acesso em 04 de Setembro de 2024.
- ABSOLAR. 2023. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/internacional/brasil-foi-o-4o-maior-mercado-de-energia-solar-do-mundo-em-2023> > Acesso em: 14 de Março de 2023.
- AL-ADDOUS, M.; DALALA, Z.; CLASS, C.B. et al. Performance analysis of off-grid FV systems in the Jordan valley. *Renew. Energy*, v. 113, p. 930-941, 2017.
- AL-TAANI, H., ARABASI, S., 2018. Solar Irradiance Measurements Using Smart Devices: A Cost-Effective Technique for Estimation of Solar Irradiance for Sustainable Energy Systems, *Sustainability*, 10(2), 508.
- ALVES, F. R. R. Estudo do Efeito da Sujidade na Eficiência de Módulos Fotovoltaicos. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2018.
- Amara-e Servicio Técnico. Enemigos de la fotovoltaica – delaminación. 11 de maio 2020. Amara-e. Disponível em: <<https://www.amara-e.com/enemigos-fotovoltaica-delaminacion/>>. Acesso em: 19 de Dezembro de 2024.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa (REN) n. 482/2012 - Estabelece as condições gerais para o 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<<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa (REN) n. 1059/2023 - Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas

de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, e dá outras providências. Brasília, fev. 2023. DOU de 10.02.2023, seção 1, p. 65, v. 161, n. 30.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa (REN) n. 1098/2024 - Aprimora a Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, em função da publicação da Lei nº 14.620, de 2023, que dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida, e dá outras providências. Brasília, jul. 2024. DOU de 31.07.2024, seção 1, p. 86, v. 162, n. 146.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa (REN) n. 956/2021 - Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, revoga as Resoluções Normativas nº 395, de 15 de dezembro de 2009; nº 424, de 17 de dezembro de 2010; nº 432, de 5 de abril de 2011 e dá outras providências. Brasília, DOU de 15.12.2021, seção 1, p. 125, v. 159, n. 235.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa (REN) n. 687/2015 - Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Áreas de atuação de concessionárias. Disponível em <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNDI4ODJiODctYTUyYS00OTgxLWE4MzktMDczYTlmMDU0ODYxliwidCI6ljQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9&pageName=ReportSection>>. Acesso em 26 de Março de 2025.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa (REN) n. 1000/2021 - Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília, dez. 2021. DOU de 20/12/2021, Seção 1, p.206.

ANEEL (2025) - Unidades com Geração Distribuída. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6ljQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 12 de Março de 2025.

ANEEL/SGT - Superintendência de Gestão Tarifária - Tarifas Residenciais. Disponível em <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZDFmMzIzM2QtM2EyNi00YjkyLWIxNDMtYTU4NTI0NWlyNTI5IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>> Acesso em: 14 de Março de 2023.

ANTHONY, David; TELEGIN, Dimitri Y.; BROWN, Dorcas. The origin of horseback riding. *Scientific American*, v. 265, n. 6, p. 94-101, 1991.

APPEL, TIAGO NASSER. Dos caçadores-coletores aos grandes impérios: Interpretando o aumento da complexidade social à luz da teoria da evolução. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Economia Política Internacional.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15465 - Sistemas de eletrodutos plásticos para instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos de desempenho. Brasil, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16274 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Brasil, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16612 - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura— Requisitos de desempenho. Brasil, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16690 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto. Brasil, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7286 - Cabos de potência com isolação sólida extrudada de borracha etileno propileno (EPR, HEPR ou EPR) para tensões de isolamento de 1kV a 35kV. Brasil, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7287 - Cabos de potência com isolação sólida extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de isolamento de 1 kV a 35 kV. Brasil, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7288 - Cabos de potência com isolação sólida extrudada de cloreto de polivinila (PVC) ou polietileno (PE) para tensões de 1 kV a 6 kV - Especificação. Brasil, 2018.

AYADI, F. COLAK, I. GARIP, I. BULBUL, H. I. Impacts of Renewable Energy Resources in Smart Grid. 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), 2020, pp. 183-188, doi: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144695.

Bernreuter, J. (2024). POLYSILICON PRICE TREND: What is driving the roller-coaster ride of the polysilicon price? Disponível em <<https://www.bernreuter.com/polysilicon/price-trend/>>. Acesso em 15 de Março de 2024.

BOKOLO JNR, Anthony. Use of telemedicine and virtual care for remote treatment in response to COVID-19 pandemic. Journal of medical systems, v. 44, n. 7, p. 132, 2020.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília, 2009.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em 10 de Fevereiro de 2025.

BRASIL. Lei n. 12328/2015. Código de Processo Civil e normas correlatas. – 14. ed. – Brasília, DF : Senado Federal, Coordenação de Edições Técnicas, 2021. 290 p. Disponível em <[https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/587896/CPC\\_normas\\_correlatas\\_14ed.pdf](https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/587896/CPC_normas_correlatas_14ed.pdf)>. Acesso em 10 de Fevereiro de 2025.

BRASIL. Lei n. 8.078/1990. Código de Defesa do Consumidor e normas correlatas. Disponível em <[https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/555106/cdc\\_e\\_normas\\_correlatas\\_3ed.pdf](https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/555106/cdc_e_normas_correlatas_3ed.pdf)>. Acesso em 10 de Fevereiro de 2025.

BRASIL. Lei n.14.300/2022 - Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, ago 2022. DOU de 7/1/2022. Disponível em <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm)>. Acesso em 25 de março de 2025.

Canary Media (2023). Chart: Solar installations set to break global, US records in 2023. Disponível em <<https://www.canarymedia.com/articles/solar/chart-solar-installations-set-to-break-global-us-records-in-2023>> Acesso em 15 de março de 2024.

CARVALHO, Joaquim Francisco de. Energia e sociedade. Estudos avançados, v. 28, p. 25-39, 2014.

Casa Civil. Acesso à Energia Elétrica chega a 17 milhões de pessoas. 2022. Disponível em <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2022/agosto/acesso-a-energia-eletrica-no-brasil-chega-a-17-milhoes-de-pessoas>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

CHANGES for solar in Germany. 2014. Renewable International. Disponível em <<https://web.archive.org/web/20140512222547/http://www.renewablesinternational.net/changes-for-solar-in-germany/150/452/77990/>> Acesso em: 01 de Setembro de 2022.

CHEN, S.; LI, P.; BRADY, D.; LEHMAN, B. (2013). Determining the optimum grid-connected photovoltaic inverter size, Solar Energy, Volume 87, 2013.

CNJ, Conselho Nacional de Justiça. Conheça a hierarquia das leis brasileiras. Disponível em <<https://www.cnj.jus.br/cnj-servico-conheca-a-hierarquia-das-leis-brasileiras/>>. Acesso em 28 de março de 2025.

COELHO, Fabrícia Lelis Naime de Almeida. O incentivo à moradia ambientalmente correta: o uso da energia renovável. Revista de Direito Econômico e Socioambiental, v. 5, n. 1, p. 180-198, 2014.

COOK, Earl. The flow of energy in an industrial society. Scientific American, v. 225, n. 3, p. 134-147, 1971.

COPEL. Companhia Paranaense de Energia. Normas Técnicas. Disponível em <<https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/poder-publico/micro-e-mini-geracao/>> . Acesso em 20 de Setembro de 2024.

CRESESB, Centro de Referência Para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Brito. História da Energia Eólica e suas utilizações. Disponível em <<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=content&lang=pt&catid=3>> Acesso em: 05 de Agosto de 2022.

CURITIBA. Leis Municipais. Lei nº 15.277/2018 - Autoriza o Município de Curitiba a conceder o uso de bens públicos municipais para geração de energias renováveis. Disponível em <<https://https://>

[leismunicipais.com.br/a/pr/c/curitiba/lei-ordinaria/2018/1528/15277/lei-ordinaria-n-15277-2018](https://leismunicipais.com.br/a/pr/c/curitiba/lei-ordinaria/2018/1528/15277/lei-ordinaria-n-15277-2018). Publicada no DOM de 23/08/2018.

CURITIBA. Leis Municipais. Lei nº 15.778/2020 - Dispõe sobre a geração de energia elétrica fotovoltaica nos lagos dos parques municipais. Disponível em <<https://leismunicipais.com.br/a/pr/c/curitiba/lei-ordinaria/2020/1578/15778/lei-ordinaria-n-15778-2020>>. Publicada no DOM de 22/12/2020.

DEGUCHI, Atsushi. From smart city to society 5.0. Society, v. 5, p. 43-65, 2020.

DGTEC. Controlador de Carga Solar MPPT 20A Epever XTRA 2210N 12/24V. Disponível em <<https://www.dgtec.com.br/energia-solar/controlador-de-carga/pwm/controlador-de-carga-solar-mppt-20a-epever-xtra-2210n-1224v>> Acesso em: 10 de Março de 2025.

DRANKA, Géremi Gilson; FERREIRA, Paula. Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities. Energy Policy, 136, 111033., 2020.

DUFFIE, J. A., & BECKMAN, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes (4th ed.). John Wiley & Sons.

ENEVA. (2025). Usina Fotovoltaica de Tauá. [Página da Web]. Rio de Janeiro: ENEVA.. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2025.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2025. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt>>. Acesso em 20 de Março de 2025.

FAPPR, Fundação Araucária. Nota Técnica da Fundação Araucária nº 01/2019 - Novos Arranjos de Pesquisa e Inovação. 2019. Disponível em <[https://www.fappr.pr.gov.br/sites/fundacao-araucaria/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-06/nota\\_001\\_napi.pdf](https://www.fappr.pr.gov.br/sites/fundacao-araucaria/arquivos_restritos/files/documento/2020-06/nota_001_napi.pdf)> Acesso em 09 de Abril de 2025.

FEED-IN tariff: A policy tool encouraging deployment of renewable electricity technologies. 2013. U.S. Energy Information Administration. Disponível em <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=11471>> Acesso em: 28 de Outubro de 2022.

FIORILLO, Celso Antonio Pacheco; FERREIRA, Renata Marques. Curso de direito da energia: tutela jurídica da água, do petróleo, do biocombustível, dos combustíveis nucleares e do vento. São Paulo: Saraiva, 2010.

FONSECA, R. S. Iluminação Elétrica. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1972.

FRONIUS. Página oficial da Fronius Brasil. Disponível em <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil>> Acesso em: 10 de Março de 2025.

GALDINO, M. A., & da SILVA, P. de C. (2016). Subsídios para identificação visual de problemas em células e módulos fotovoltaicos. Revista Brasileira De Energia Solar, 5(2).. .

GANESAN, S., DAVID, P.W., THANGARAJ, H. et al. Power enhancement of PV arrays in different configurations under different partial shaded condition. Sci Rep 15, 6963 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91508-9>

GHOBAKHLOO, M.; MAHDIRAJI, H.A.; IRANMANESH, M.; JAFARI-SADEGHI, V. From Industry 4.0 digital manufacturing to Industry 5.0 digital society: a roadmap toward human-centric, sustainable, and resilient production. Information Systems Frontiers, p. 1-33, 2024.

Global Solar Atlas. 2025. Disponível em <<https://globalsolaratlas.info/download/brazil>>. Acesso em 20 de Março de 2025.

GREGG, A.; PARKER, T.; SWENSON, R. A “real world” examination of PV system design and performance. 31st IEEE Photovoltaic specialists conference, Lake Buena Vista, p. 1587-1592, 2005.

GTSC A2030, Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030 do Desenvolvimento Sustentável. ODS. Disponível em <<https://gtagenda2030.org.br/ods/>>. Acesso em: 12 de agosto de 2022.

Guardian. 2010. GERMANY targets switch to 100% renewables for its electricity by 2050. Disponível em <<https://www.theguardian.com/environment/2010/jul/07/germany-renewable-energy-electricity>> Acesso em: 01 de Setembro de 2022.

GUEDES, Luis Fernando Ascenção. Era da informação: o que é e quais são os efeitos nas empresas. São Paulo: Fundação Instituto de Administração, 2019.

HAZIM, H.I.; BAHARIN, K.A.; GAN, C.K.; SABRY, A.H.; HUMADI, A.J. Review on Optimization Techniques of PV/Inverter Ratio for Grid-Tie PV Systems. Appl. Sci. 2023, 13, 3155. <https://doi.org/10.3390/app13053155>

Hopkins, M., & Li, Y. (2016). The rise of the Chinese solar photovoltaic industry: Firms, governments, and global competition. In China as an Innovation Nation (pp. 306–332). Oxford University Press.

HÉMERY, Daniel; BEBIER, Jean Claude; DELÉAGE, Jean-Paul. Uma História da Energia. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1993.

IAP, Instituto Ambiental do Paraná IAP. Portaria IAP nº 19/2017 - Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar em superfície terrestre, nos termos que especifica. Disponível em <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=337165#:~:text=Estabelece%20procedimentos%20para%20o%20licenciamento,terrestre%2C%20nos%20termos%20que%20especifica>>. Publicada no DOE-PR em 09/02/2017. Revogado pela Resolução SEDEST Nº 11 DE 23/02/2021

IBERDROLA. História da Eletricidade. Sustentabilidade. Disponível em <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/historia-eletredade>>. Acesso em: 05 de Agosto de 2022.

IBGE, Instituto Brasileira de Geografia e Estatística. Produção Agropecuária. 2023. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/pr>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Características Gerais dos Domicílios e dos Moradores 2022. 2022. Disponível em <[https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com\\_mediaibge/arquivos/1cd893a10b3c\\_abf31fc31e994531632f.pdf](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/1cd893a10b3c_abf31fc31e994531632f.pdf)> Acesso em 01 de Abril de 2025.

IDR-PR, Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná. Três anos de RENOVAR: Paraná é Líder na Capacidade instalada para a Geração de Energia no Setor Rural nas Regiões Sul e Sudeste. 2024. Disponível em <<https://www.idrparana.pr.gov.br/Noticia/Tres-anos-de-RenovaPR-Parana-e-lider-na-capacidade-instalada-para-geracao-de-energia-no>> Acesso em 09 de Abril de 2025.

IEA, International Energy Agency. Renewables. 2025b. Disponível em <<https://www.iea.org/energy-system/renewables>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

IEA, International Energy Agency. Renewables 2023 Global Status Report. 2021. Disponível em <[https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy\\_supply/01\\_energy\\_supply](https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy_supply/01_energy_supply)>. Acesso em 12 de Setembro de 2024.

IEA, International Energy Agency. Electricity access continues to improve in 2024 - after the first global setback in decades. 2024b. Disponível em <<https://www.iea.org/commentaries/electricity-access-continues-to-improve-in-2024- after-first-global-setback-in-decades>> Acesso em 01 de Abril de 2025.

IEA, International Energy Agency. Energy Statistics Data Browser. 2024a. Disponível em <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%2supply&indicator=TESbyPop>>. Acesso em 27 de Setembro de 2024.

IEA, International Energy Agency. World Energy Balances: Overview. Paris, 2021. Disponível em <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>. Acesso em 12 de Agosto de 2022.

IEA, International Energy Agency. The Path to a New Era for Nuclear Energy. 2025a. Disponível em <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/b6a6fc8c-c62e-411d-a15c-bf211ccc06f3/ThePathtoaNewEraforNuclearEnergy.pdf>>. Acesso em 01 de Abril de 2025

IEA, International Energy Agency. World Energy Outlook 2024. 2024c. Disponível em <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

IEA, International Energy Agency. Renewables 2024 - Analysis and Forecast to 2030. 2024d. Disponível em <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf>> Acesso em 02 de Abril de 2025

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Special Report on Solar PV Global Supply Chains. Paris: IEA, 2022a. Disponível em <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>> Acesso em: 14 de Março de 2023.

IEA- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY., Germany. 2023. Disponível em <<https://www.iea.org/countries/germany>>. Acesso em 14 de Março de 2023.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia. Portaria nº 140/2021- Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação

da Conformidade para Equipamentos de Geração, Condicionamento e Armazenamento de Energia Elétrica em Sistemas Fotovoltaicos – Consolidado. Publicada no DOU de 30/03/2022, seção 1 pág. 154 a 177.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Carta Conjuntura - Comércio Exterior do Agronegócio: Primeiro Semestre de 2024. 2024. Disponível em <[https://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/wp-content/uploads/2024/08/240801\\_cc\\_64\\_nota\\_3.pdf](https://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/wp-content/uploads/2024/08/240801_cc_64_nota_3.pdf)> Acesso em 02 de Abril de 2025.

IRENA. (2024a). Solar energy. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024a. Disponível em <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>>. Acesso em 25 de Agosto de 2025.

IRENA (2024b) Renewable power generation costs in 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA\\_Renewable\\_power\\_generation\\_costs\\_in\\_2023.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf)> Acesso em 25 de Agosto de 2025.

JACOMY, B. Une histoire des techniques. Paris: Seuil, 1990.

JALAL, Marium; KHALIL, Ihsan Ullah; HAQ, Azhar ul. Deep learning approaches for visual faults diagnosis of photovoltaic systems: State-of-the-Art review. Results in Engineering. Volume 23. 2024. Page 102622. ISSN 2590-1230.

JAPÃO, Cabinet Office. Examples of Creating New Value in the Field of Agriculture (Society 5.0). Disponível em <[https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5\\_0/agriculture\\_e.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/agriculture_e.html)> Acesso em 02 de Agosto de 2022.

JAPÃO, Cabinet Office. What is Society 5.0? Disponível em <[https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/index.html)> Acesso em 02 de Agosto de 2022.

JUNIOR, J. G. S.; CRUZ, S. R.; AMARAL, L. S. Impacto da Sujidade Sobre o Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.

Jäger-Waldau, A. (2022). Snapshot of photovoltaics – February 2022. EPJ Photovoltaics, 13(1), 10.

KEIDANREN Policy & Action (Japan Business Federation). Society 5.0 Co-creating the future (Excerpt). 2018. Disponível em: [https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2018/095\\_proposal.pdf](https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2018/095_proposal.pdf). Acesso em 3 de Agosto de 2022.

KEIDANREN Policy & Action (Japan Business Federation). Society 5.0 for SDGs. 2017. Disponível em <<https://www.keidanren.or.jp/en/policy/csr/2017reference2.pdf>> Acesso em 03 de Agosto de 2022.

KING, D. L., KRATOCHVIL, J. A., BOYSON, W. E., 2004. Photovoltaic array performance model (pp. 1-43), United States, Department of Energy.

KLAHOLD, A.; FATHI, M.; ZENKERT, J. Society 5.0 illustrated by the example of computer aided journalism. In: 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT). IEEE, 2022. p. 504-506.

LEAKEY, Richard E. A evolução da humanidade. In: A evolução da humanidade. 1982. p. 256-256.

LINDGREN, R.; HENFRIDSSON, O.; SCHULTZE, U. Design Principles for Competence Management Systems: a Synthesis of an Action Research Study. MIS Quarterly, v.28, n.3, September 2004.

Liu, H., & Liang, D. (2013). A review of clean energy innovation and technology transfer in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 486–498.

MA, W.W., RASUL, M.G., LIU, G., et al., 2016. Climate change impacts on techno-economic performance of roof FV solar system in Australia, Renew. Energy, 88, 430–438.

MAGHAMI, Mohammad Reza; HIZAM, Hashim; GOMES, Chandima; RADZI, Mohd Amran; REZADAD, Mohammad Ismael; HAJIGHORBANI, Shahrooz. Power loss due to soiling on solar panel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 59. 2016. Pages 1307-1316. ISSN 1364-0321.

MANSUR, A. A.; AMIN, M. R.; ISLAM, K. K. Performance comparison of mismatch power loss minimization techniques in series-parallel PV array configurations. Energies, v. 12, n. 5, 2019. Disponível em <<https://doi.org/10.3390/en12050874>>. Acesso em: 13 de Julho de 2023.

MAP, Ministério da Agricultura e Pecuária. Agrostat - Estatística de Comércio Exterior e Agronegócio Brasileiro. 2025. Disponível em <<https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Agrostat/Agrostat.htm>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

MATTICK, Carolyn S.; WILLIAMS, Eric; ALLENBY, Braden R. Historical trends in global energy consumption. IEEE Technology and Society Magazine, v. 29, n. 3, p. 22-30, 2010.

MDS, Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social e Combate à Fome. Transformando Nossa Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2016. Disponível em <[https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil\\_Amigo\\_Pesso\\_Idosa/Agenda2030.pdf](https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf)> Acesso em 03 de Abril de 2025.

MELNYK, Leonid Hr.; DERYKOLENKO, Oleksandr M.; MAZIN, Yuriy O.; MATSENKO, Olena I.; PIVEN, Vladyslav S. (2020). Modern trends in the development of renewable energy: the experience of the EU and leading countries of the world. Mechanism of Economic Regulation, n. 3.

MEU GERADOR. Microinversor Solar SAJ M2-2.25K-S4 2,25KW 220V 4MPPT Monitoramento WiFi. Disponível em: <<https://www.meugerador.com.br/products/microinversor-solar-saj-m2-2-25k-s4-2-25kw-220v-4mppt-monitoramento-wifi>>. Acesso em: 10 de Março de 2025.

MISHRA, Pushp Rai; RATHORE, Shanti; VARMA, K.S. Vishnu; YADAV, Satish Kumar. Long-term performance and degradation analysis of a 5 MW solar PV plant in the Andaman & Nicobar Islands. Energy for Sustainable Development. Volume 79. 2024. Page 101413. ISSN 0973-0826.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. A NDC do Brasil - Determinação Nacional em Contribuir e Transformar. 2024. Disponível em <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-envia-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/ndc-versao-em-portugues.pdf>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

MME, Ministério de Minas e Energia. Programa de Aceleração da Transição Energética foi sancionado nesta Quarta-Feira. 2025. Disponível em <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/programa-de-aceleracao-da-transicao-energetica-foi-sancionado-nesta-quarta-feira>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

MONDOC, B. and POP, F. Factors Influencing the Performance of a Photovoltaic Power Plant. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN POWER SYSTEMS MPS. 2010.

NARVAEZ ROJAS, C.; ALOMIA PEÑAFIEL, G. A.; LOAIZA BUITRAGO, D. F.; TAVERA ROMERO, C. A. Society 5.0: A Japanese concept for a superintelligent society. Sustainability, v. 13, n. 12, p. 6567, 2021.

NeoSolar. 2025a. TIPOS DE PLACA SOLAR. Disponivel em <<https://www.neosolar.com.br/tipos-de-placa-solar>>

[neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/tipos](https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/tipos)> Acesso em 20 de Março de 2025.

NeoSolar. 2025b. Energia Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre. Disponível em <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>>. Acesso em 20 de Março de 2025.

NEVES, D.; SOUZA, R. Revolução Industrial. Mundo Educação, 2022. Disponível em <https://mundoeducacao.uol.com.br/historiageral/revolucao-industrial-2.htm>. Acesso em 05 de Agosto de 2022.

NIRMALA, J. Super Smart Society: Society 5.0. RoboticsTomorrow. Dostupné, v. 27, n. 3, p. 2019, 2016.

NITSCHE, P. B. et al. Atlas Climático do Estado do Paraná. Curitiba: IAPAR, 2019.

NUNES, Thiago Markowski. Análise de vida útil de transformadores de potência sob diferentes condições operativas de carregamento.16th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2024). .

ONS (2025a). Evolução da Capacidade instalada no SIN - Fevereiro 2025/Dezembro 2029. Acesso em 20 de Fevereiro de 2025.

ONS (2025b). Evolução da Capacidade Instalada de Geração Eólica e Fotovoltaica. Disponível em <[https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/evolucao\\_capacidade\\_instalada.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/evolucao_capacidade_instalada.aspx)>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2025.

ONU, Organização das Nações Unidas. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Brasil, DF, 2015.

PANDEY, C.K., KATIYAR, A.K., 2013. Solar radiation: Models and measurement techniques, J. Energy, 2013, 305207.

PEHARZ, G., RODRÍGUEZ, J.P.F., SIEFER, G., BETT, A.W., 2011. A method for using CFV modules as temperature sensors and its application to rating procedures, Sol Energy Mater Sol Cells;95:2734–44

PATEL, H. and AGARWAL, V. “MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics,” in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, March 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914308.

PEO, Parliamentary Education Office. Introducing Rules and Laws.

Disponível em < <https://peo.gov.au/understand-our-parliament/how-parliament-works/bills-and-laws/introducing-rules-and-laws>>. Acesso em 01 de novembro de 2024.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – Cresesb. Rio de Janeiro-RJ, 2014.

PLANALTO. Brazil Presents its New Climate Target Aligned with mission 1.5°C. 2024. Disponível em <<https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2024/11/brazilpresents-its-new-climate-target-aligned-with-mission-1.5oc>> Acesso em 02 de Abril de 2025.

PORTAL SOLAR. História e origem da Energia Solar. 2020. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/materias/historia-eorigem-da-energia-solar>>. Acesso em 11 de agosto de 2022.

Pérez-Higueras P, Ferrer-Rodríguez JP, Almonacid F, Fernández EF. Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94, 2018.

QUEST H, BALLIF C, VIRTUANI A. Intrinsic performance loss rate: Decoupling reversible and irreversible losses for an improved assessment of photovoltaic system performance. Prog Photovolt Res Appl. 2024; 32(11): 774-789. doi:10.1002/pip.3829

RAHMAN, Md Momtazur; KHAN, Imran; ALAMEH, Kamal. Potential measurement techniques for photovoltaic module failure diagnosis: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 151, p. 111532, 2021. ISSN 1364-0321 .

RAHMAN, M.M.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N.A., Effects of various parameters on PV-module power and efficiency, Energy Conversion and Management, Volume 103, 2015.

RAY, P. Renewable energy and sustainability. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 21, n. 8, p. 1517-1533, 2019.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max; ROSADO, Pablo. Energy. Our world in data, 2022.

ROOKS, Timothy. Germany gets solar power boost amid energy crisis. 2022. Disponível em <<https://www.dw.com/en/photovoltaic-solar-panel>>

energy-can-germany-regain-its-solar-power-crown/a-62704103> Acesso em: 1 de Setembro de 2022.

SACHS, Ignacy. Caminhos para o desenvolvimento sustentável. Editora Garamond, 2000.

Sartori, Gustavo (2024). Unveiling The Untapped Potential of Brazil's Solar Energy Market. Disponível em <<https://ipwatchdog.com/2024/04/23/unveiling-untapped-potential-brazils-solar-energy-market/id=175566/>> Acesso em 20 de Março de 2025.

SEWARD. Solar Survey 100/200R Series - The ultimate solar site survey tool. 2019. Disponível em <<https://www.seaward.com/gb/support/download/371>> Acesso em: 27 de Junho de 2022.

SEDEST, Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo do Estado do Paraná, 2021. Resolução SEDEST Nº 11/2021 - Estabelece definições, critérios, diretrizes e procedimentos para licenciamento de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar, no âmbito do Estado do Paraná.

SEDEST, Curitiba. Disponível em <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=410758>>. Publicado no DOE-PR de 09/03/2021.

SEMA/IAP, Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos e Instituto Ambiental do Paraná. Resolução conjunta nº 09/2010 - Estabelece procedimentos para licenciamentos de unidades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Estado do Paraná. Disponível em <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=144700>>. Publicado no DOEPR de 08/11/2010. Revogado pela Resolução Conjunta SEDEST/IAT Nº 5 DE 04/03/2021.

SEPÚLVEDA-OVIEDO, Edgar Hernando. A review of operational factors affecting photovoltaic system performance, Energy Conversion and Management: X, Volume 26, 2025, 100942, ISSN 2590-1745, .

SILVEIRA, C. B. O que é a Indústria 4.0 e como ela vai impactar o mundo. Citisystems. 2017. Disponível em <<https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>>. Acesso em: 05 de Agosto de 2022.

SINHA, P.; HAYES, W.; LITTMANN, B.; NGAN, L. Environmental variables affecting solar photovoltaic energy generation in Morocco. Renewable and Sustainable Energy Conference. 2014.

SKOBELEV, Petr O.; BOROVIK, S. Yu. On the way from Industry 4.0 to Industry 5.0: From digital manufacturing to digital society. *Industry 4.0*, v. 2, n. 6, p. 307-311, 2017.

SMIL, Vaclav. Energy in nature and society: general energetics of complex systems. MIT press, 2007.

SOLOMON, Barry D.; KRISHNA, Karthik. The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. *Energy Policy*, v. 39, n. 11, p. 7422-7431, 2011.

Soo, A., & Sanderson, H. (2012, September 25). China Development Bank Renews Solar Support, Journal Says. Bloomberg. <<http://www.bloomberg.com/news/2012-09-25/chinese-lender-supports-solar-companies-securities-journal-says.html>>. Acesso em: 25 de Agosto de 2025

SOPORI et al., “Understanding light-induced degradation of c-Si solar cells,” 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, TX, USA, 2012, pp. 001115-001120, doi: 10.1109/PVSC.2012.6317798.

STÄUBLI. Original MC4. Staubli. Suiça: Stäubli International AG, 2024. Disponível em: <[https://www.staubli.com/content/dam/ecs/catalogs-brochures/RE/SOL-MC4-110141\\_12-en.pdf](https://www.staubli.com/content/dam/ecs/catalogs-brochures/RE/SOL-MC4-110141_12-en.pdf)>. Acesso em: 19 de Dezembro de 2024.

SUNGROW. Sungrow’s Inversor Central: O coração e a alma do seu sistema solar. Disponível em <<https://br.sungrowpower.com/SubscribeConfirmPage/2342/sungrow-s-inversor-central-o-cora-o-e-a-alma-do-seu-sistema-solar>> Acesso em: 10 de Março de 2025.

TajjourS, ChandelSS, ChandelR, ThakurN. Powergeneration enhancement analysis of a 400 kWp grid-connected rooftop photovoltaic power plant in a hilly terrain of India. *Energy Sustain Dev* 2023;77:101333. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101333>.

TANG, Wuqin; YANG, Qiang; DAI, Zhou and YAN, Wenjun. Module defect detection and diagnosis for intelligent maintenance of solar photovoltaic plants: Techniques, systems and perspectives. *Energy*, Volume 297, 2024, page 131222. ISSN 0360-5442.

TENNESSEE. City of Lebanon. History of Natural Gas. Estados Unidos, Tennessee, 2016. Disponível em: <<https://www.lebanontn.org/183/History-of-Natural-Gas>> Acesso em 12 de agosto de 2022.

TESSMER, Hélio. Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem. *Revista Liberato*, v. 3, n. 3, 2002.

THOMPSON, Paul B. The agrarian vision: Sustainability and environmental ethics. University Press of Kentucky, 2010.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JUNIOR, J.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S.; ALVES, A. R. Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2017. ISBN 978-85-17-00091-1.

TONOLO, E. A. Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR Campus Curitiba. 2019. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

UN, United Nations. Sustainable Development Goals. Take Action for the Sustainable Development Goals. 2022. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>>. Acesso em 3 de agosto de 2022.

UN, United Nations. Global initiative for resource efficient cities. Why cities?., Paris, France, United Nations Environment Programme. Disponível em: Acesso em 5 de agosto de 2022.

UN, United Nations. Sustainable Development Goals. Ensure Access to Affordable, Reliable, Sustainable and Modern Energy. 2023. Disponível em:<<https://www.un.org/sustainabledevelopment-energy/#:~:text=Ensuring%20universal%20access%20to%20affordable,growth%20and%20help%20the%20environment>> Acesso em 01 de Abril de 2025

UN, United Nations. The Paris Agreement - What is the Paris Agreement?. 2024. Disponível em <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>> Acesso em 03 de Abril de 2025.

UNFCCC (2023a). What is the Kyoto Protocol? Disponível em: [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol). Acesso em: 13 de Março de 2023.

UNFCCC (2023b). The Paris Agreement. Disponível em <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>> Acesso em: 13 de Março de 2023.

USP, Centro de Pesquisa Aplicada da Universidade de São Paulo. A história do Petróleo. 1999. Disponível em <<http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/historia.html>> Acesso em: 24 de Abril de 2025.

VERMA, Sumit and YADAV, Dinesh Kumar. Recent research and developments of degradation assessment and its diagnosis methods for solar PV plant: a review. International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE). Vol. 13, No. 2, June 2024, pp. 483~498. ISSN: 2252-8792. DOI: 10.11591/ijape.v13.i2.pp483-498.

VILLALVA, M.. O efeito LID das células fotovoltaicas. Canal Solar. 2021. Disponível em < <https://canalsolar.com.br/o-efeito-lid-das-celulas-fotovoltaicas//>>. Acesso em: 24 de Junho de 2023.

VILLALVA, Marcelo. Estudo de caso: queda de tensão no circuito de CC segundo a NBR 16690. Canal Solar (2020). Disponível em <<https://canalsolar.com.br/estudo-de-caso-queda-de-tensao-no-circuito-de-cc-segundo-a-nbr-16690/>>. Acesso em: 24 de Junho de 2023.

VINTURINI, M. O efeito PID e sua ação sobre os módulos fotovoltaicos. Canal Solar. 2019. Disponível em < <https://canalsolar.com.br/o-efeito-pid-e-sua-acao-sobre-os-modulos-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 24 de Junho de 2023.

WERTHEIN, Jorge. A sociedade da informação e seus desafios. Ciência da informação, v. 29, p. 71-77, 2000.

WHO, World Health Organization. Basic Energy Access Lags Amid Renewable opportunities, new report shows. 2023. Disponível em <<https://www.who.int/news/item/06-06-2023-basic-energy-access-lags-amid-renewable-opportunities--new-report-shows>> Acesso em 01 de Abril de 2025.

Xu R, Ni K, Hu Y, Si J, Wen H, Yu D. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. Energy Convers Manag 2017;148:100–9.

ZEDER, Melinda A. Core questions in domestication research. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 112, n. 11, p. 3191-3198, 2015.

# APÊNDICE 1

## 1.1 Formulário de Re却imento das Instalações Parte Produtor

Questionário de Avaliação – Produtor						
Dados da Usina						
Proprietário:						
Telefone:						
Email:						
O que produz:						
Cidade:						
Endereço:						
Tipo de usina		Solo ( )		Telhado/Cobertura ( )		
Empresa Instaladora:						
Data de início de operação _____ / _____ /20_____						
Legenda: Fonte da informação - produtor (P)						
Infraestrutura						
Item	Verificação	Condição			Fonte	Observação
04	A estrutura de fixação dos painéis apresenta aspecto plano (sem deformação)?	Sim	Não	N/A	(P)	
05	A estrutura metálica da usina está sem sinais visíveis de corrosão?	Sim	Não	N/A	(P)	
Painéis Solares						
<b>Módulos fotovoltaicos:</b> Unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica através de energia solar. Comercialmente também denominado como placas solares.						
<b>Painéis solares:</b> Conjunto formado pela interligação dos módulos fotovoltaicos.						
Item	Verificação	Condição			Fonte	Observação
08	Quantidade de módulos	unidades			(P)	
09	Potência nominal dos módulos	Wp			(P)	
10	Marca do módulo fotovoltaico				(P)	

<b>11</b>	Modelo do módulo fotovoltaico		(P)	
<b>12</b>	Potência total instalada CC	kWp	Produto dos itens (08*09)	
<b>Inversor</b>				
Item	Verificação	Condição	Fonte	Observação
<b>22</b>	Quantidade total de inversores (Caso haja mais de um modelo de inversor, descreva a quantidade total e também a quantidade específica para cada modelo no campo de observação)	unidades	(P)	
<b>23</b>	Potência nominal (Saída - CA) do inversor	kW	(P)	
<b>24</b>	Fabricante do inversor		(P)	
<b>25</b>	Modelo do inversor		(P)	
<b>26</b>	Potência total instalada CA do inversor	kW	Somatório item 23	

#### Usina em Geral/Outras Informações

Item	Verificação	Condição	Fonte	Observação
<b>41</b>	Foi entregue ao proprietário a documentação mínima da usina pela empresa responsável pela instalação:  - Projeto com a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART); - Memoriais de cálculo e descritivo; - Manuais de operação e manutenção.  (Escala de 0 =nenhum, 1=Apenas um dos documentos foi entregue, 2=Apenas dois dos documentos mencionados foram entregues, 3=Todos os documentos mencionados foram entregues)	(0) (1) (2) (3)	N/A	(P)
<b>42</b>	Na caixa de medição da concessionária ou entrada de serviço, há etiqueta/placa de advertência de cuidados com a geração própria de energia elétrica?	Sim	Não	N/A

<b>43</b>	Qual a satisfação do proprietário com o sistema fotovoltaico?  (Escala de 0=nenhuma, 1=pouco a 5=muito)	(0) (1) (2) (3) (4) (5)		N/A	(P)	
<b>44</b>	Quais os benefícios apontados com o sistema fotovoltaico?	<b>Financeiro</b> <b>Ambiental</b> <b>Outros</b>		N/A	(P)	
<b>45</b>	O proprietário recebeu orientação de como acompanhar a geração da usina?	Sim	<b>Não</b>	N/A	(P)	
<b>46</b>	O proprietário acompanha a geração da usina constantemente?	<b>Diária</b> <b>Semanal</b> <b>Mensal</b> <b>Outros</b>		Não	(P)	
<b>47</b>	O proprietário foi instruído a realizar a limpeza dos painéis?	Sim	<b>Não</b>	N/A	(P)	
<b>48</b>	Qual foi a periodicidade de limpeza recomendada?	<b>Mensal</b> <b>Bimestral</b> <b>Semestral</b> <b>Anual</b>		N/A	(P)	
<b>49</b>	O sistema apresentou funcionamento contínuo sem falhas?	Sim	<b>Não</b>	N/A	(P)	
<b>55</b>	A garantia, período de cobertura, dos serviços e materiais/equipamentos foi apresentada e entregue ao proprietário?	Sim	<b>Não</b>	N/A	(P)	
<b>56</b>	O proprietário está satisfeito com a execução dos trabalhos e o pós-venda da empresa instaladora?	Sim	<b>Não</b>	N/A	(P)	
<b>57</b>	A produção de energia elétrica condiz com a expectativa apresentada pela empresa executora do projeto?	Sim	<b>Não</b>	N/A	(P)	
<b>Comentários Gerais</b>						
<b>Item</b>	Demais percepções e comentários que achar necessário:					
<b>60</b>						

## 1.2 Formulário de Inspeção Visual do Extensionista

### Parte Extensionista

<b>Questionário de Vistoria – IDR</b>						
<b>Dados da Usina</b>						
<b>Proprietário:</b>						
<b>Telefone:</b>						
<b>Email:</b>						
<b>O que produz:</b>						
<b>Cidade:</b>						
<b>Endereço:</b>						
<b>Coordenadas geográficas (GPS)</b>			<b>Latitude:</b>		<b>Longitude:</b>	
<b>Tipo de usina</b>			<b>Solo ( )</b>		<b>Telhado/Cobertura ( )</b>	
<b>Empresa Instaladora</b>						
<b>Data de instalação da usina</b> ____/____/20____						
<b>Data de início de operação</b> ____/____/20____						
<b>Dados do IDR</b>						
<b>Regional do IDR</b>						
<b>Extensionista</b>						
<b>Data da vistoria</b> ____/____/20____ Hora: : (Início)   : (Fim)						
<b>Legenda</b>						
<b>Fonte da informação</b> - produtor (P), projeto elétrico (PJ), informação fornecida pelo IDR (IDR), observado durante a visita (VS)						
<b>Infraestrutura</b>						
Item	Verificação	Condição			Fonte	Observação
<b>04</b>	A estrutura de fixação dos painéis apresenta aspecto plano (sem deformação)?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>05</b>	A estrutura metálica da usina está sem sinais visíveis de corrosão?	Sim	Não	N/A	(VS)	

## Painéis Solares

**Módulos fotovoltaicos:** Unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica através de energia solar. Comercialmente também denominado como placas solares.

**Painéis solares:** Conjunto formado pela interligação dos módulos fotovoltaicos.

Item	Verificação	Condição			Fonte	Observação
08	Quantidade de módulos fotovoltaicos	unidades			(P) (PJ) (IDR) (VS)	
09	Potência nominal do módulo fotovoltaico	Wp			(P) (PJ) (IDR) (VS)	
10	Marca do módulo fotovoltaico				(P) (PJ) (IDR) (VS)	
11	Modelo do módulo fotovoltaico				(P) (PJ) (IDR) (VS)	
12	Potência total instalada CC	kWp			Produto dos itens (08*09)	
16	Todos os módulos estão devidamente fixados nas estruturas?	Sim	Não	N/A	(VS)	
17	Os parafusos utilizados para fixação dos módulos fotovoltaicos, estão em bom estado e sem sinais de corrosão?	Sim	Não	N/A	(VS)	
18	Todos os módulos fotovoltaicos estão interligados e com conectores adequados?	Sim	Não	N/A	(VS)	
19	Em termos de existência, ou não, de sujidade (sujeira) nos módulos fotovoltaicos, qual sua avaliação segundo o nível de sujidade?  (Escala de 0 = Sem sujidade aparente, 1=Sujidade leve a 5=Sujidade severa)	(0) (1) (2) (3) (4) (5)		N/A	(VS)	
20	Os módulos fotovoltaicos estão sem trincas, fissuras ou manchas?	Sim	Não	N/A	(VS)	
21	Ausência de sombreamento, total ou parcial, sobre os painéis?	Sim	Não	N/A	(VS)	

## Inversor

Item	Verificação	Condição	Fonte	Observação
------	-------------	----------	-------	------------

<b>22</b>	Quantidade total de inversores (Caso haja mais de um modelo de inversor, descreva a quantidade total e também a quantidade específica para cada modelo no campo de observação)	unidades			(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>23</b>	Potência nominal (Saída - CA) do inversor	kW			(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>24</b>	Fabricante do inversor				(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>25</b>	Modelo do inversor				(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>26</b>	Potência total instalada CA	kW			Somatório item 23	
<b>27</b>	O inversor está bem fixado?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>29</b>	É possível acessar os dados de geração do inversor?	Sim	Não	N/A	(P) (VS)	

#### Usina em Geral/Outras Informações

Item	Verificação	Condição		Fonte	Observação
<b>41</b>	<p>Foi entregue a documentação mínima da usina pela empresa responsável pela instalação:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Projeto com a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART);</li> <li>- Memoriais de cálculo e descritivo;</li> <li>- Manuais de operação e manutenção.</li> </ul> <p>(Escala de 0 =nenhum, 1=Apenas um dos documentos foi entregue, 2=Apenas dois dos documentos mencionados foram entregues, 3=Todos os documentos mencionados foram entregues)</p>	(0) (1) (2) (3)	N/A	(P)	
<b>42</b>	Na caixa de medição da concessionária ou entrada de serviço, há etiqueta/placa de advertência de cuidados com a geração própria de energia elétrica?	Sim	Não	N/A	(VS) (P)

<b>43</b>	Qual a satisfação do proprietário com o sistema fotovoltaico? (Escala de 0 =nenhuma, 1=pouco a 5=muito)	(0) (1) (2) (3) (4) (5)		N/A	(P)	
<b>44</b>	Quais os benefícios apontados com o sistema fotovoltaico?	<b>Financeiro</b> <b>Ambiental</b> <b>Outros</b>		N/A	(P)	
<b>45</b>	O proprietário recebeu orientação de como acompanhar a geração da usina?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>46</b>	O proprietário acompanha a geração da usina constantemente?	<b>Diária</b> <b>Semanal</b> <b>Mensal</b> <b>Outros</b>		Não	(P)	
<b>47</b>	O proprietário foi instruído a realizar a limpeza dos painéis?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>48</b>	Qual foi a periodicidade de limpeza recomendada?	<b>Mensal</b> <b>Bimestral</b> <b>Semestral</b> <b>Anual</b>		N/A	(P)	
<b>49</b>	O sistema apresentou funcionamento contínuo sem falhas?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>55</b>	A garantia, período de cobertura, dos serviços e materiais/equipamentos foi apresentada e entregue ao proprietário?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>56</b>	O proprietário está satisfeito com a execução dos trabalhos e o pós-venda da empresa instaladora?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>57</b>	A produção de energia elétrica condiz com a expectativa apresentada pela empresa executora do projeto?	Sim	Não	N/A	(P)	

#### **Comentários Gerais**

<b>Item</b>	Demais percepções e comentários que achar necessário:
<b>59</b>	

### **1.3 Formulário de Laudo Técnico de Eficiência**

#### **Parte Técnico**

<b>Questionário de Auditoria - IDR</b>					
<b>Dados da Usina</b>					
<b>Proprietário:</b>					
<b>Telefone:</b>					
<b>Email:</b>					
<b>O que produz:</b>					
<b>Cidade:</b>					
<b>Endereço:</b>					
<b>Coordenadas geográficas (GPS)</b>			Latitude:		Longitude:
<b>Tipo de usina</b>	Solo ( )	Telhado/Cobertura ( )			
<b>Empresa Instaladora</b>					
<b>Data de instalação da usina</b> ____/____/20____					
<b>Data de início de operação</b> ____/____/20____					
<b>Dados do IDR</b>					
<b>Regional do IDR:</b>					
<b>Auditores/Extensionistas:</b>					
<b>Data da auditoria ou vistoria</b> ____/____/20____ Hora: : (Início) : (Fim)					
<b>Legenda</b>					
Fonte da informação - produtor (P), projeto elétrico (PJ), informação fornecida pelo IDR (IDR), observado durante a visita (VS)					
<b>Infraestrutura</b>					
Item	Verificação	Condição		Fonte	Observação
<b>01</b>	Os cabos ou conexões estão protegidos da exposição direta da luz solar?	Sim	Não	N/A	(VS)
<b>02</b>	Os eletrodutos visíveis estão em bom estado?	Sim	Não	N/A	(VS)
<b>03</b>	As electrocalhas/eletrodutos aparentam estar devidamente fixados?	Sim	Não	N/A	(VS)

<b>04</b>	A estrutura de fixação dos painéis apresenta aspecto plano (sem deformação)?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>05</b>	A estrutura metálica da usina está sem sinais visíveis de corrosão?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>06</b>	Foi desenvolvido o projeto das estruturas e/ou suportes metálicos ou há identificação do fabricante e catálogo da estrutura?	Sim	Não	N/A	(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>07</b>	Para usinas em coberturas/telhados foram realizados estudos da contribuição da carga do SFV nas estruturas existentes por profissional habilitado?	Sim	Não	N/A	(P) (PJ) (IDR) (VS)	

### Painéis Solares

**Módulos fotovoltaicos:** Unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica através de energia solar. Comercialmente também denominado como placas solares.

**Painéis solares:** Conjunto formado pela interligação dos módulos fotovoltaicos.

Item	Verificação	Condição			Fonte	Observação
<b>08</b>	Quantidade de módulos fotovoltaicos	unidades			(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>09</b>	Potência nominal do módulo fotovoltaico	Wp			(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>10</b>	Fabricante do módulo fotovoltaico				(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>11</b>	Modelo do módulo fotovoltaico				(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>12</b>	Potência total instalada CC	kWp			Produto dos itens (08*09)	
<b>13</b>	Para usinas de coberturas/telhados, os painéis se localizam na mesma águia do telhado?	Sim	Não	-	(P) (PJ) (IDR) (VS)	
<b>14</b>	Qual é o desvio azimutal dos painéis? (ângulo)	°		N/A	(PJ) (VS)	
<b>15</b>	Qual o ângulo de inclinação dos painéis? (ângulo)	°		N/A	(PJ) (VS)	
<b>16</b>	Todos os módulos fotovoltaicos estão devidamente fixados nas estruturas?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>17</b>	Os parafusos utilizados para fixação dos módulos fotovoltaicos, estão em bom estado e sem sinais de corrosão?	Sim	Não	N/A	(VS)	

<b>18</b>	Todos os módulos fotovoltaicos estão interligados e com conectores adequados?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>19</b>	Em termos de existência, ou não, de sujidade (sujeira) nos módulos fotovoltaicos, qual sua avaliação segundo o nível de sujidade?  (Escala de 0 = Sem sujidade aparente, 1=Sujidade leve a 5=Sujidade severa)	(0) (1) (2) (3) (4) (5)	N/A	(VS)		
<b>20</b>	Os módulos fotovoltaicos estão sem trincas, fissuras ou manchas?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>21</b>	Ausência de sombreamento, total ou parcial, sobre os painéis?	Sim	Não	N/A	(VS)	

#### Inversor

Item	Verificação	Condição	Fonte	Observação		
<b>22</b>	Quantidade total de inversores (Caso haja mais de um modelo de inversor, descreva a quantidade total e também a quantidade específica para cada modelo no campo de observação)	unidades	(P) (PJ) (IDR) (VS)			
<b>23</b>	Potência nominal (Saída - CA) do inversor	kW	(P) (PJ) (IDR) (VS)			
<b>24</b>	Fabricante do inversor		(P) (PJ) (IDR) (VS)			
<b>25</b>	Modelo do inversor		(P) (PJ) (IDR) (VS)			
<b>26</b>	Potência total instalada CA	kW		Somatório item 23		
<b>27</b>	O inversor está bem fixado?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>28</b>	Ausência de cabos soltos no inversor?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>29</b>	É possível acessar os dados de geração do inversor?	Sim	Não	N/A	(P) (VS)	

#### Proteções

Item	Verificação	Condição	Fonte	Observação		
<b>30</b>	Existe dispositivo de seccionamento geral da usina (CC), com as demais proteções, DPS e fusíveis (Caixa String box)?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>31</b>	Existe disjuntor geral da instalação (CA) logo após o inversor?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>32</b>	Há uma chave comutadora instalada no lado CC do inversor ou na caixa string box?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>33</b>	Foi identificado a conexão de aterramento do inversor (Parte CA)?	Sim	Não	N/A	(VS)	

<b>34</b>	Foi identificado a conexão de aterramento nas estruturas metálicas e módulos fotovoltaicos (Parte CC)?	Sim	Não	N/A	(VS)	
-----------	--	-----	-----	-----	------	--

#### Identificação e Etiquetagem

Item	Verificação	Condição		Fonte	Observação
<b>35</b>	Todos os circuitos, dispositivos de proteção, chaves e terminais estão devidamente identificados e etiquetados?	Sim	Não	N/A	(VS)
<b>36</b>	No quadro ou ponto de interconexão com a rede, logo após a conversão de energia CC/ CA pelo inversor, há etiquetas fixadas de advertência e cuidado com o risco de choque elétrico ou geração própria?	Sim	Não	N/A	(VS)
<b>37</b>	Os procedimentos de desligamento de emergência são exibidos no local?	Sim	Não	N/A	(VS)
<b>38</b>	Verifica-se que as etiquetas de identificação dos circuitos nos cabos estão devidamente fixadas e são duráveis?	Sim	Não	N/A	(VS)
<b>39</b>	Nos circuitos CC é possível identificar os sinais de polaridade (+ e -)? (Etiquetas e cores distintas)	Sim	Não	N/A	(VS)
<b>40</b>	Existe etiqueta de aviso nas caixas de junção C.C. informando que os arranjos fotovoltaicos permanecem energizados mesmo após seccionamento do inversor?	Sim	Não	N/A	(VS)

#### Usina em Geral/Outras Informações

Item	Verificação	Condição		Fonte	Observação
<b>41</b>	<p>Foi entregue ao proprietário a documentação mínima da usina pela empresa responsável pela instalação:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Projeto com a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART);</li> <li>- Memoriais de cálculo e descritivo;</li> <li>- Manuais de operação e manutenção.</li> </ul> <p>(Escala de 0 =nenhum, 1=Apenas um dos documentos foi entregue, 2=Apenas dois dos documentos mencionados foram entregues, 3=Todos os documentos mencionados foram entregues)</p>	(0) (1) (2) (3)	N/A	(P)	

<b>42</b>	Na caixa de medição da concessionária ou entrada de serviço, há etiqueta/placa de advertência de cuidados com a geração própria de energia elétrica?	Sim	Não	N/A	(VS) (P)	
<b>43</b>	Qual a satisfação do proprietário com o sistema fotovoltaico? (Escala de 0=nenhuma, 1=pouco a 5=muito)	(0) (1) (2) (3) (4) (5)		N/A	(P)	
<b>44</b>	Quais os benefícios apontados pelo proprietário com o sistema fotovoltaico?	Financeiro Ambiental Outros		N/A	(P)	
<b>45</b>	O proprietário recebeu orientação de como acompanhar a geração da usina?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>46</b>	O proprietário acompanha a geração da usina constantemente?	Diária Semanal Mensal Outras		Não	(P)	
<b>47</b>	O proprietário foi instruído a realizar a limpeza dos painéis?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>48</b>	Qual foi a periodicidade de limpeza recomendada?	Mensal Bimestral Semestral Anual		N/A	(P)	
<b>49</b>	O sistema apresentou funcionamento contínuo sem falhas?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>50</b>	A usina encontra-se livre de possíveis fontes de sujidade relevantes ao redor da usina? (plantações, indústrias, estradas de chão...)	Sim	Não	N/A	(VS) (P)	
<b>51</b>	Existe um diagrama unifilar visível da usina?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>52</b>	A potência CA do(s) inversor(es) do projeto coincide com a do(s) instalado(s)?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>53</b>	A potência CC dos módulos fotovoltaicos do projeto coincide com a potência CC instalada?	Sim	Não	N/A	(VS)	
<b>54</b>	O tipo de instalação, solo ou cobertura, condiz com o projetado?	Sim	Não	N/A	(VS)	

<b>55</b>	A garantia, período de cobertura, dos serviços e materiais/ equipamentos foi apresentada e entregue ao proprietário?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>56</b>	O proprietário está satisfeito com a execução dos trabalhos e o pós-venda da empresa instaladora?	Sim	Não	N/A	(P)	
<b>57</b>	A produção de energia elétrica condiz com a expectativa apresentada pela empresa executora do projeto?	Sim	Não	N/A	(P)	

#### Comentários Gerais

Item	Verificação	Condição	Fonte	Observação
<b>58</b>	Na sua percepção, o local de instalação da usina está nas condições ideais de geração (orientação dos painéis, inclinação dos painéis, ausência de sombreamento e sujidade)?  (Escala de 0 =nenhum, 1=Apenas um dos mencionados, 2=Apenas dois dos mencionados, 3=Apenas três dos mencionados, 4=Todos mencionados)	(0) (1) (2) (3) (4)	N/A	(VS)
<b>59</b>	Demais percepções e comentários que achar necessário:			



ISBN: 978-65-985485-7-5

CL



9 786598 548575