

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**NAERTE DA SILVA LIMA JUNIOR**

**PLANO DE EXECUÇÃO ELÉTRICO DE USINAS FOTOVOLTAICAS DE GRANDE  
PORTE**

Ilha Solteira  
2022

**NAERTE DA SILVA LIMA JUNIOR**

**PLANO DE EXECUÇÃO ELÉTRICO DE USINAS FOTOVOLTAICAS DE GRANDE  
PORTE**

Trabalho de Graduação apresentado à  
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –  
UNESP como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

**PROF. DR. CARLOS ANTÔNIO ALVES**  
Orientador

Ilha Solteira  
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L732p Lima Junior, Naerte da Silva.  
Plano de execução elétrica de usinas fotovoltaicas de grande porte / Naerte da Silva Lima Junior.-- Ilha Solteira: [s.n.], 2022  
49 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,  
2022

Orientador: Carlos Antônio Alves  
Inclui bibliografia

1. Energia fotovoltaica. 2. Usina solar . 3. Plano de execução

  
Raiane da Silva Santos

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos tres dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e dois, o discente *Naerte da Silva Lima Junior*, matriculada sob o nº 152055071, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves*, o *Doutorando. Lucas do Carmo Yamaguti* e a *Doutoranda. Mariana Costa Falcão*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Plano de Execução Elétrico de Usinas Fotovoltaicas de Grande Porte**", obtendo a nota 7,5 (sete virgula cinco) e conceito **APROVADO**.



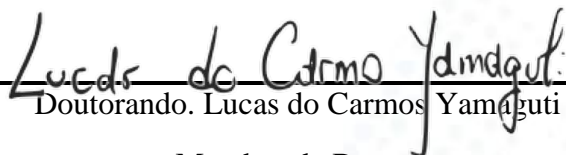
Prof. Dr. Carlos Antonio Alves

- Orientador -



Naerte da Silva Lima

- Discente -



Doutorando. Lucas do Carmos Yamaguti

- Membro da Banca -



Doutoranda. Mariana Costa Falcão

- Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria primeiramente de agradecer a minha família que em todos os momentos tiveram do meu lado, me dando total apoio e estrutura familiar durante todo o meu período de vida, sem eles nada disto estaria acontecendo, então agradeço imensamente, principalmente meu pai Naerte e minha mãe Zaina.

Agradeço também a todos os docentes dos Departamentos da UNESP de Ilha Solteira que tive o privilégio de aprender de forma honrosa todos os requisitos para se tornar um grande Engenheiro Eletricista, agradeço em especial meu orientador Prof. Dr. Carlos Alves por todo o suporte, ensinamento e por ter acreditado neste projeto que apresento para vocês.

Para finalizar, agradeço a todos os colaboradores da UNESP de Ilha Solteira em especial aos do Campus 3 que sempre deixaram toda a universidade limpa e agradável para que tivéssemos uma ótima qualidade de ensino, além, é claro, dos meus amigos e colegas de universidades que sempre me ajudaram neste percurso.

## RESUMO

A crise energética resultado da utilização das fontes convencionais é um problema que hoje atinge países no mundo inteiro. Visando amenizar este problema, apresenta-se como alternativa a geração de energia solar via sistema fotovoltaico de geração centralizada de grande porte, uma fonte renovável, uma grande alternativa para diminuir a emissão dos gases do efeito estufa no setor de geração de energia que hoje é o setor que mais emite gases do efeito estufa do Mundo. Realizou-se uma revisão literária para mostrar a importância desse setor na matriz elétrica brasileira nos próximos anos, além de detalhar-se um plano de execução de uma usina fotovoltaica de grande porte com os dados coletados de uma usina real. O objetivo geral do trabalho é verificar a importância dos testes durante a execução do projeto, os testes separados em dois grupos os *pre-comissioning* e os *testes onload comissioning* são fundamentais para a gestão e o funcionamento adequado da usina solar. Para tal, usou-se os seguintes objetivos específicos nos capítulos da análise: mostrar a energia fotovoltaica no Brasil e no mundo, seu contexto e importância; realizar uma análise técnica do plano de execução de uma usina fotovoltaica. Deste modo, foi concluído que a energia fotovoltaica é de suma importância para o Mundo e principalmente para o Brasil, uma vez que a tendência dos próximos anos é diminuir cada vez mais o uso de recursos fósseis o que abre espaço para o surgimento cada vez maior de novas fontes de energias renováveis.

**Palavras-chaves** : Sistema Fotovoltaico, energia solar, plano de execução, usina fotovoltaica, matriz energética brasileira.

## ABSTRACT

The energy crisis resulting from the use of conventional sources is a problem that today affects countries all over the world. In order to alleviate this problem, I present as an alternative the generation of solar energy via a large centralized photovoltaic generation system, a renewable source, a great alternative to minimize the emission of greenhouse gases in the energy generation sector that today is the sector that emits the most greenhouse gases in the world. A literary review was carried out to show the importance of this sector in the Brazilian electricity matrix in the coming years, in addition to detailing an execution plan for a large photovoltaic plant with data collected from a real plant. The general objective of the work is to verify the importance of the tests during the execution of the project, the tests separated into two groups the pre-commissioning and the onload commissioning tests are fundamental for the management and proper functioning of the solar plant. To this end, the following specific objectives were used in the chapters of the analysis: to show photovoltaic energy in Brazil and in the world, its context and importance; perform a technical analysis of the execution plan of a photovoltaic plant. In this way, it was concluded that photovoltaic energy is of paramount importance for the world and especially for Brazil, since the trend of the coming years is to increasingly decrease the use of fossil resources, which makes room for the increasing emergence of new renewable energy sources.

**Keywords:** Photovoltaic System, solar energy, execution plan, photovoltaic plant, Brazilian energy matrix.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões globais dos gases do efeito estufa por setor econômico.....	8
Figura 2 - Matriz Elétrica Mundial de 2018 .....	9
Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira 2020.....	10
Figura 4 - Bandeiras tarifárias na conta de luz .....	12
Figura 5 - Cenário do mercado da energia solar fotovoltaica total mundial no horizonte 2019-2024. ....	13
Figura 6 - Irradiação Mundial em 2013 .....	14
Figura 7 - Mapa da radiação solar incidente no território brasileiro. ....	15
Figura 8 - Empreendimentos Vencedores de Leilões.....	16
Figura 9 - Representação unifilar da <i>String</i> .....	20
Figura 10 - Caixa de Junção.....	21
Figura 11 - unifilar BJ1 .....	24
Figura 12 - unifilar BJ2 .....	24
Figura 13 - unifilar entre a BJ1 e a BJ2 .....	25
Figura 14 - Parte do unifilar entre o Inversor e a BJ2 .....	25
Figura 15 - As curvas I-V e P-V de um dispositivo fotovoltaico .....	30
Figura 16 - Fator de preenchimento .....	31
Figura 17 - perdas detectadas pelo teste de curva IxV .....	32
Figura 18 - Dimensionamento da curva I-V de uma célula fotovoltaica para um arranjo fotovoltaico. ....	33
Figura 19: Teste curva IxV.....	36
Figura 20 – Termogramas infravermelhos de uma caixa de junção.....	40
Figura 21 - Módulos em circuitos Aberto .....	41
Figura 22 - Módulo em curto circuito .....	41
Figura 23 - Módulo cristalino com o vidro quebrado .....	42
Figura 24 - Células do módulo em curto circuito .....	43
Figura 25 - Célula quebrada .....	43
Figura 26 - Painel sujo.....	44
Figura 27 - Teste termográfico em placa solares .....	45
Figura 28 - Teste termográfico em uma caixa de junção .....	46



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Investimentos em energias renováveis no Mundo - 2013 a 2017(Bilhões de US\$) .....	10
Tabela 2 - Os 5 principais países em potência instalada do mundo em 2019 .....	13
Tabela 3 - Teste de tensão em circuito aberto em cada <i>string</i> e o teste de polaridade na caixa de junção 1. ....	27
Tabela 4 - Teste de tensão em circuito aberto na caixa de junção 2.....	28
Tabela 5 - Teste de isolamento dos cabos DC entre a caixa de junção 1 e 2. ....	29
Tabela 6 - teste em carga da Caixa de junção nível 1 .....	38
Tabela 7 - Condições ambientais de inspeção .....	39

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 MATRIZ ELETRICA BRASILEIRA .....	10
1.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA NO MUNDO.....	12
1.3 ENERGIA FOTOVOLTAICA DO BRASIL .....	15
1.4 TIPOS DIFERENTES DE PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR .....	16
1.4.1 Energia Fotovoltaica Distribuída.....	17
1.4.2 Energia Fotovoltaica Centralizada.....	18
1.5 USINAS SOLARES .....	19
1.5.1 Componentes Principais .....	19
1.5.1.1 Módulo fotovoltaico.....	19
1.5.1.2. <i>Strings</i> (Módulos em série) .....	19
1.5.1.3 Caixas de Junção ou Combinação ( <i>Combiner Boxes</i> ) .....	20
1.5.1.4 Cabos de Baixa Tensão de Potência e Controle .....	22
1.5.1.5 Inversores .....	22
1.5.1.6 Estrutura de Suporte .....	22
<b>2 ANÁLISE TÉCNICA DO PLANO DE EXECUÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>23</b>
2.1 <i>PRE-COMMISSIONING TESTS</i> .....	26
2.1.1 Verificação da polaridade nas caixas de junções 1 e 2 .....	26
2.1.2 Testes de isolamento dos cabos entre a caixa de junção 1 e 2 por <i>Megger</i> 1000V.....	26
2.1.3 Medições de tensão de circuitos abertos Voc no nível do cabo string .....	26
2.1.4 Teste Curva I-V.....	29
2.2 <i>TESTE ONLOAD-COMMISSIONING</i> .....	37
2.2.1 Medição das correntes IMPP das <i>strings</i> em carga.....	37
2.2.2 Teste de Termografia (Câmera IR) .....	38
2.2.2.1. Anormalidades dos módulos fotovoltaicos.....	39
2.2.2.2 Anormalidades de outros componentes .....	39
<b>3 CONCLUSÃO</b> .....	<b>47</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

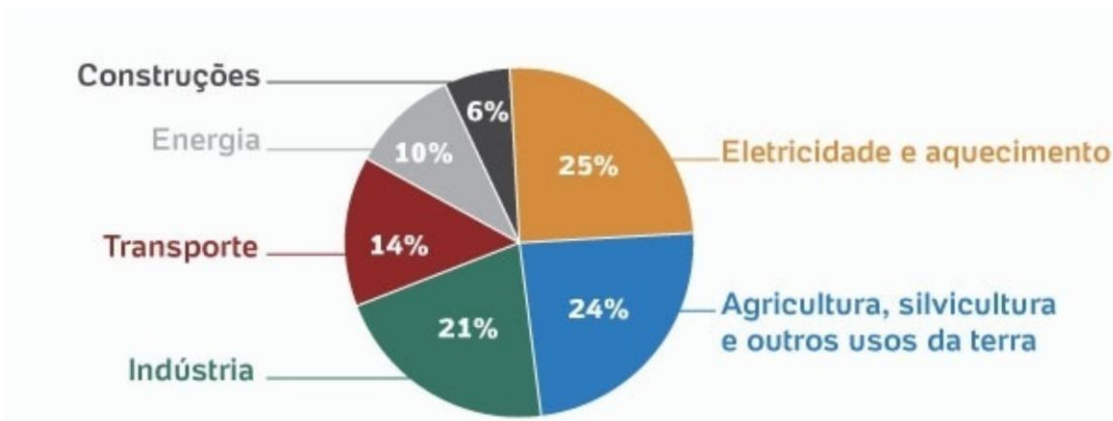
Uma das principais preocupações mundiais nos últimos tempos é com relação a questões ambientais, principalmente com o aumento da temperatura média nos últimos anos, causando várias transformações climáticas devido ao efeito estufa que é causado pela emissão descontrolada dos gases do efeito estufa desde a Primeira Revolução Industrial.

Com as mudanças climáticas e os fenômenos meteorológicos extremos cada vez mais frequentes, os cientistas e o Mundo tentam encontrar formas para conter ou diminuir essas mudanças, com isto, em 2015 durante a COP 21 (21ª Conferência das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas) foi assinado por mais de 195 países o famoso Acordo de Paris, possuindo como prioridade reduzir o aquecimento global para conseguir manter o aumento médio da temperatura da Terra em 1,5°C por ano.

Para atingir a meta, é necessário ter mudanças em vários setores, um dos exemplos mais impressionantes é o da União Europeia que projeta a redução de 55% dos gases do efeito estufa até 2030 em comparação com os gases emitidos em 1990 e para isto, a União Europeia defende o fim da comercialização de carros a gasolina a partir de 2035 e incentivam com altos investimentos o surgimento de tecnologias para carros elétricos (ELPAIS, 2021).

Mas, o setor de transporte, em se tratando de emissões de gases do efeito estufa, não é o maior emissor, e sim, trata-se do setor de eletricidade e aquecimento responsável por 25% da emissão dos gases como pode ser visto na Figura 1.

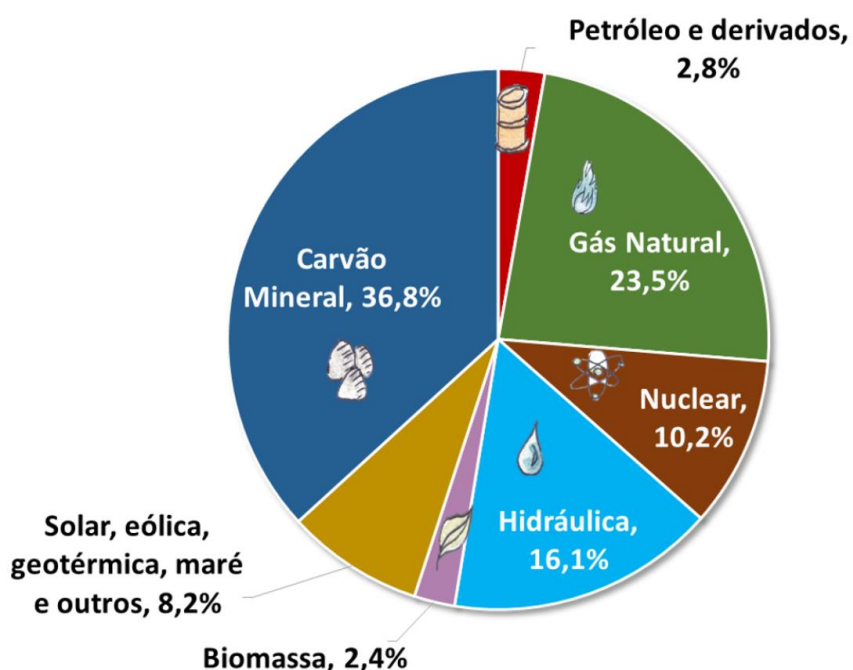
Figura 1 - Emissões globais dos gases do efeito estufa por setor econômico.



Fonte: IPCC (2014)

Isto ocorre pelo fato que em pleno o século XXI o mundo ainda utiliza de recursos fósseis como fonte de energia para a produção de eletricidade, como é o caso do petróleo, carvão mineral e gás natural, utilizados em termelétricas na produção de energia como pode-se notar na Figura 2.

Figura 2 - Matriz Elétrica Mundial de 2018



Fonte: EPE, 2021

Mas a matriz elétrica mundial tende a sofrer mudanças nos próximos anos, já que o mundo investe pesado em novas tecnologias para fontes de energia renováveis como mostra a Tabela 1, tendo como destaque principal na energia solar que é responsável por mais de 50% do investimento no período destacado.

Tabela 1 - Investimentos em energias renováveis no Mundo - 2013 a 2017 (Bilhões de US\$)

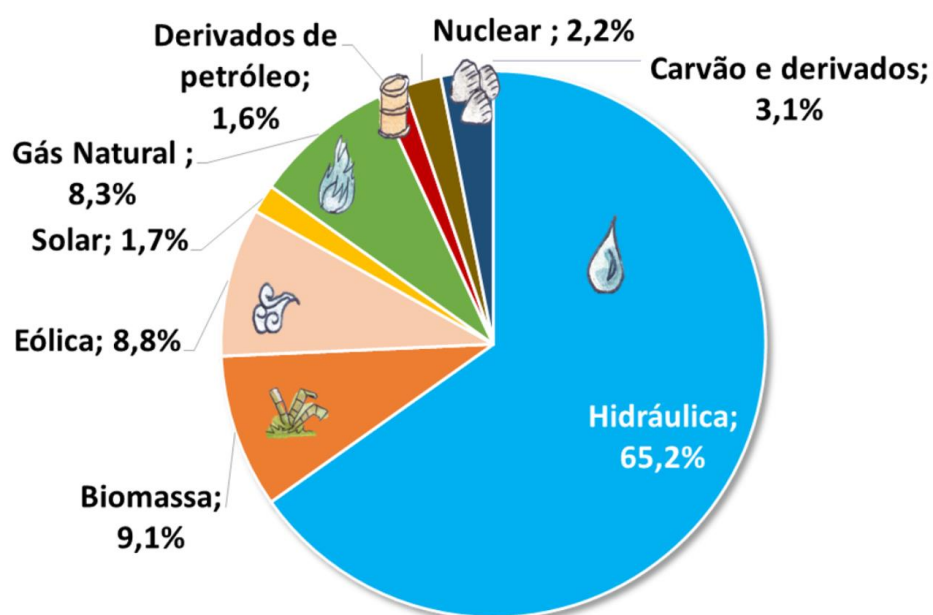
Investimentos por tecnologia	2013	2014	2015	2016	2017	% de Participação 2013-2017
Solar	119,9	145,3	179,3	136,5	160,8	53,15%
Eólica	86,4	110,7	124,7	121,6	107,2	39,45%
Biomassa e transformação de lixo em energia	14,0	12,7	9,4	7,3	4,7	3,45%
Hidro <50 MW	5,8	7,0	3,6	3,9	3,4	1,70%
Biocombustíveis	5,2	5,2	3,5	2,1	2,1	1,30%
Geotérmica	2,8	2,9	2,5	2,5	1,6	0,88%
Maremotriz	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,08%
<b>Total de novos investimentos</b>	<b>234</b>	<b>284</b>	<b>323</b>	<b>274</b>	<b>280</b>	<b>1.396</b>

Fonte: APPIFRMEB, 2019

### 1.1 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A matriz elétrica brasileira é referência mundialmente, mais de 75% da matriz elétrica brasileira é renovável, ao contrário da matriz mundial que é apenas 26%. O Brasil tem a matriz mais renovável do Mundo graças às suas fontes hidráulicas que correspondem a mais de 65% de toda a matriz como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira 2020



Fonte: EPE, 2021

Apesar de referência, o Brasil preocupa-se cada vez mais, principalmente pelo fato de sua principal fonte de energia está sofrendo crises nos últimos anos. Com as crises hídricas causadas pelo aquecimento global e o desmatamento da floresta Amazônica, o potencial hidráulico brasileiro com o passar do tempo vem diminuindo.

Segundo relatórios do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), enquanto a participação das hidrelétricas recuou de 81,8% para 65% de 2011 a 2015, a produção das térmicas convencionais e a gás natural passou de 8,4% para 23%, no mesmo período, alcançando índices históricos (GUARNIERI, 2017).

Em 2021, a participação das hidrelétricas continua em 65%, no entanto, houve uma queda da participação da produção das térmicas convencionais e gás natural para 13%, uma queda de 10%, se comparado com 2015, proveniente da expansão dos setores como: eólica, que em 2015 representava 3,5% da matriz e hoje representa 8,8%; o surgimento do setor solar, que em 2014 representava praticamente 0% e hoje representa 1,7% da Matriz elétrica nacional.

Hoje o aproveitamento do potencial hidrelétrico remanescente é cada vez mais complexo e menor é a possibilidade de construção de reservatórios capazes de aumentar a regularização do sistema. Apesar da tendência de aumento da participação de outras fontes renováveis na matriz, como a eólica e a solar, em razão do seu caráter mais ecológico, o aumento da geração térmica torna-se necessário para garantir a segurança do sistema. Com isso, mostra-se uma clara tendência de queda da participação da fonte hídrica na matriz brasileira e um aumento de geração térmica convencional (Óleo Diesel, gás natural e carvão) (GUARNIERI, 2017).

O aumento de geração térmica convencional reflete-se no consumidor na chamada tarifa tributária que resultou em um aumento de 17% em 2014 (DIEESE, 2015). Já no caso das bandeiras tarifárias, as quais eram transferidas uma vez por ano, passou a ser mensal em 2015 numa perspectiva de que esta sinalização pudesse nortear um consumo mais prudente, de acordo com a variação do preço da geração (GUARNIERI, 2017)

A Figura 4 mostra-se a atualização da bandeira tarifária de 2021 que em partes é uma forma de cobrir a utilização das térmicas convencionais, uma fonte de energia elétrica de maior valor.

Figura 4 - Bandeiras tarifárias na conta de luz



**Fonte:** G1. Globo (2021)

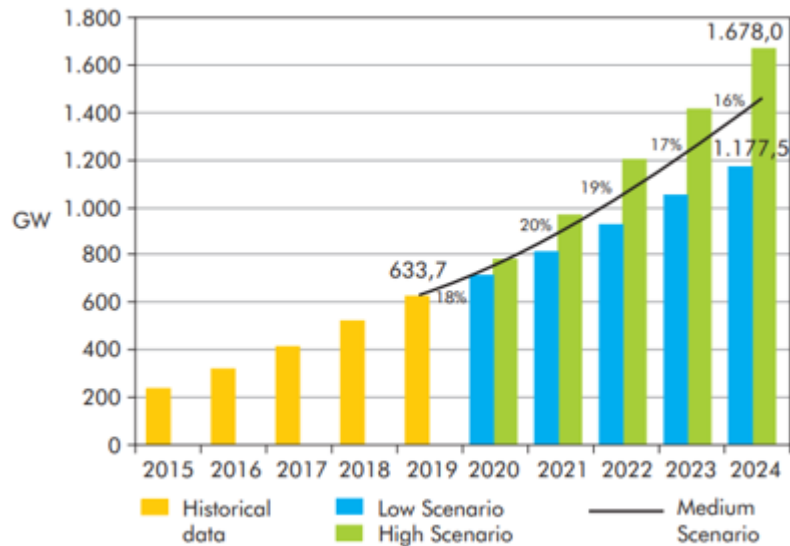
Segundo relatórios do estudo realizado pela Bloomberg New Energy Finance (BNEF) - New Energy Outlook (NEO), a participação hidráulica na matriz elétrica em 2050 diminuirá para 30%, desta forma, a procura por novas fontes renováveis no Brasil vem sendo cada vez mais levado em pauta, já que nossa principal fonte de energia vai deixar uma lacuna nos próximos anos.

E essas fontes são principalmente, energia eólica e energia solar, juntas representam 10,5% da nossa matriz atual, mas em 2050 representarão quase 50% (BNEF, 2019).

### 1.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA NO MUNDO

O mercado crescente de energias renováveis, principalmente a fotovoltaica, começa a se desenhar a partir do momento em que estabeleceu o Protocolo de Kyoto, fixando metas de redução do GEE (Gases do Efeito Estufa) para os países industrializados, entre eles os Estados Unidos e a Europa, em 11 de dezembro de 1997. No entanto, até os anos de 2006, a capacidade global de gerar energia elétrica a partir deste sistema se manteve bastante reduzida. A partir de 2008, o processo sofreu uma rápida aceleração que se intensificou a partir do Acordo de Paris, em 2015. Desde então, a cada ano que passa a média de potência instalada aumenta gradativamente, como mostra a Figura 5 (ENGEMA, 2017).

Figura 5 - Cenário do mercado da energia solar fotovoltaica total mundial no horizonte 2019-2024.



Fonte: Solar Power Europe (2020)

Os países que se destacam na produção de energia elétrica através a energia solar são os responsáveis por manter os maiores investimentos nessa tecnologia como é o caso da China, apesar de ser o maior país emissor de gases do efeito estufa, tem como objetivo zerar a emissão desses gases até 2060 (CARDOSO, 2019).

Segundo o relatório *Renewables 2020* da IEA, além da China, existem outros 4 países em destaque na quantidade de potência instalada que são os Estados Unidos, Japão, Alemanha e Índia, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Os 5 principais países em potência instalada do mundo em 2019

1	China	205 GW
2	Estados Unidos	76 GW
3	Japão	63,2 GW
4	Alemanha	49,2 GW
5	India	38 GW

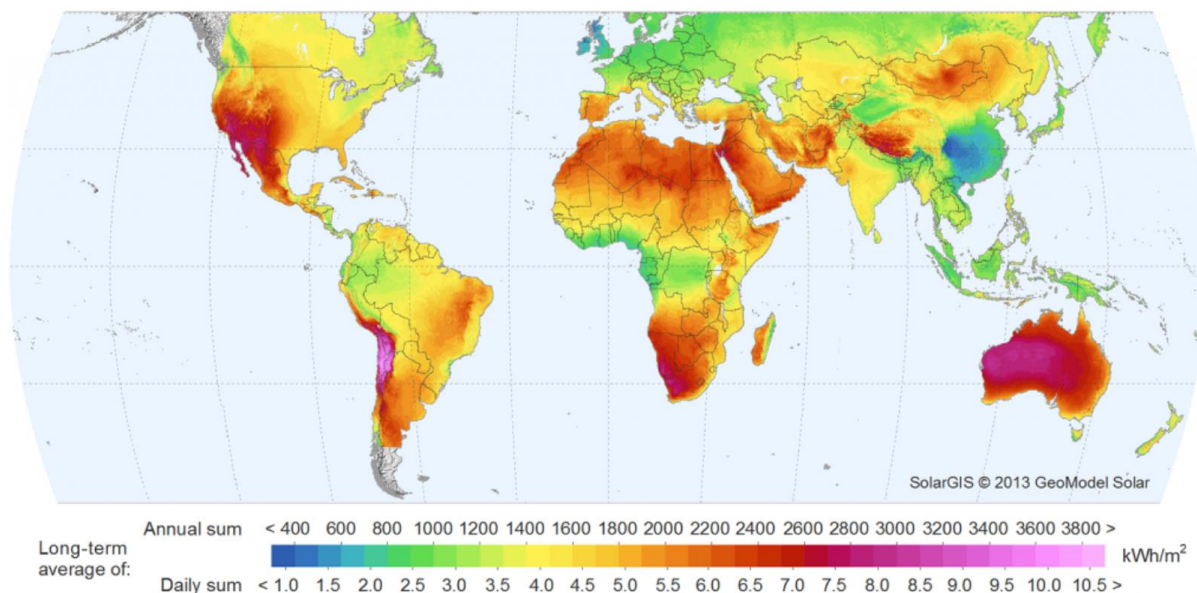
Fonte: Adaptada do IEA (2020)

O Japão, por exemplo, intensificou o investimento em energia solar após o desastre nuclear de Fukushima em 2011 que fez com que o país reduzisse a participação da energia nuclear na sua matriz energética; outro país que após vários desastres nucleares reduziu drasticamente a participação da energia nuclear em sua matriz foi a Alemanha, em reflexo disso, investiu pesado em energia solar e hoje é o maior produtor na Europa (CARDOSO, 2019).



Um dos fatores que torna a energia fotovoltaica uma grande fonte de energia renovável é o fato de ela ser uma fonte inesgotável na vida humana e chega-se a ter um potencial energético quase que o dobro da energia proveniente de forma hídrica. Além disso, é uma fonte possível de ser desenvolvida nos 5 continentes como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Irradiação Mundial em 2013



**Fonte:** EcoBrasil Energy (2018)

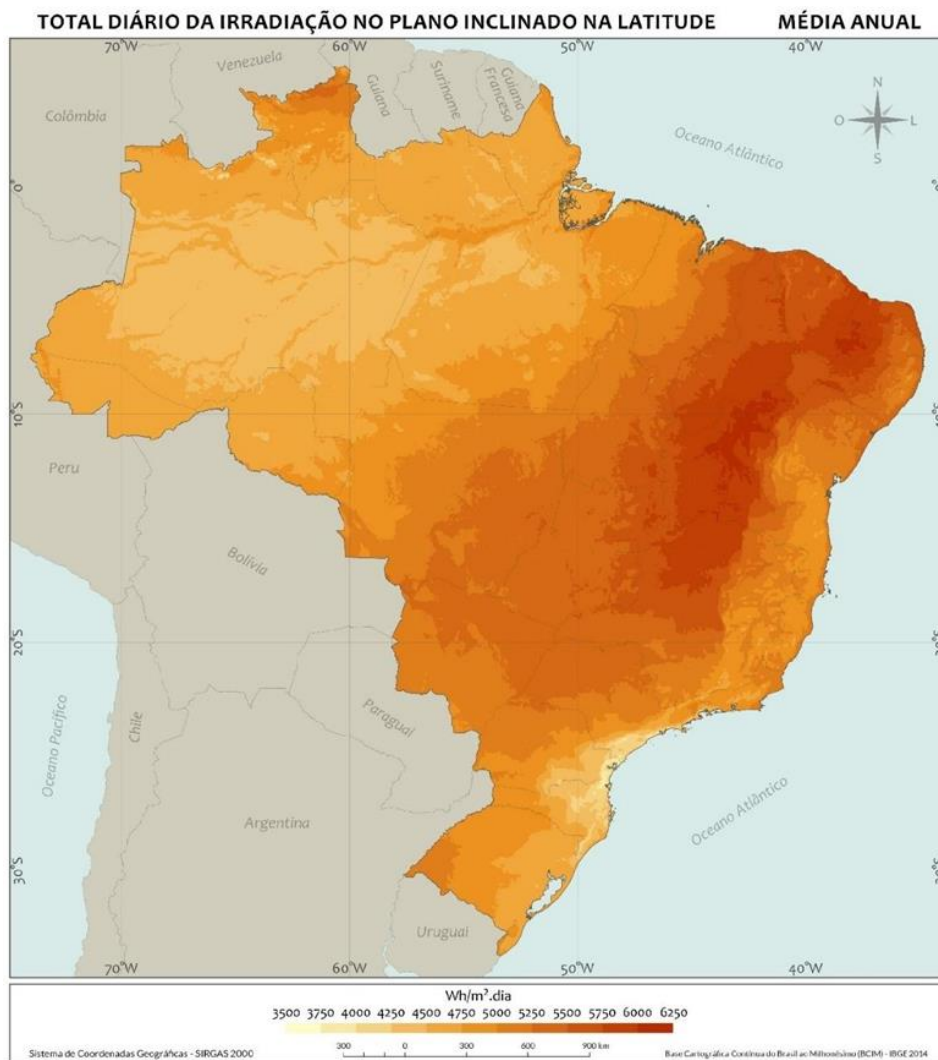
Observa-se que, a irradiação não é linear, existem países que possuem um maior potencial se comparados com outros, mais isto não impede o país de se tornar referência em energia fotovoltaica, como é o caso da Alemanha que recebe em média uma radiação de 3 kWh/m<sup>2</sup>, uma radiação baixa se comparados com os países do hemisfério Sul.

Segundo a quinta edição do Statkraft Baixas Emissões - Cenário 2020 (*Statkraft's Low Emissions Scenario*) a energia solar será a maior fonte de energia no Mundo em 2035, superando a eólica e hidrelétrica com um crescimento médio de 12% ao ano, chegando em 2050, com uma capacidade de energia 3X maior que a atual e com 80% da Matriz elétrica renovável. Estes 80%, 40% são provenientes da Energia Solar, o que mostra o grande potencial de crescimento no setor (STATKRAFT, 2019).

## 1.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA DO BRASIL

O Brasil é o segundo maior país que recebe irradiação solar no Mundo, perde apenas para a Austrália, além disso, mantém-se o alto nível de radiação em todo o seu território, como mostra a Figura 7. Este fato, comprova que o país tem imenso potencial fotovoltaico e isto pode ser provado realizando-se uma simples comparação com a Alemanha, que hoje é a 4 país com maior capacidade instalada no mundo e a área de maior incidência de radiação chega a 1300 kWh/m<sup>2</sup>, já a região de menor incidência de radiação no Brasil chega a 1642 kWh/m<sup>2</sup>. Logo, isto só mostra o tamanho do potencial da energia solar no Brasil e o quanto existe uma tendência de ela ser desenvolvida nos próximos anos (CABRAL, 2013).

Figura 7 - Mapa da radiação solar incidente no território brasileiro.



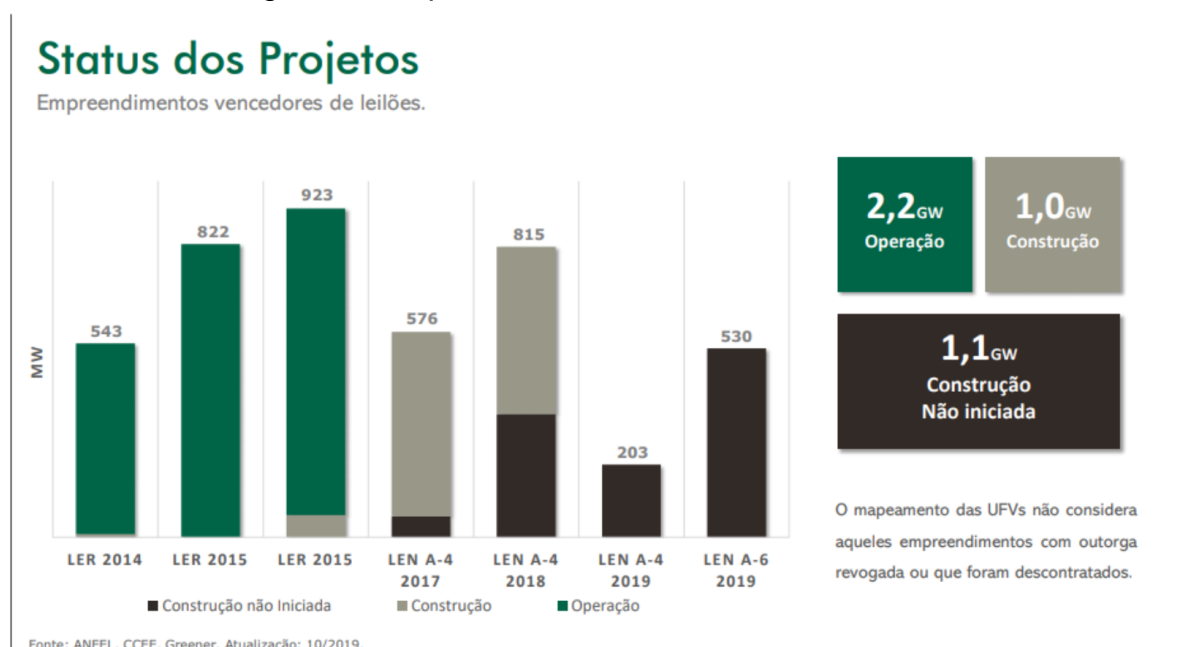
**Fonte:** ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (2017)

Os leilões de energia no Brasil realizados pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) regularizada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) tem como objetivo tornar eficiente as negociações entre as empresas distribuidoras e as empresas geradoras de energia, estabelecendo o critério de comprar a menor tarifa pelo megawatt-hora (MWh), ou seja, ganhando o lote de energia comercializado com menor custo (BLUESOL, 2019).

Desde 2014 a energia fotovoltaica participa desses leilões e vem conseguindo grandes resultados já que é uma energia solar barata de se produzir. Segundo ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) os brasileiros poderiam ter economizado R\$ 2 bilhões em contas de luz de 2013 e 2017 se as usinas solares estivessem em operação.

Segundo o estudo realizado pela empresa de pesquisa Grenner, existem 2,1 GW de projetos solares já contratados em leilões em construção ou com obras não iniciadas como mostra a Figura 8 (BLUESOL, 2019).

Figura 8 - Empreendimentos Vencedores de Leilões



**Fonte:** BLUESOL (2019)

A projeção é que até 2029 cerca de 15 GW de capacidade fotovoltaica seja contratada nos leilões, o que mostra o mercado otimista com o setor solar.

### 1.3 TIPOS DIFERENTES DE PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR

Existem 3 tipos de sistemas para a geração de energia fotovoltaica, são elas: geração centralizada, geração com sistema distribuído *on-grid* e com sistema isolado *off-grid*.

A Geração centralizada caracteriza-se por grandes usinas fotovoltaica que geralmente são afastadas dos pontos de consumo e necessitam das linhas de grandes transmissão e distribuição para chegar até o consumidor. Existe também o sistema fotovoltaico distribuído *on-grid* que são pequenas usinas instaladas no ponto de consumo, são comuns em residências e em pequenas empresas, atualmente, muito comum no Brasil. Neste sistema o proprietário pode produzir a sua própria energia e o seu excedente se tornam créditos que podem ser abatidos em suas faturas mensais (PEREIRA, 2019).

Além disso, existe o sistema isolado *off-grid*, neste sistema o proprietário produz a sua própria energia e o excedente é armazenado em baterias e são totalmente desligados das redes. Este sistema é comum em lugares remotos de difícil acesso, onde provavelmente não existe nenhuma rede de energia por perto. (PEREIRA, 2019)

#### **1.4.1 Energia Fotovoltaica Distribuída**

A Agência Internacional de Energia (IEA), define geração distribuída como produção de energia localizada que fica próxima à unidade de consumo, independentemente do tamanho ou da fonte geradora, seja ela células fósseis, eólica ou fotovoltaica (PEREIRA, 2019).

Existe dois tipos de operações relacionadas à geração distribuída: *off-grid* e *on-grid*. Os sistemas *off-grid* são sistemas isolados e autônomos de geração de energia solar que usam baterias conectadas e servem como dispositivos de armazenamento de energia. Além disso, no sistema *off-grid* não há ligação o direta com a rede concessionária ou cooperativas energéticas. Dessa forma, ao faltar energia, o abastecimento passa a ser feito pelas reservas que ficam armazenadas no banco de baterias (PEREIRA, 2019).

Já o sistema *on-grid*, é conectado à rede elétrica. Neste sistema, o inversor solar além de exercer a função de converter a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), tem a função também de sincronizar o sistema com a rede pública.

Neste caso, sempre que houver excedente de energia produzida pelo sistema *on-grid* ele será enviado à rede convencional de distribuição. No Brasil, o consumidor economiza na conta e paga somente as taxas obrigatórias definidas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Além disso, caso a energia gerada não seja suficiente, a rede elétrica irá compensar o que falta ao consumidor que deverá pagar a distribuidora de energia posteriormente (PEREIRA, 2019).

Com o sistema *on-grid* o consumidor consegue economizar até 95% nas contas de energia elétrica. Os créditos adquiridos na geração de energia podem ser usados por outras unidades consumidoras, desde que esteja cadastrada com o mesmo CPF do titular e que faça parte da mesma concessionária ou cooperativa de energia, e estes créditos podem ser utilizados em um prazo de 2 anos (PEREIRA, 2019).

#### **1.4.2 Energia Fotovoltaica Centralizada**

Uma estação de energia fotovoltaica é também conhecida como parque solar ou usina de energia solar, sendo um sistema fotovoltaico de grande porte projetado para a geração e fornecimento de energia fotovoltaica para a rede elétrica.

A maioria das usinas solares centralizadas são sistemas fotovoltaicos montados no solo, mas também existem sistemas montados em cima de lagos e rios. Outra inovação que vem sendo implementada na geração centralizada é a geração de energia híbrida, quando a usina de energia fotovoltaica é instalada próximo ou anexas a outras usinas seja ela eólica, hídrica ou outra fonte não renovável como termoelétrica (PEREIRA, 2019).

Como no caso da geração distribuída, as usinas de geração de energia fotovoltaica precisam de equipamentos de conversão de eletricidade, pois os módulos fotovoltaicos produzem energia de corrente contínua (CC) que precisam ser convertidos em corrente alternada (CA), forma essa de transmissão pela rede elétrica (PEREIRA, 2019).

Para a construção de uma usina é necessária uma área de terra substancial. Dessa forma é preciso que a área esteja sujeita à aprovação do planejamento pelos órgãos ambientais. Durante a construção do projeto são feitos vários estudos como: sociais, locais e principalmente ambientais, para garantir que a construção e operação das usinas estejam de acordo com as leis e normas de segurança (PEREIRA, 2019)

Durante o planejamento de construção de um sistema de geração de energia centralizada é preciso também levar em consideração o potencial de geração, a localização e principalmente a capacidade de transmissão e conexão com a rede. A falta de um planejamento adequado pode acarretar sérios prejuízos para o empreendimento (PEREIRA, 2019).

O desempenho financeiro de um sistema centralizado de energia fotovoltaica estará relacionado a vários fatores, dentre eles a radiação solar e o desempenho de produção. (PEREIRA, 2019)

## 1.4 USINAS SOLARES

A maior usina solar do Mundo em operação atualmente é a usina chamada Bhadla Solar Park localizada na Índia com uma potência instalada de 2.255MW, já no Brasil a maior usina fotovoltaica é localizada no Piauí em São Gonçalo do Gurguéia com uma potência instalada de 475 MW.

### 1.5.1 Componentes Principais

#### 1.4.1.1 Módulo fotovoltaico

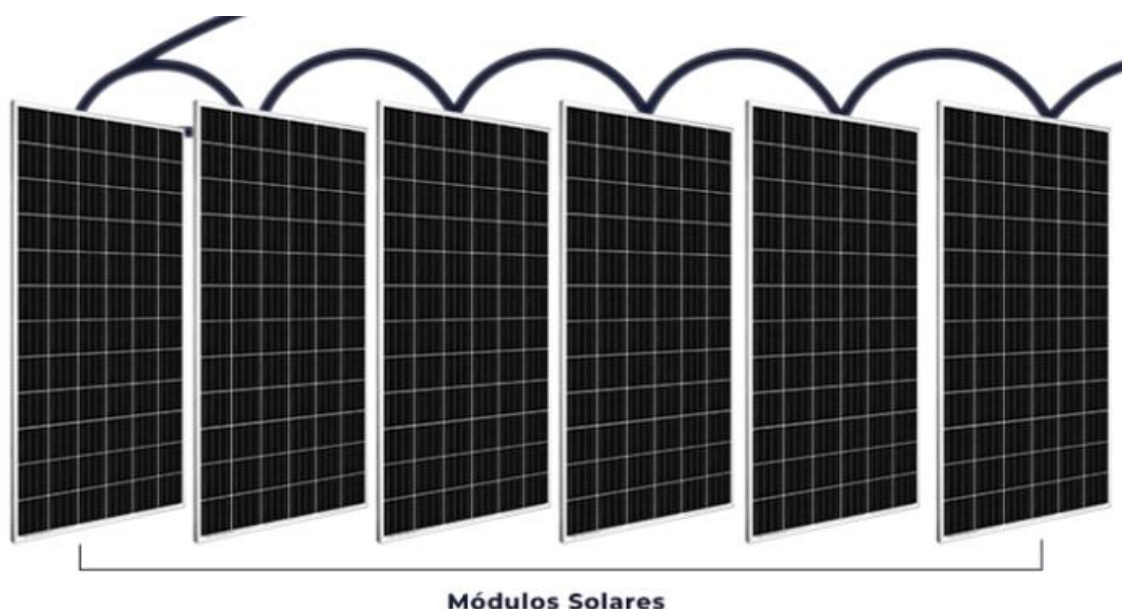
O componente principal do sistema é o módulo fotovoltaico, que constitui a unidade produtiva do sistema que é o local onde ocorre a conversão direta da luz solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, com sua capacidade nominal definida a partir da potência que o equipamento pode fornecer em condições padrão de teste (irradiância de 1.000 W/m<sup>2</sup>, massa de ar de 1,5, temperatura de 25°C na junção p-n da célula fotovoltaica), sendo expressa em Wp (Watt-pico). O principal material hoje utilizado na fabricação dos módulos é o silício que ainda sofre com um dos principais problemas dos módulos fotovoltaicos atualmente, a baixa eficiência de conversão, as células de silícios monocristalinos em laboratório chegaram a uma eficiência de 26,7% e a de multicristalino de 21,9% (GUARNIERI, 2017)

### 1.5.1.2. *Strings* (Módulos em série)

O conjunto formado pela união em série de certo número de módulos é chamada de *string* (série fotovoltaica). Os módulos são conectados eletricamente em série de forma a somar a tensão exigida pelo projeto e pelo inversor a ser utilizado, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Representação unifilar da *String*



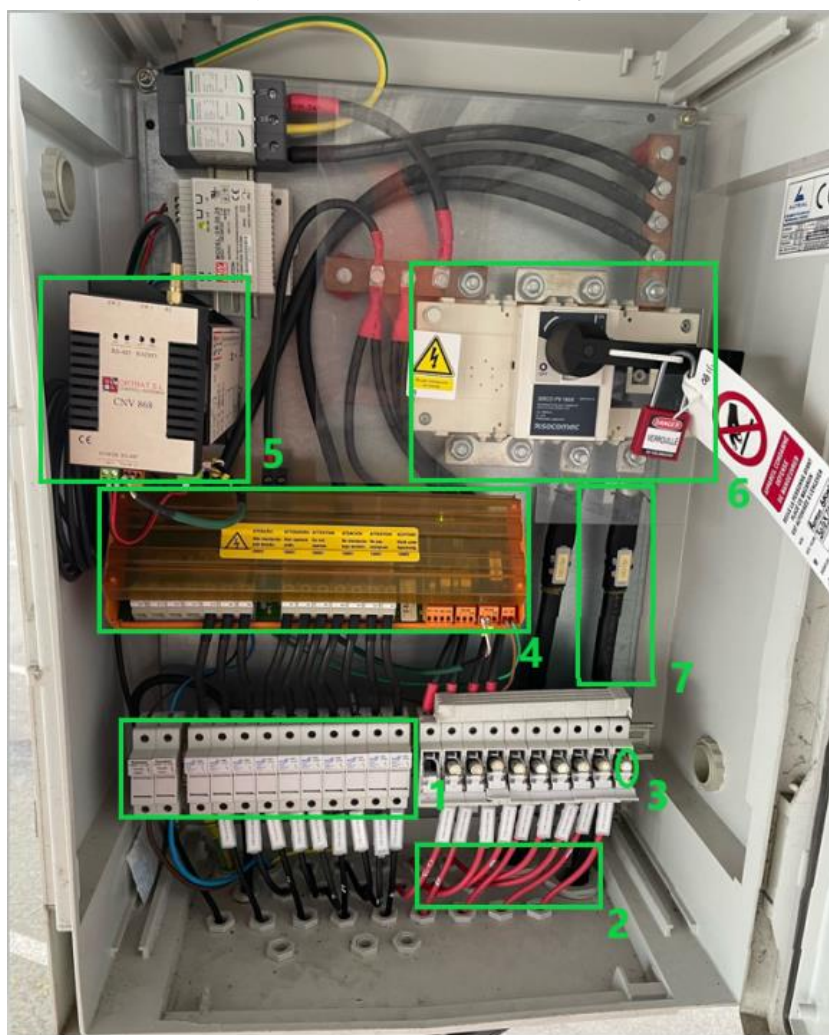
**Fonte:** Elaborado pelo Autor

Na Figura 9 nota-se dentro do retângulo vermelho 20 retângulos pretos conectados por uma linha verde, os retângulos pretos representam os módulos fotovoltaicos, a linha verde a conexão entre eles em série, e o retângulo vermelho é a representação de uma *string*.

### 1.5.1.3 Caixas de Junção ou Combinação (*Combiner Boxes*)

São caixas responsáveis por conter os circuitos de proteção das *strings*, além de utilizadas para ligar as séries de *strings* em paralelos nas grandes usinas fotovoltaicas. São importantíssimas para a facilidade na manutenção das usinas pois são utilizados vários componentes de proteção como: fusíveis e chave seccionadora e dispositivos de monitoramento, como mostra a figura 10.

Figura 10 - Caixa de Junção



**Fonte:** Realizada pelo Autor (2021)

Na Figura 10, o número 1, representa 12 porta-fusíveis, eles são responsáveis por facilitar a abertura do circuito para a realização da manutenção do sistema, no número 2, representa os cabos negativos que saem de cada *string*, neste caso são 9 cabos que representa 9 *strings* conectadas nesta caixa de junção, já o número 3 mostra a porta fusível aberto e dentro dele, um fusível em formato de cilindro. O número 4 é um sistema de controle e monitoramento do sistema, por este dispositivo é possível identificar a medição da corrente em tempo real de cada *string*, já o número 5 é o sistema de comunicação entre a caixa de junção até a central de monitoramento, que neste caso é feito por rádio frequência. O número 6 mostra a chave seccionadora desta Caixa de Junção e para finalizar o número 7 representa o cabo de saída da Caixa de junção já com as *strings* conectadas em paralelo.



#### **1.5.1.4 Cabos de Baixa Tensão de Potência e Controle**

Os cabos das séries fotovoltaicas são normalmente instalados através da estrutura de suporte dos módulos por meio de calhas metálicas. Eles devem possuir isolamento compatível com o nível de tensão do circuito, ser resistentes à radiação UV e ter garantia de durabilidade adequada. Após as caixas de junção, os cabos apresentam bitolas mais significativas e são normalmente protegidos por eletrodutos e instalações através de valas até os inversores. Circuitos de comunicação e força têm instalações distintas, assegurando distância apropriada para evitar possibilidade de interferências (>30 cm) (GUARNIERI, 2017).

#### **1.5.1.5 Inversores**

O inversor é o equipamento eletrônico que converte a energia gerada pelos módulos em corrente contínua (c.c.) para corrente alternada (c.a.). A energia elétrica é entregue aos consumidores em corrente alternada e dessa forma, torna-se necessário essa conversão por meio destes conversores c.c.-c.a., cuja capacidade é expressa em W (Watt) (GUARNIERI, 2017).

#### **1.5.1.6 Estrutura de Suporte**

As estruturas de suporte dos módulos fotovoltaicos são predominantemente metálicas, compostas por aço, alumínio, ou até madeira, com proteção galvânica. Elas devem ser resistentes às condições ambientais, pois estão sujeitas aos efeitos de degradação e por estarem em contato com os módulos devem apresentar durabilidade compatível, sendo comum encontrar fornecedores apresentando garantias de até 20 anos.

As estruturas são dimensionadas considerando as características mecânicas dos módulos e as ações permanentes (peso próprio) e variáveis (cargas de vento). Elas são projetadas para que permitam adequada fixação dos módulos e garantam sua integridade, não permitindo deformações que afetem os módulos (GUARNIERI, 2017).

## 2 ANÁLISE TÉCNICA DO PLANO DE EXECUÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

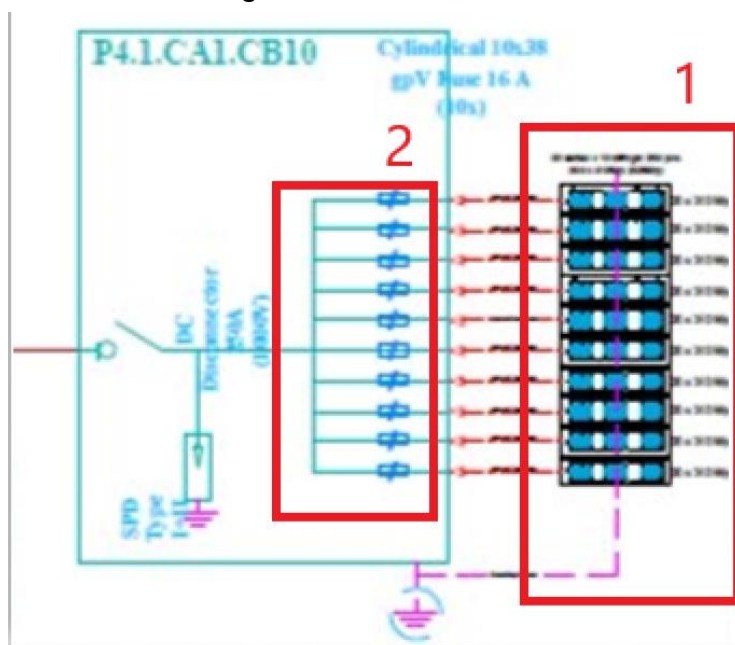
O trabalho aborda a parte da análise técnica no plano de execução de uma usina fotovoltaica, todos os testes desde a instalação dos módulos na estrutura até a conexão da usina fotovoltaica na rede de distribuição.

Estes testes são fundamentais para identificar erros na construção da usina que podem acarretar, caso não identificados, em baixa performance na produção de energia da usina ou até mesmo em uma grande explosão que danificaria a rede de distribuição além de poder causar acidentes fatais, logo estes testes são essenciais em um plano de execução, sem eles em hipótese alguma pode-se conectar uma usina em uma rede de distribuição de energia.

Os dados apresentados foram coletados de uma usina fotovoltaica na sua execução no início de 2021 na cidade de Douai, na França. A usina fotovoltaica em questão, tem uma potência de 12MW, foram utilizados mais de 38 mil painéis em *strings* de 20 módulos fotovoltaicos.

Neste projeto, cada *string* é conectada em paralelo primeiramente em uma caixa de junção 1 que é chamado de “*Junction Box 1*” ou “BJ1”. Cada BJ1 tem um total de *string* que varia de 5 a 14. Estas BJ1 são conectadas a uma segundo quadro de distribuição que é chamado de “*Junction Box 2*” ou “BJ2” que contém de 9 a 11 BJ1. Estas BJ2 são conectadas ao inversor DC/AC que é conectado a um transformador e este transformador é conectada à rede de energia. Na Figura 11 mostra-se o esquema unifilar da BJ1.

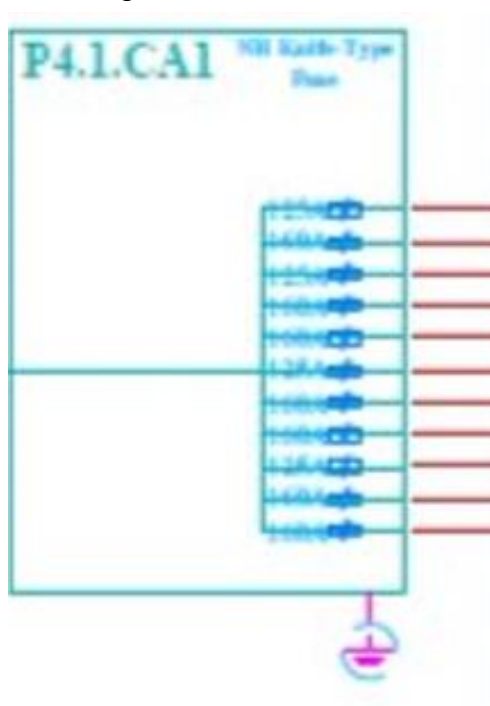
Figura 11 - Unifilar BJ1



**Fonte:** Autor (2021)

Na Figura 11 é possível observar no ponto em destaque 1 a representação das *strings*, já no ponto 2 observa-se o arranjo em paralelo das *strings* apresentadas no ponto 1. Pode-se notar na Figura 12 o esquema unifilar da BJ2.

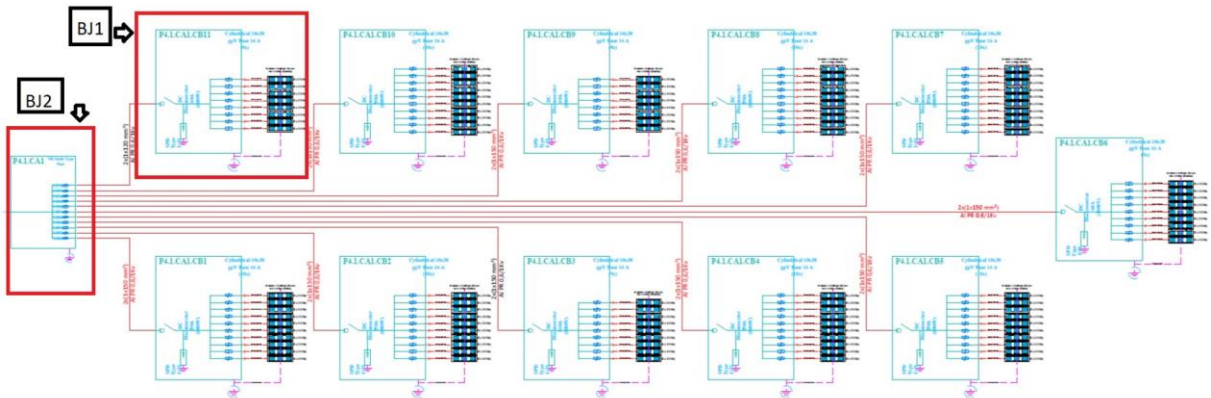
Figura 12 - Unifilar BJ2



**Fonte:** Autor (2021)

Na Figura 12 mostra o esquema unifilar da BJ2 e é uma continuação da BJ1 como observa-se na Figura 13.

Figura 13 - Unifilar entre a BJ1 e a BJ2



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 13 mostra a conexão entre as *strings* e a BJ1 juntamente com a conexão da BJ1 com a BJ2, já na Figura 14, observa-se a conexão entre a BJ2 e o inversor.

Figura 14 - Parte do unifilar entre o Inversor e a BJ2



Fonte: Autor (2021)

## **2.1 PRE-COMMISSIONING TESTS**

O teste *pre-comissioning* ou teste sem carga, é basicamente uma série de testes e verificações a serem realizados após a conclusão mecânica e antes da energização do parque fotovoltaico, ou seja, antes de ligar a usina fotovoltaica na rede de transmissão de energia.

### **2.1.1 Verificação da polaridade nas caixas de junções 1 e 2**

A polaridade e a cor diferente dos cabos devem ser revisadas, garantindo uma instalação de acordo com projeto.

Basicamente, esta verificação tem com o intuito detectar se a estação dos cabos positivos e negativos vindo das *strings* estão conectados ao barramento certo, o que pode evitar um possível curto circuito.

### **2.1.2 Testes de isolamento dos cabos entre a caixa de junção 1 e 2 por Megger 1000V**

Para a isolação dos cabos DC entre as caixas de junção, o valor da resistência não deve ser inferior a 5 M $\Omega$ /*string* (em condições secas) e 2 M $\Omega$ /*string* (em condições úmidas).

Basicamente, o teste de isolamento dos cabos é realizado para saber se os cabos estão em perfeitos estados após a instalação dos mesmos, como mostra a Figura 15.

### **2.1.3 Medições de tensão de circuitos abertos Voc no nível do cabo string**

A relação entre a tensão de circuito aberto  $V_o$  strings conectadas em um mesmo inversor com o nível de radiação similar não podem ser superiores a 5%.

Basicamente, o teste de circuito aberto tem como objetivo identificar possível erro de conexão das *strings* ou algum módulo da *string* quebrado. Leva-se em consideração os valores referentes pelo nível de radiação, quanto menor o nível de radiação, menor tende a ser tensão de saída representada na *string*, desta forma, o

que é levado em consideração maior é a diferença de produção de uma *string* a outra da mesma caixa de junção, caso detectado uma diferença de 5% entre uma *string* ou outra, a verificação não é satisfeita, logo, liga-se um sinal de alerta pois pode significar algum tipo de problema naquela *string* em questão, como mostra as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Teste de tensão em circuito aberto em cada *string* e o teste de polaridade na caixa de junção 1.

Junction box 1	String	Uoc			Input Polarity	Fuse Continuity Test	Torque ( OK / KO)
		+ I - (V)	+ I Terre (V)	- I Terre (V)			
P5.1.CB1	1	769	7,0→0	9,0→0	ok	ok	ok
	2	761	7,0→0	10,0→0	ok	ok	ok
	3	755	7,0→0	10,0→0	ok	ok	ok
	4	765	10→0	10,0→0	ok	ok	ok
	5	763	7,6→0	11,0→0	ok	ok	ok
	6	768	7,2→0	10,0→0	ok	ok	ok
	7	763	10,0→0	11,0→0	ok	ok	ok
	8	760	9,0→0	11,0→0	ok	ok	ok
	9	763	9,0→0	10,0→0	ok	ok	ok
	10	763	9,0→0	12,0→0	ok	ok	ok
	11	765	8,3→0	11,0→0	ok	ok	ok
	12	765	8,0→0	13,0→0	ok	ok	ok
	13	764	7,0→0	12,0→0	ok	ok	ok
	14	764	8,0→0	11,0→0	ok	ok	ok

**Fonte:** Realizada pelo Autor (2021)

Na Tabela 3, as tensões de circuito aberto na caixa de junção 1 sinaliza nenhum erro, houve linearidade com relação a tensão de todas as *strings*, estas pequenas variações são resultadas de quedas de tensões maiores em determinados *strings*, pois a distância entre as caixas de junção 1 e as *strings* não são iguais.

Tabela 4 - Teste de tensão em circuito aberto na caixa de junção 2

Junction box 2	Uoc			Input Polarity	Fuse Continuity Test
	+ / - (V)	+ / Terre (V)	- / Terre (V)		
P5.1.CB1	776	183→ 0	251→ 0	ok	ok
P5.1.CB2	769	156→ 0	187→ 0	ok	ok
P5.1.CB3	776	171→ 0	164→ 0	ok	ok
P5.1.CB4	777	196→ 0	171→ 0	ok	ok
P5.1.CB5	776	228→ 0	240→ 0	ok	ok
P5.1.CB6	780	240→ 0	317→ 0	ok	ok
P5.1.CB7	784	142→ 0	185→ 0	ok	ok
P5.1.CB8	767	154→ 0	216→ 0	ok	ok
P5.1.CB9	795	173→ 0	181→ 0	ok	ok
P5.1.CB10	787	164→ 0	158→ 0	ok	ok
P.5.1.CB11	792	132→ 0	128→ 0	ok	ok

**Fonte:** Realizada pelo Autor (2021)

Na Tabela 4, as tensões de circuito aberto na caixa de junção 2 sinaliza nenhum erro, houve linearidade com relação a tensão de todas as caixas de junção 1, estas pequenas variações são resultadas de quedas de tensões maiores em determinados caixas de junções, pois a distância entre as caixas de junção 1 e a caixa de junção 2 não são iguais.

Tabela 5 - Teste de isolamento dos cabos DC entre a caixa de junção 1 e 2.

Junction box 1 / Junction box 2	+ 1000 Vdc / 1min (GΩ)	- 1000 Vdc / 1min (GΩ)	Torque ( OK / KO )
P5.1.CB1 / CS+/- (240mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB2 / CS+/- (150mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB3 / CS+/- (120mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB4 / CS+/- (150mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB5 / CS+/- (120mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB6 / CS+/- (120mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB7 / CS+/- (150mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB8 / CS+/- (150mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB9 / CS+/- (95mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB10 / CS+/- (120mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok
P5.1.CB11 / CS+/- (150mm <sup>2</sup> )	over limit > 2GΩ	over limit > 2GΩ	ok

**Fonte:** Realizada pelo Autor (2021)

Na Tabela 5, mostra-se o teste de isolamento dos Cabos DC neste caso foi um sucesso, pode notar nenhuma irregularidade, todos os cabos tiveram uma resistência superior a 2 GΩ realizando-se o teste com uma tensão de 1000Vdc durante o período de 1 minuto.

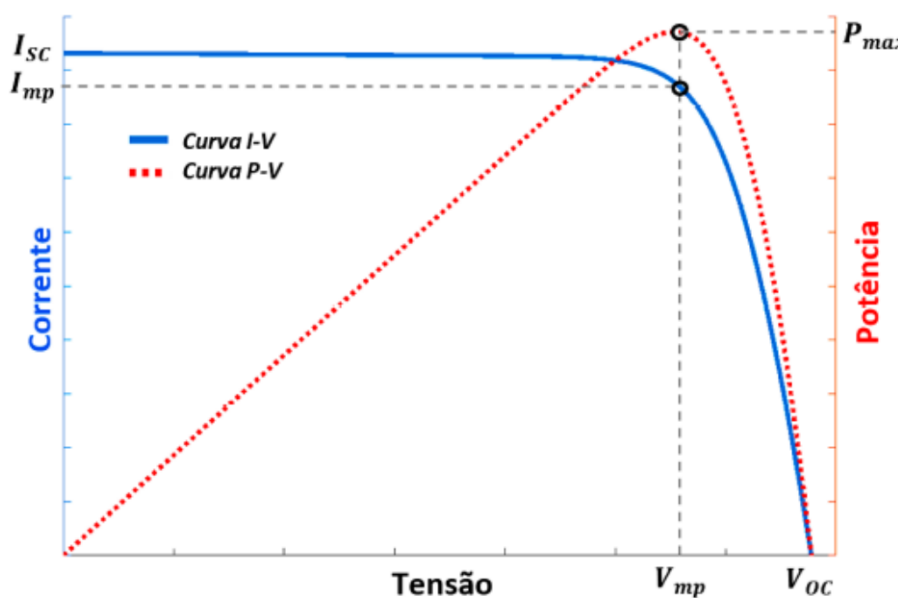
#### 2.1.4 Teste Curva I-V

A curva I-V (corrente-tensão) de uma *string* (ou módulo) PV descreve sua capacidade energética de conversão nas condições existentes de irradiância (nível de luz) e temperatura. Conceitualmente, a curva representa as combinações de corrente e tensão em que os módulos podem ser operados. A Figura 15 mostra uma curva I-V típica, a tensão de alimentação do módulo.



A extensão da curva I-V varia da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) em zero volts, para zero de corrente na tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ). No 'joelho' de um normal A curva I-V é o ponto de potência máxima ( $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$ ), o ponto no qual a matriz gera potência elétrica máxima. Em um sistema fotovoltaico em operação, um dos trabalhos do inversor é ajustar constantemente a carga, buscando o ponto específico na curva I-V em que a matriz como um todo produz a maior potência corrente contínua.

Figura 15 - As curvas I-V e P-V de um dispositivo fotovoltaico



Fonte: ARAUJO (2020)

Onde:

- $P_{max}$  = Potência máxima;

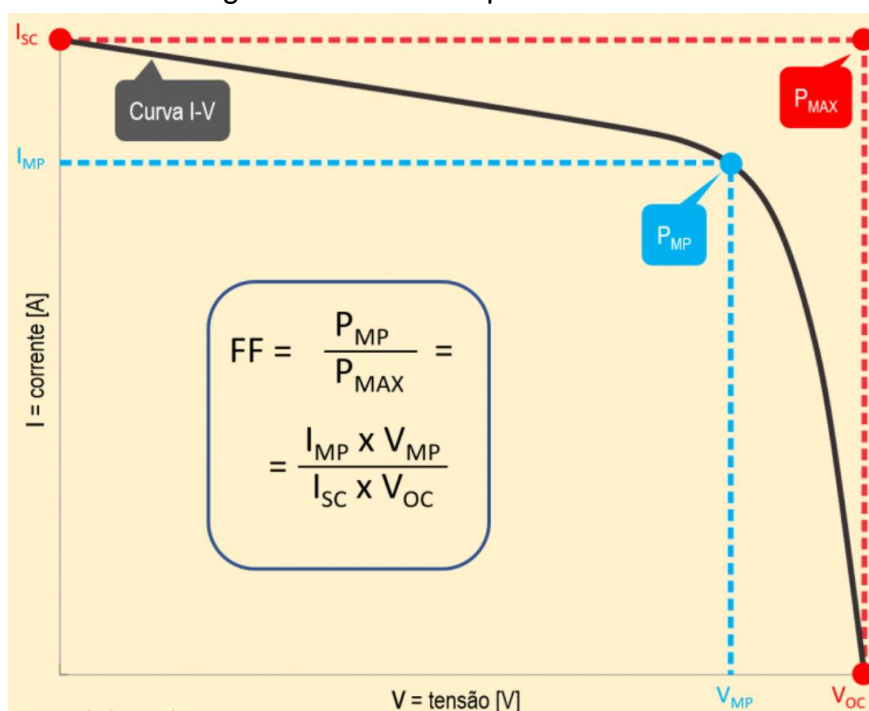
O fator de preenchimento (FF) de um módulo fotovoltaico ou *string* é um importante indicador de desempenho. Isto representa a quadratura da curva I-V, e é a razão de duas áreas definidas pela curva I-V, a de máxima potência com  $I_{mp} \times V_{mp}$  e a de medição de teste da modulo  $I_{sc} \times V_{oc}$  conforme ilustrado na Figura 16. Embora fisicamente irrealizável, uma tecnologia de módulo fotovoltaico ideal produziria uma curva I-V perfeitamente retangular em que o ponto de máxima potência coincidiu com ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ), para um fator de preenchimento de 1.

O fator de preenchimento é importante para a escolha dos equipamentos, como por exemplo, se as curvas I-V de dois módulos fotovoltaicos individuais com os

mesmos valores de  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ , mas de fornecedores diferentes, a matriz com o fator de preenchimento mais alto (curva I-V quadrada) produzira mais energia, desta forma, o modulo que tiver um maior percentual próximo de FF igual a 1, ele terá uma maior eficiência.

Outro fato importantíssimo do fator de preenchimento é com relação ao teste após a instalação dos módulos, caso tenho uma grande alteração com relação ao esperado, significa que pode ter ocorrido um erro de medição da curva I-V ou que existe um defeito no modulo fotovoltaico instalado.

Figura 16 - Fator de preenchimento



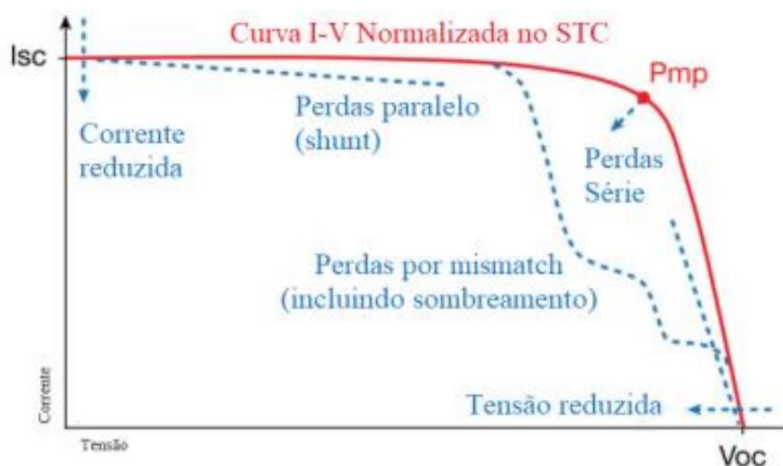
Fonte: canalsolar (2020)

Na Figura 16 mostra como é calculado o fator de Preenchimento na curva IxV, o FF é definido como sendo razão entre a área cinza pela a área hachurada, ou mais precisamente,  $(I_{mp} \times V_{mp}) / (I_{sc} \times V_{oc})$ . O valor ideal desta razão é 1.

Sob condições idênticas, dois módulos fotovoltaicos de um determinado número de modelo devem ter fatores de preenchimento semelhantes. A magnitude real do fator de preenchimento depende da tecnologia e design do módulo. Por exemplo, módulos de silício amorfo geralmente têm fatores de preenchimento mais baixos (joelhos mais macios) do que os módulos de silício cristalino.

Qualquer deficiência que reduza o fator de preenchimento também reduz a potência de saída reduzindo  $I_{mp}$  ou  $V_{mp}$  ou ambos. A própria curva I-V ajuda a identificar a natureza dessas deficiências. Os efeitos das perdas em série, perdas em paralelos e perdas de descasamento no I-V curva estão representadas na Figura 17.

Figura 17 - Perdas detectadas pelo teste de curva IxV



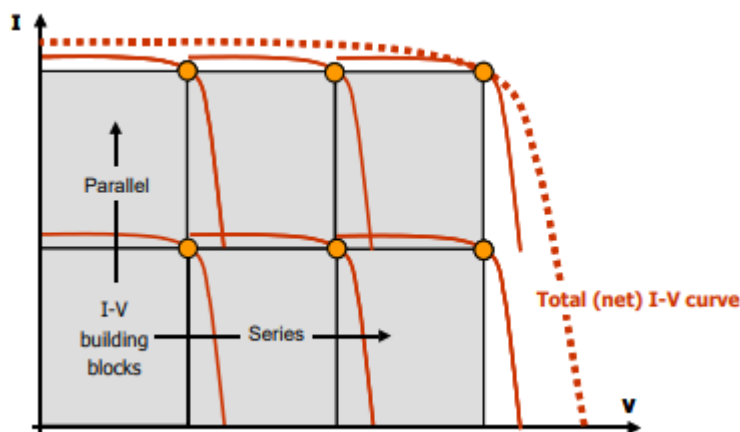
Fonte: CARNEIRO (2018)

Uma das formas mais utilizadas o teste curva I-V na execução de uma obra de uma usina fotovoltaica é para encontrar defeitos nas instalações dos módulos em *strings*, ou mais precisamente, em arranjos fotovoltaicos. Esses arranjos como pode ser denominado, são combinações de módulos em série ou em paralelo aumentando de forma respectiva, a tensão ou a corrente a ser utilizada na final deste arranjo.

A curva I-V de um arranjo fotovoltaico é uma ampliação da curva I-V de uma única célula, conforme ilustrado na Figura 18. Por exemplo, se a tensão de um modulo fotovoltaico é de 60V, a tensão de uma *string* com 10 módulos fotovoltaicos conectados em série será de 600V. O raciocínio semelhante aplica-se à corrente de curto-circuito, que escala com o número de células em paralelo, e a ponto de potência máxima, que escala com o produto do número de células em série e em paralelo.

Conforme ilustrado na Figura 18, pode-se pensar no ponto de potência máxima de uma matriz em termos de blocos de construção, onde cada célula, ou cada módulo, ou cada sequência de células dentro de um módulo, é um bloco de construção cujo canto superior direito representa seu ponto de potência máxima. Quando esses blocos de construção são empilhados em um retângulo, o canto superior direito é a potência máxima ponto da matriz.

Figura 18 - Dimensionamento da curva I-V de uma célula fotovoltaica para um arranjo fotovoltaico.



Fonte: Relatório de apoio do autor (2021)

A realização da análise de um teste Curva I-V em um módulo ou em uma *string* passa-se sempre com relação ao valor da curva com os dados nominais em comparação com o valor da curva com os dados medidos através de um aparelho chamado *PV Analyzer* após a instalação das placas fotovoltaicas.

Para que a análise seja precisa, os dados de entradas do modelo devem estar corretos, e estes dados são:

- Características do módulo fotovoltaico
- Número de módulos fotovoltaicos ligados em série
- Número de módulos fotovoltaicos ou *strings* ligadas em paralelo
- Comprimento e bitola do fio entre o módulo ou *string* e o *PV Analyzer*
- Irradiância no plano do arranjo
- Temperatura da célula

A recomendação na hora da medição é que a irradiação no local seja superior a 600 W/m<sup>2</sup> e a temperatura da célula esteja superior a 25° C, caso contrário, pode ocorrer erros de medição do aparelho.

A posição da curva do “joelho” da curva I-V depende do material do painel fotovoltaico, então dependendo-se do material do painel, a curva pode sofrer leves alterações, com relação a posição do “joelho” e conseqüentemente o ponto de potência máxima do módulo, mas sempre manterá o mesmo esforço.

Na medição, existem 3 formas de ter desvio entre as curvas I-V nominal e a medida.

1. A curva I-V medida mostra uma corrente maior ou menor do que o previsto;
2. A curva I-V tem entalhes ou degraus;
3. A curva I-V tem um valor de  $V_{oc}$  maior ou menor do que o previsto;

Todas estas 3 formas indicam que ocorreu uma redução na potência máxima produzida pelo modulo ou *string* em teste e que conseqüentemente, pode existir uma falha no modulo ou na instalação da *string*.

Uma curva I-V medida pode desviar-se da curva IV ideal devido a problemas físicos com o arranjo fotovoltaico em teste, ou pode ser o resultado de valores de modelo incorretos, instrumento de teste configurações ou conexões de medição. Sempre selecione o módulo fotovoltaico correto na lista de módulos fotovoltaicos integrados, verifique novamente a conexão de medição e certifique-se de valores de temperatura e irradiância são usados.

A primeira forma de desvio é quando a curva I-V medida mostra uma corrente maior ou menor do que a prevista, neste caso, as causas potenciais desse desvio pode ser:

- O painel fotovoltaico está sujo (especialmente uniformemente)
- Os módulos fotovoltaicos estão degradados
- Número de *strings* PV em paralelo não está inserido corretamente no modelo
- Irradiância alterada durante o curto espaço de tempo entre as medições de irradiância e I-V
  - Reflexos contribuem com irradiância adicional
  - A irradiância é muito baixa ou o sol está muito perto do horizonte
  - O sensor de irradiância manual não está bem calibrado

A segunda forma de desvio é quando a curva I-V tem entalhes ou degraus, em geral, esses tipos de padrões na curva I-V são indicações de incompatibilidade entre diferentes áreas da matriz ou módulo em teste. Embora todos os três anteriores as figuras envolvem sombreamento, a incompatibilidade pode ter outras causas. Os

detalhes da curva I-V são indicações de que os módulos conectados em série estão ativando e passando corrente ao redor do(s) módulo(s) afetado(s).

As causas potenciais são resumidas abaixo e, em seguida, discutidas com mais detalhes.

As causas potenciais localizadas na matriz incluem:

- A matriz está parcialmente sombreada
- As células fotovoltaicas estão danificadas

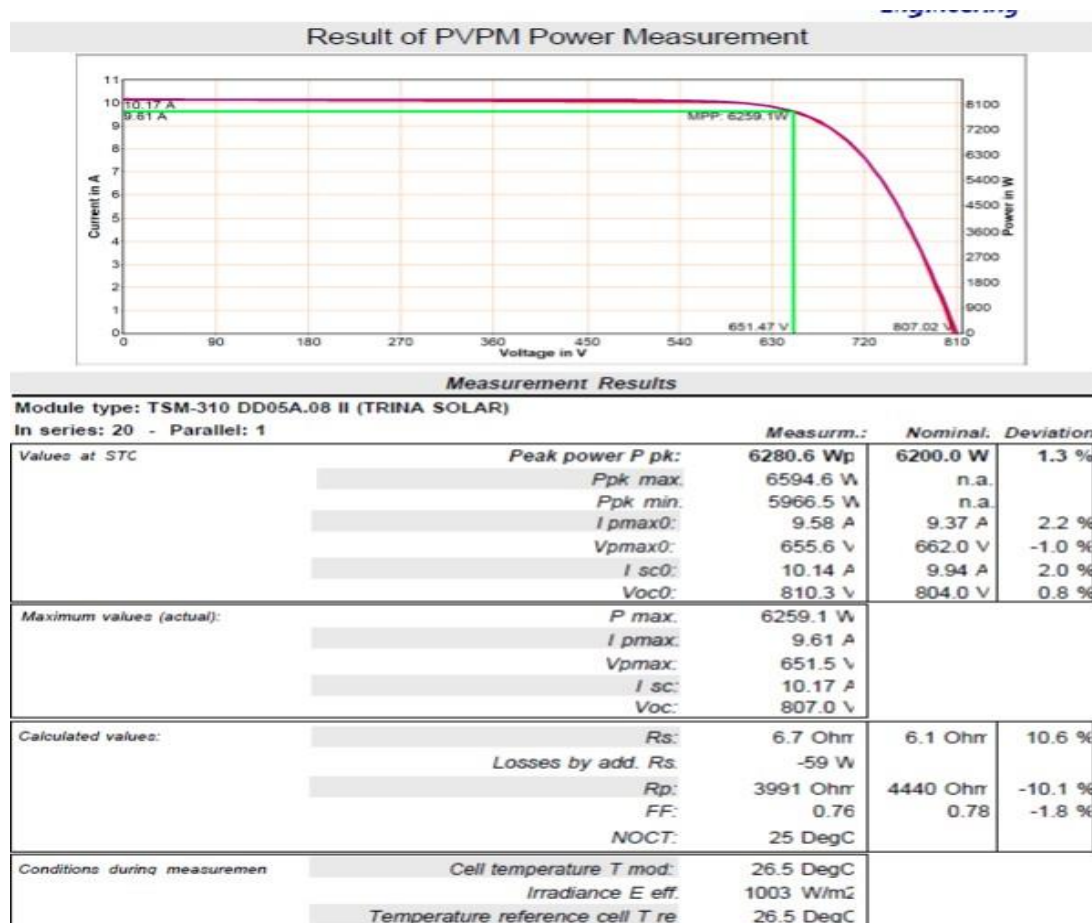
Por último, a terceira forma de desvio é quando a curva I-V tem valor Voc maior ou menor do que o previsto, as causas potenciais são resumidas abaixo e, em seguida, discutidas com mais detalhes.

As causas potenciais localizadas na matriz incluem:

- A temperatura da célula fotovoltaica é diferente da temperatura modelada
- Uma ou mais células ou módulos estão completamente sombreados
- Um ou mais módulos fotovoltaicos não foram incluídos no circuito *as-built*

A Figura 19 mostra um teste curva IxV realizado em uma *string* com 20 módulos em serie da Trina Solar de 310 Wp.

Figura 19: Teste curva IxV



**Fonte:** Realizada pelo Autor no PV Analyzer (2021)

Os principais dados analisados neste teste são :

1. O formato da curva IxV

A primeiro fator a prestar a atenção nesta análise, é o formato da curva IxV, como pode-se observar, não existe nenhuma alteração significativa no formato da curva padrão, desta forma, essa primeira análise está correta.

2. Diferença da potência entre a medida e a nominal

Como já citado anteriormente, é praticamente impossível o valores medidos na *string* ser igual ao valor nominal previsto, desta forma, consideramos como Normal uma variação entre -5% a +5% entre os dois parâmetros. No caso em questão, a variação se encontra-se entre 1,3%, portanto, pode-se concluir que não existe nenhum problema na analise.

### 3. O valor do FF (Fator de Preenchimento)

A análise do FF é similar a análise da potência, como em quase 100% dos casos, o valor medido será diferente ao valor nominal, em análise, existe uma tolerância, e esta tolerância deste modulo varia entre 0.73 a 0.78. Superior, ou Inferior a este resultado, é sinal de alerta e que algo possa estar errado. Ou a medição foi feita de forma errada, ou pode existir um problema em um dos módulos da *string*. No caso da Figura 26, o FF encontra-se dentro da tolerância então a análise é positiva.

Apos observar as 3 análises, pode-se concluir que não existe numa alteração com relação ao teste de Curva IxV, então pode-se prosseguir a obra para a próxima etapa.

## 2.2 **TESTE ONLOAD-COMMISSIONING**

O *Teste onload comissioning* ou teste com carga são os testes a serem realizados após a energização da usina fotovoltaica na rede de transmissão da concessionaria.

### 2.2.1 **Medição das correntes IMPP das strings em carga**

Para realizar a medição precisa-se de a irradiação estar maior que 600 W/m<sup>2</sup> para não haver nenhum problema. Basicamente, o teste de circuito com carga tem como objetivo identificar o funcionamento de cada *string* e se não ocorreu nenhuma falha após conectar a usina solar na rede. Este teste é de extrema importância, pois ele é praticamente o último a ser realizado para identificar a performance da usina solar. Neste teste, é tolerado uma variação de até 10% da corrente Impp com relação ao a nominal.

De exemplo segue-se a Tabela 6 pode-se observar uma linearidade nas correntes de Impp o que caracteriza se nenhuma irregularidade nas *strings* em análise.



Tabela 6 - Teste em carga da Caixa de junção nível 1

Junction box 1	String	Imp (A)	Plant Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	DATE	HOUR
P2.1.CB1	1	8,2	949	10/06/2021	14:18
	2	8,3			
	3	8,4			
	4	8,3			
	5	8,4			
	6	8,3			
	7	8,3			
	8	8,2			
	9	8,3			
	10	8,1			
	11	8,2			
	12	8,1			
	13	8,2			
	14	8,1			

**Fonte:** Realizado pelo autor (2021)

Na Tabela 6, observa-se que o Imp de cada *string* se manteve praticamente linear, não caracterizando nenhum defeito detectado.

### 2.2.2 Teste de Termografia (Câmera IV)

Este teste é um grande artifício para encontrar defeitos nos painéis fotovoltaicos após o seu transporte e sua instalação. Ele é realizado no intuito de confirmar que o painel que foi instalado na usina não sofreu nenhum dano por impacto ou por defeito de fabricação antes mesmo de iniciar os testes em carga.

O teste de termografia é fundamental também para encontrar defeitos na caixa de junção que comportam os outros equipamentos elétricos com: fusíveis, cabos e chave selecionadores.

O teste é realizado por uma câmera infravermelha (IV) responsável por captar as diferenças de temperatura dos objetivos, com isso, as diferenças de temperatura mostram o local das possíveis falhas nos equipamentos e caso constatados a necessidade de troca dos mesmos.

Para a realização dos testes são considerados algumas condições ambientais próprias como mostra na Tabela 7, caso contrário, pode ocorrer interferências dos dados apresentados.

Tabela 7 - Condições ambientais de inspeção

	<b>Parâmetros</b>	<b>Limites</b>
a	Irradiação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mínimo de 600 W/m<sup>2</sup> no plano do módulo fotovoltaico</li> <li>• Mínimo de 300 W/m<sup>2</sup> para componentes elétricos</li> </ul>
b	Velocidade do Vento	Máximo de 28 km/h
c	Nuvens no céu	Máximo 2 octa de céu coberto por densidade de nuvens
d	Sujeira	Nenhuma ou baixa

**Fonte:** IEC TS 62446-3 (2021)

Para o registro das imagens, além das condições ambientais, existe a necessidade da imagem da câmera IR ter que ser obtida o mais perpendicular possível à superfície do módulo fotovoltaico em casos onde a imagem não pode ser obtida perpendicularmente à superfície do módulo fotovoltaico, por exemplo, uma pequena instalação com capacidade limitada para levantar a câmera, o ângulo entre a câmera e o PV o plano do módulo ainda deve ser maior que 30°.

#### **2.2.2.1. Anormalidades dos módulos fotovoltaicos**

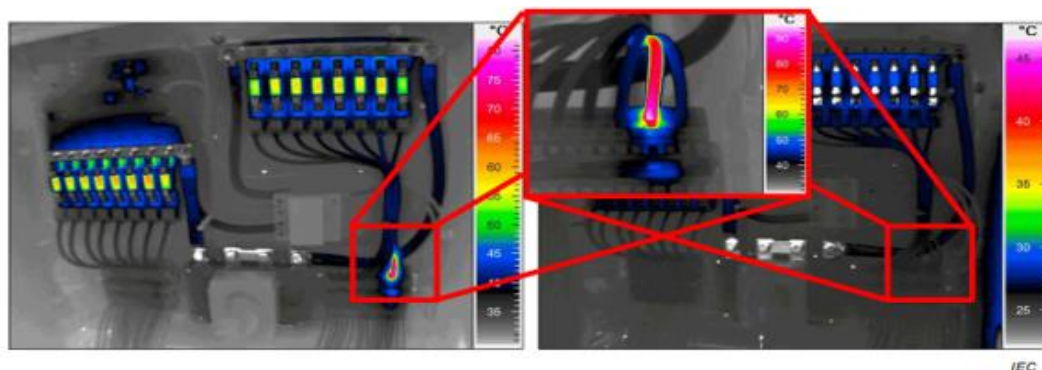
As imagens térmicas e as diferenças de temperatura resultantes devem sempre ser avaliadas no contexto das condições ambientais, tipo de montagem e montagem do módulo (vidro-vidro módulo, módulo de folha de vidro, polímeros integrados, etc.).

Se uma classificação sem dúvida do lado frontal de um módulo fotovoltaico não for possível, um lado traseiro visualização (óptica e termográfica) ou outras técnicas de medição devem ser utilizadas ou um pessoal mais qualificado (termógrafo de nível 2 ou equivalente) deve ser envolvido.

#### **2.2.2.2 Anormalidades de outros componentes**

A inspeção de componentes na caixa de junção inclui, cabos, contatos, fusíveis, interruptores, inversores, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Termogramas infravermelhos de uma caixa de junção



**Fonte:** IEC TS 62446-3 (2017)

Na Figura 20, nota-se no primeiro quadrado vermelho em destaque a esquerda uma anormalidade do cabo, isto é possível notar pelo teste termográfico a diferença de temperatura em uma região do cabo, isto caracteriza pela falha no isolamento, logo é necessário a troca do mesmo.

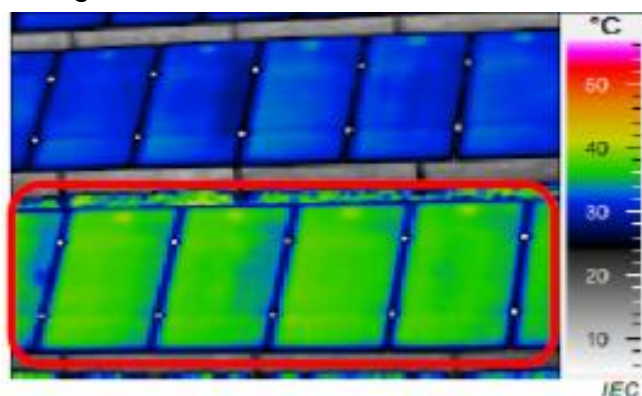
Além de defeitos nos componentes, com o teste termográfico é possível identificar anormalidades térmicas nas placas solares, a seguir, apresenta-se anormalidades térmicas sobre irradiação nominal definida como sendo 1000 W/m<sup>2</sup> e sem sofrer com condições como o vento (IEC TS 62446-3).

Pode -se observar que existem dois tipos diferentes de anormalidade neste caso:

- a) anomalias pontuais (por exemplo, pontos quentes localizados em células solares ou um fusível)
- b) anormalidade de área estendida (por exemplo, uma célula solar quente/quente inteira ou uma placa de dissipador de calor).

Uma anomalia comum encontrada nos testes de termografia é o de módulos em circuito aberto, como mostra a Figura 23.

Figura 21 - Módulos em circuitos Aberto

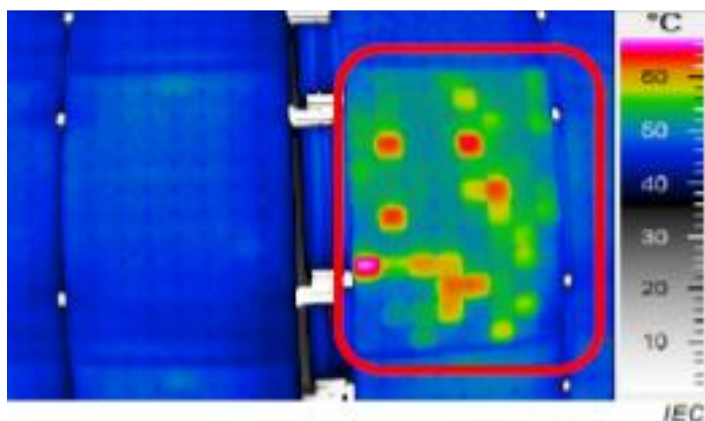


**Fonte:** IEC TS 62446-3 (2017)

Nota-se na Figura 21 dentro do círculo vermelho em destaque uma diferenciação de temperatura entre a parte superior que está toda de azul e a parte inferior que está toda de verde, essa diferenciação de temperaturas muito grande, de duas *strings* uma do lado da outra caracteriza -se com um critério de *string* em circuito aberto, provavelmente, neste caso pode ter ocorrido um problema de conexão dos módulos das *strings*, ou até mesmo o fusível de produção pode estar queimado, o que causa um circuito aberto, neste caso, a solução pode ser apenas trocar o fusível de proteção ou até mesmo, conferir a conexão de uma placa a outra.

Um outro defeito que pode-se ser observado no teste termográfico é um módulo em curto circuito como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Módulo em curto circuito



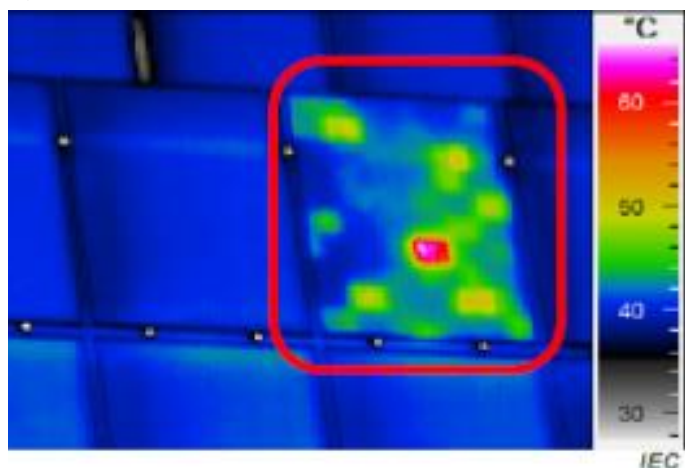
**Fonte:** IEC TS 62446-3 (2017)

Observa-se na Figura 22 dentro do círculo em destaque vermelho, um módulo com várias diferenciações de cores, conseqüentemente, diferenças temperaturas em várias células, umas com temperaturas mais frias como as células em azul e outras

com temperaturas mais quentes como as células em vermelho, e este grande número de células com várias temperaturas diferentes caracteriza-se como um módulo em curto circuito, neste caso, a solução é trocar este módulo por outro.

Outro defeito possível de identificar no teste termográfico é o vidro do painel quebrado como mostra a Figura 23.

Figura 23 - Módulo cristalino com o vidro quebrado

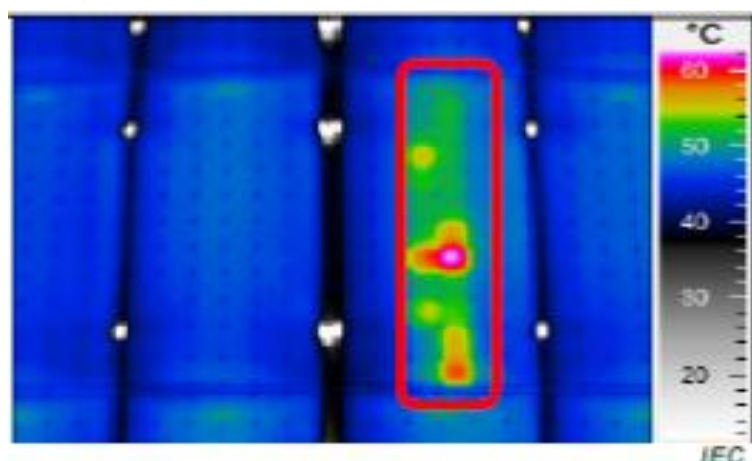


Fonte: IEC TS 62446-3 (2017)

Observa-se na Figura 23 dentro do círculo vermelho em destaque um módulo com vários pontos de diferentes temperaturas, este caso é bem parecido com o módulo em curto circuito observado na Figura 22, só que a diferença está na concentração das irregularidades, na Figura 23 existe apenas uma parte na coloração rosa detectada no módulo, além da coloração amarela e verde está concentrada na região mais abaixo e à direita do módulo o que caracteriza um vidro quebrado, diferente da Figura 22 que a diferença de temperatura se encontra mais de forma uniforme em toda a placa fotovoltaica.

Um problema que é mais incomum, mas pode aparecer é uma faixa de células do módulo estar em curto circuito como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Células do módulo em curto-circuito

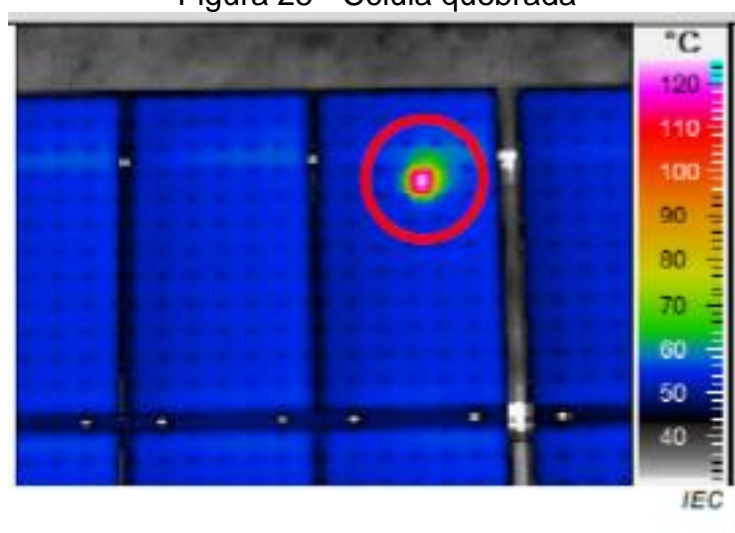


**Fonte:** IEC TS 62446-3 (2017)

Observa-se na Figura 24 em destaque dentro do círculo vermelho apenas algumas faixas de células fotovoltaicas dentro de um único módulo com grande variedade de diferenciação de temperatura, isto caracteriza-se como falha de curto circuito em faixas de células dos módulos, a solução neste caso é trocar o módulo que está com um erro provavelmente de fabricação.

Existe a possibilidade de identificar com o teste termográfico o defeito de uma célula quebrada como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Célula quebrada



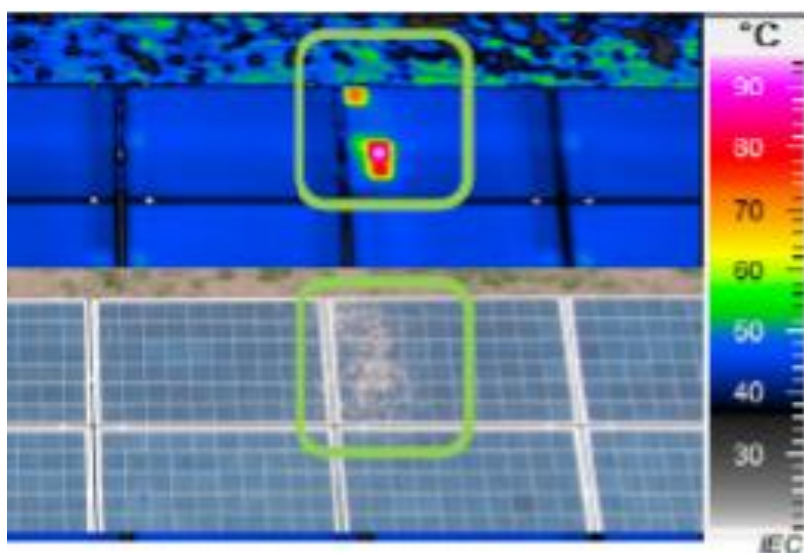
**Fonte:** IEC TS 62446-3 (2017)

Observa-se na Figura 25 identificado dentro do círculo vermelho, um pequeno ponto com grande variedade de temperatura comparada com as outras células do

módulo, este defeito é característico de uma única célula do módulo quebrado e a solução é trocar todo o modulo por outro.

Além de problemas de fabricação dos módulos e erros de instalações é possível identificar através do teste termográficos módulos sujos, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Painel sujo

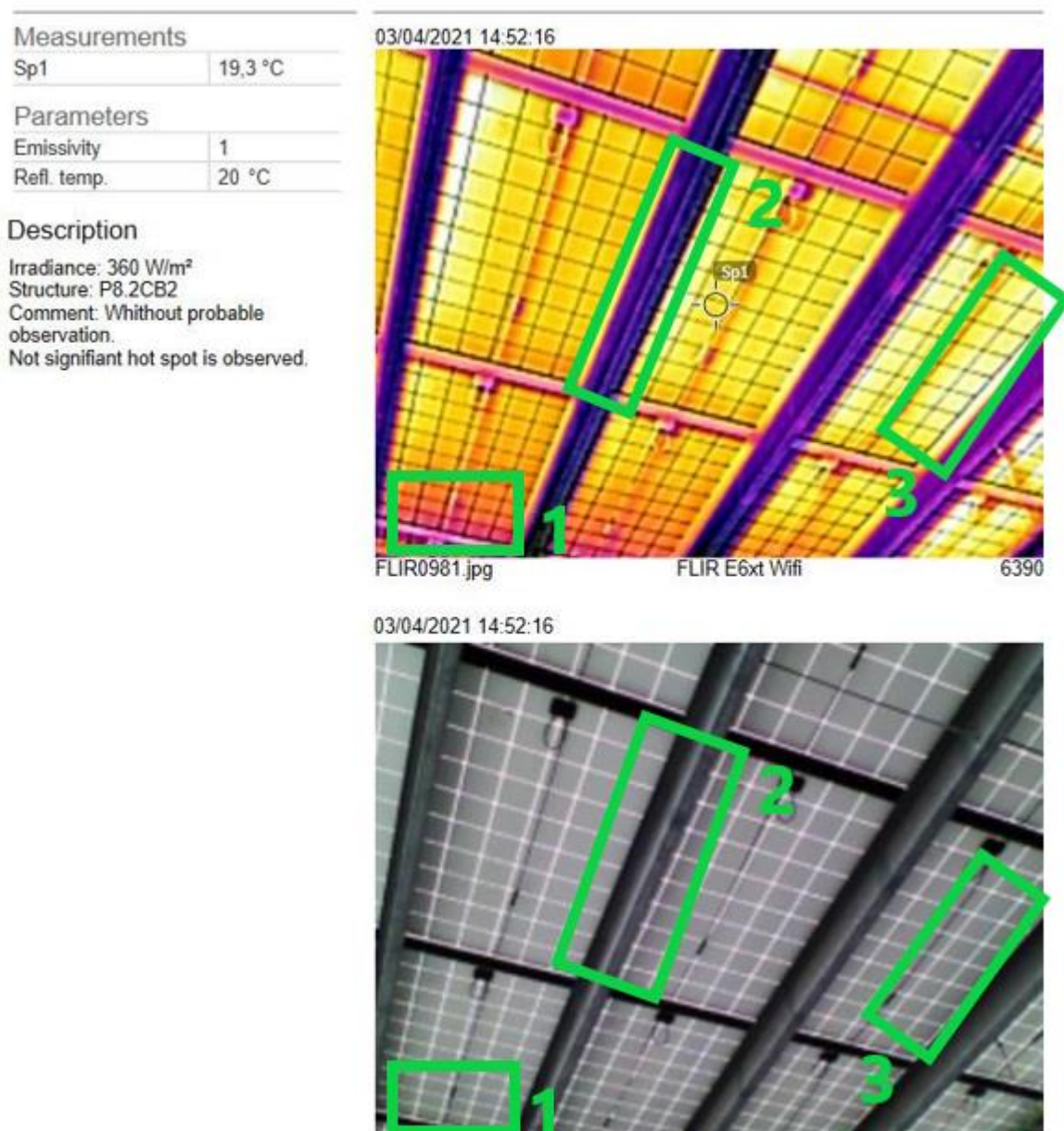


**Fonte:** IEC TS 62446-3 (2017)

Na Figura 26 observa-se na parte superior, dentro do círculo em destaque 2 pontos de grande variação de temperatura, um perto do outro, caracteriza-se um painel sujo, isto pode ser interpretado também como sendo um módulo fotovoltaico com 2 células quebradas, para tirar esta conclusão apenas a imagem do teste termográfico não é o suficiente, precisa-se verificar o painel instalado, neste caso, como pode-se observar na parte inferior da Figura 26 foi constatado que o painel se encontrava sujo e este fato interfere e performance de produção do painel.

Pode-se realizar a análise dependendo-se do local, sem seguir as recomendações ideais para a execução do teste, mas o fato de não seguir as recomendações ambientais proporciona dificuldades na hora de análise do teste termográfico como pode-se observar na Figura 27.

Figura 27 - Teste termográfico em placas solares



**Fonte:** Realizado pelo Autor (2021)

A Figura 27 mostra o teste termográfico realizado em placas solares e nela existe 3 pontos que se pode destacar, o primeiro ponto mostra uma variação de temperatura no modulo, isso é pelo fato de a medição não ter respeitado a inclinação máxima de 30° com relação ao painel, desta forma o resultado sai de forma equivocada, os módulos que estão em análise neste teste são os módulos que estão no nível horizontal do ponto 2.

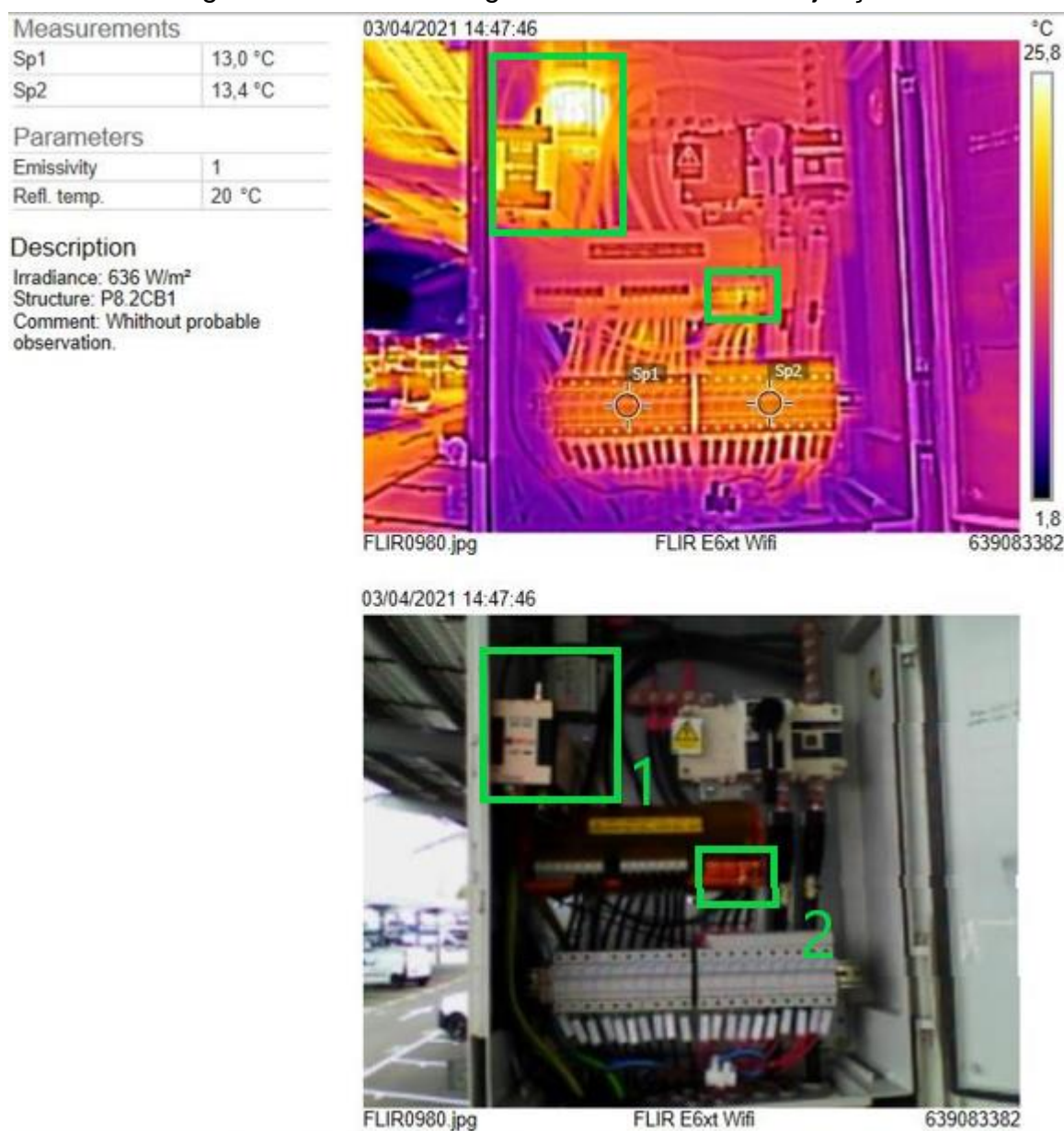
No ponto 2, existe uma grande variedade de temperatura com relação aos pontos na sua horizontal, isto é pelo fato do ponto 2 estar em cima do suporte metálico e não na placa, com isso, a placa esquenta bem mais que o suporte metálico e este é



o motivo pela diferença de temperatura, já no ponto de análise 3 esta diferença de temperatura é pelo reflexo da irradiação do suporte metálico na placa o que provoca esta sensação de diferença de temperatura e defeito na placa e na verdade não é. Logo, a análise do teste termográfico em condições não recomendadas causam muito mais dificuldade na hora da tomada de decisão com relação ao teste realizado.

Outro tipo de teste termográfico que pode ser realizado é com relação a caixa de junção como mostra na Figura 28.

Figura 28 - Teste termográfico em uma caixa de junção



**Fonte:** Realizado pelo Autor (2021)

Observa-se na Figura 28, 2 pontos que podem ser levado em questionamento, o ponto número 1 mostra uma grande variação de temperatura, mas no ponto de vista da análise do teste não é um sinal preocupante, é apenas o material do equipamento de comunicação que absorve mais energia que os outros componentes da caixa de Junção, já o ponto em destaque 2 é uma pequena variação de temperatura em uma das portas de entrada do sistema de análise da boate de junção que também não é um sinal preocupante no sistema, logo o teste termográfico na caixa de junção não indicou nenhum ponto de atenção de uma possível falha no sistema.

### 3 CONCLUSÃO

Dado ênfase em uma das formas de utilização do sol como fonte de energia que é a energia fotovoltaica centralizada, ou conhecida como grandes usinas fotovoltaicas que tem o intuito de substituir as grandes usinas térmicas pelo mundo.

Dentro do trabalho, pode-se verificar a importância dos testes durante a execução do projeto, os testes separados em dois grupos os *pre-comissioning* e os *testes onload comissioning* são fundamentais para a gestão e o funcionamento adequado da usina solar, já que são os responsáveis por identificar devidos erros de material e de defeitos causados no momento da instalação dos painéis fotovoltaicos, servindo-se de testes preventivos para evitar qualquer problema a curto e a longo prazo após a inserção da usina fotovoltaica na rede de distribuição de energia.

Os principais resultados são a importância da análise técnica e a tomada de decisão decorrente desta análise, principalmente quando se trata no plano de execução que é diferente da teoria. Na prática existem vários outros fatores que em muitos casos por condições de projeto, prazo ou até mesmo por condições ambientais é preciso ser realizado os testes e as análises em condições não recomendadas, não ideias, como o caso do teste de termografia na Figura 29.

Recomenda-se para trabalhos futuros o desenvolvimento da análise dos dados de monitoramento de uma usina fotovoltaica em funcionamento.

## REFERENCIAS

ABNT – NBR 5410:2004 – **Instalações elétricas de baixa tensão**. Segunda Edição, setembro de 2004, 209p.

ABNT NBR 16274 – **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede** — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.

ANEEL – **RESOLUÇÃO Nº 482** – Resolução Nº 482 de 17 de abril de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica, 12p.

ANEEL – **RESOLUÇÃO Nº 687** – Resolução Nº 687 de 24 de novembro de 2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica, 25p.

APPIFRMEB – **Avaliação das Políticas Públicas de Inserção de Fontes Renováveis na Matriz elétrica brasileira**. março de 2019. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A81881E6DD68572016DD6AA52451CE4>. Acesso em: nov. 2021.

ARAUJO, Ana Lyvia Pereira Lima. **TOPOLOGIAS EM TRAÇADOR DE CURVA I-V PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. Fortaleza, 2020.

Bluesol, Energia Solar - **Leilão de Energia Solar**: Informações e o Histórico Completo das Edições no Brasil. 2019. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/leilao-de-energia-solar>. Acesso em: novembro de 2021

BLUESOL. **Fontes Solar e Eólica Serão Quase 50% da Matriz Elétrica Mundial Em 2050, segundo a BNEF**. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/solar-eolica-geracao-mundial-2050/#:~:text=Em%20termos%20financeiros%2C%20a%20BNEF,ser%C3%A1%20vultado%20as%20fontes%20limpas>. Acesso em: nov. de 2021.

CABRAL, Isabelle de Souza. **ENERGIA SOLAR – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BRASIL E ALEMANHA**, Salvador, 2013. Disponível em : <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/X-009.pdf>. Acesso em : nov. de 2021

CARNEIRO, Rafael Kotchetkoff. **DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADOR DE CURVA I-V PORTÁTIL PARA CARACTERIZAÇÃO DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS ATÉ 400V E 10A**, Gramado, 2018.

Canalsolar - **Fator de forma como indicador de qualidade dos módulos FV**. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/fator-de-forma-como-indicador-de-qualidade-dos-modulos-fv/>. Acesso em: março de 2022

DIEESE - DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS

ECONÔMICOS. **Comportamento das tarifas de energia elétrica no Brasil:** Nota Técnica Número 147 - agosto 2015. São Paulo, Sp, 2015.

EL PAÍS. **Europa propõe para 2035 o fim da venda de carros a combustão.** 2021, Disponível em: <https://brasil.elpais.com/economia/2021-07-15/europa-propoe-para-2035-o-fim-da-venda-de-carros-a-combustao.html>. Acesso em: nov. de 2021.

ENGEMA. **Os desafios da implementação da energia fotovoltaica no Brasil:** uma análise dos modelos nos principais mercados mundiais, Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/408.pdf>. Acesso em: nov. de 2021

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: nov. de 2021.

ECOBRA SL Energy – **Solar um Panorama.** Disponível em <https://ecobrasilenergy.com.br/site/2018/04/27/o-que-e-energia-solar> . Acesso em: nov. de 2021

GUARNIERI, Mauricio Vivan. **USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS COM SEGUIMENTO EM UM EIXO NO BRASIL: ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO, CUSTOS E EXPECTATIVA DE DESEMPENHO.** Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/189002/PECV1108-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: nov. de 2021.

IEC 60364-6. **Low-voltage electrical installations.** Part 6: Verification. 2017.

IEC 60364-7-712. **Requirements for special installations or locations.** Solar photovoltaic (PV) power supply systems. 2017.

IEC 61010 (all parts). **Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use.** 2017.

IEC 62446-1. **Photovoltaic (PV) Systems – Requirements For Testing, Documentation And Maintenance** – Part 1: Grid Connected Systems – Documentation, Commissioning Tests And Inspection. 2017.

IEC 62548. **Photovoltaic (PV) arrays.** Design requirements. 2017.

IEC TS 62446-3 TECHNICAL SPECIFICATION. **Photovoltaic (PV) systems.** Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography. 2017.

PDE – **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023.** 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-47/topico-85/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202023.pdf>. Acesso em: nov. de 2021.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves de. **ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.: il. (E-BOOK)

PEREIRA, Naron Xavier. **Desafios e Perspectivas de Energia solar fotovoltaica no Brasil: Geração Distribuída vs Geração Centralizada**. UNESP Sorocaba, 2019, Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/181288/pereira\\_nx\\_me\\_soro.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/181288/pereira_nx_me_soro.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em: nov. 2021.

PEREIRA, Reuler Cardoso. **POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DOS PRINCIPAIS PROGRAMAS DE INCENTIVO DA TECNOLOGIA NO BRASIL**, Itumbiara, 2019. Disponível em: [https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/268/4/tcc\\_reuler%20pereira.pdf](https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/268/4/tcc_reuler%20pereira.pdf). Acesso em: nov. de 2021.

STATKRAFT. **Statkraft's Low Emissions Scenario**. Disponível em: <https://www.statkraft.com/globalassets/1-statkraft-public/lavutslipsscenario/low-emissions-scenario-2019.pdf>. Acesso em: nov. de 2021.