



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**RUTH MARIA DE MELO GOMES**

**ASPECTOS TÉCNICOS E FINANCEIROS DA TECNOLOGIA MODULE-LEVEL  
POWER ELECTRONICS - MLPE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GRANDE  
PORTE**

**FORTALEZA  
2022**

RUTH MARIA DE MELO GOMES

ASPECTOS TÉCNICOS E FINANCEIROS DA TECNOLOGIA MODULE-LEVEL  
POWER ELECTRONICS - MLPE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GRANDE  
PORTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, com requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

FORTALEZA  
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G617a Gomes, Ruth Maria de Melo.  
Aspectos técnicos e financeiros da tecnologia module-level power electronics - MLPE em sistemas fotovoltaicos de grande porte / Ruth Maria de Melo Gomes. – 2022.  
34 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

1. Energia solar. 2. Inversor. 3. Tecnologia. I. Título.

CDD 621.042

---

RUTH MARIA DE MELO GOMES

ASPECTOS TÉCNICOS E FINANCEIROS DA TECNOLOGIA MODULE-LEVEL  
POWER ELECTRONICS - MLPE EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GRANDE  
PORTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Fabíola Leite Almeida  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carla Freitas de Andrade  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus avós, Maria Estelita Melo e Nilo  
Carvalho de Melo.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me permitir viver nesse tempo e por conduzir todos os meus caminhos.

Aos meus avós, por sempre incentivarem meus estudos e me ensinarem o que é certo e errado na vida, vocês têm todo o meu amor.

Ao meu irmão por sempre me apoiar e me ajudar quando preciso, estamos juntos até depois do fim.

A minha mãe por suas lutas e esforços empenhados na minha formação, mesmo com as suas limitações.

Aos meus primos Bruno e Beatriz por me acolherem em sua casa e me ajudarem a nunca desistir.

As minhas tias por se preocuparem e me ajudarem como uma filha.

Ao Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire por me ajudar, orientar e incentivar em toda a caminhada pela UFC.

A todos os professores do meu curso de graduação, em especial ao Ison, Estêvão, Fabíola, Carla e Fernanda por toda dedicação e formação passada.

Ao Júlio Tavernaro, por se dedicar e incentivar a minha formação e meu progresso na vida.

Aos meus companheiros de turma na renováveis Johnathas, Fernanda, Ana Kelly e Marcelo por todos os momentos e dificuldades vividos juntos

Aos meus amigos de faculdade e de vida Gleiciane, Fernando e Nayara por todos os momentos na Universidade.

“Se você acordar de manhã e pensar que o futuro será melhor, será um dia brilhante. Caso contrário, não será.”

(Elon Musk)

## RESUMO

O desenvolvimento tecnológico no último século direcionou o mundo para um outro patamar em seus aspectos econômicos, sociais e ambientais. No campo da eletricidade na matriz energética mundial, as tecnologias empregadas na geração de energia estão a cada ano evoluindo, entre as quais estão as aplicadas na área de energia solar, que foram objetos de estudo neste trabalho. Foram analisados dois sistemas fotovoltaicos de aproximadamente 70 kWp com diferentes inversores, um com a topologia MLPE e outro com inversor da topologia *string*, ambos localizados em Fortaleza-CE. Por meio do sistema de monitoramento das fabricantes Canadian Solar e SolarEdge, obteve-se os dados de geração de energia dos últimos três meses do segundo trimestre de 2022. Foi encontrada uma maior geração de energia com a tecnologia de otimizadores de potência nessa análise, em seguida foi realizada a projeção para o período da vida útil do sistema de 25 anos, onde se encontrou além da maior geração de energia que ficou em torno de 10%, obteve-se um valor do custo nivelado de energia com a tecnologia MLPE de 3,58% menor do que o inversor convencional, mostrando a viabilidade técnica e financeira dessa tecnologia para sistemas maiores a longo prazo.

**Palavras-chave:** Energia Solar. Inversor. Tecnologia.

## **ABSTRACT**

Technological development in the last century has taken the world to another level in its economic, social and environmental aspects. In the field of electricity in the world energy matrix, the technologies used in energy generation are evolving every year, among which are those applied in the area of solar energy, which were objects of study in this work. Two photovoltaic systems of approximately 70 kWp with different inverters were analyzed, one with the MLPE topology and the other with the string topology inverter, both located in Fortaleza-CE. Through the monitoring system of the Canadian Solar and SolarEdge manufacturers, the energy generation data of the last three months of the second quarter of 2022 was obtained. A greater energy generation was found with the power optimizer technology in this analysis, in Then, the projection was carried out for the period of the useful life of the system of 25 years, where in addition to the highest energy generation that was around 10%, a value of the leveled cost of energy with the MLPE technology of 3 .58% lower than the conventional inverter, showing the technical and financial viability of this technology for larger systems in the long term.

**Keywords:** Solar Energy. Inverter. Technology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Esquematização de um sistema fotovoltaico <i>on-grid</i> .....	18
Figura 2	- Captação de luz pela bifacialidade do módulo.....	19
Figura 3	- Módulo fotovoltaico com células cortadas ao meio.....	19
Figura 4	- Processo de fabricação do silício monocristalino.....	21
Figura 5	- Fabricação de módulos fotovoltaicos.....	22
Figura 6	- Diagrama de ligação do microinversor QS1A.....	25
Figura 7	- Esquema de ligação do otimizador de potência com os módulos.....	26
Figura 8	- Diferença entre inversor string e MLPE.....	27
Figura 9	- Layout do sistema de monitoramento da SolarEdge.....	29
Figura 10	- Cálculo do custo e receita do sistema fotovoltaico.....	33
Figura 11	- Cálculo do LCOE.....	35

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual de perda de energia por mismatch em módulos fotovoltaicos.....	23
Gráfico 2 – Fenômenos que causam degradação em módulos fotovoltaicos.....	24
Gráfico 3 – Monitoramento dos últimos 3 meses do inversor Canadian.....	30
Gráfico 4 – Monitoramento dos últimos 3 meses do inversor SolarEdge.....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MLPE	<i>Module-Level Power Electronics</i>
GD	Geração Distribuída
ROI	<i>Return Over Investment</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
CC	Corrente Contínua
LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i>
O&M	Operação e Manutenção

## LISTA DE SÍMBOLOS

MWh Mega Watt Hora

kWp Quilowatt Pico

kWh Quilowatt Hora

P Potência

V Volt

® Marca Registrada

*i* Corrente

*R* Resistência

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo.....	16
1.1.1 Objetivos específicos.....	16
1.2 Justificativa.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Sistema fotovoltaico.....	17
2.2 Principais tecnologias de módulos fotovoltaicos.....	18
2.2.1 <i>Bifaciais</i> .....	18
2.2.2 <i>Half Cell</i> .....	18
2.2.3 <i>Monocristalinos</i> .....	20
2.3 Motivos de perdas de geração em sistemas fotovoltaicos.....	20
2.3.1 <i>Diferenças de fabricação</i> .....	20
2.3.2 <i>Degradação desigual dos módulos</i> .....	21
2.3.3 <i>Sujidade</i> .....	22
2.3.4 <i>Sombreamento</i> .....	22
2.3.5 <i>Danos de transporte</i> .....	22
2.3.6 <i>Delaminação</i> .....	22
2.4 Inversores e microinversores.....	23
2.4.1 <i>Microinversores</i> .....	23
2.4.2 <i>Inversores simplificados com otimizadores de potência</i> .....	24
2.4.3 <i>Inversores string</i> .....	25
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 Discriminação dos equipamentos utilizados em cada sistema.....	26
3.2 Análise da geração de energia através do sistema de monitoramento.....	27
3.3 Análise financeira de cada sistema durante a vida útil.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	35

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico nas últimas décadas direcionou as diversas áreas da economia mundial a outro patamar. O uso massivo de novas ferramentas de trabalho possibilitou o homem a evoluir cada vez mais no desenvolvimento de tecnologias que trouxeram uma melhor qualidade de vida. Com a gama de equipamentos que hoje dispomos no nosso dia a dia, indústrias passaram a usar cada vez mais a eletricidade nos seus processos, a população aumentou o consumo mais em suas residências com o uso de eletrodomésticos e assim todas as áreas passaram a demandar mais da rede elétrica. Com isso, tornou-se necessário a diversificação da matriz energética mundial para atender a demanda da sociedade.

Compondo a nossa matriz elétrica, as principais fontes para geração de energia são: eólica, solar, hidrelétrica, termelétrica, usinas nucleares e uso da biomassa. Dentre essas, a energia oriunda da fonte solar tem ganhado cada dia mais destaque em relação a seu crescimento, com novas regulamentações e democratização de acesso para mais pessoas. A década de 1990 foi primordial no desenvolvimento acelerado da indústria fotovoltaica. Para ampliar os horizontes do uso em larga escala da energia solar como opção energética, muitos projetos em todo o mundo foram iniciados para demonstrar a viabilidade técnica comercial da energia solar fotovoltaica em projetos de eletrificação rural em países em desenvolvimento (NASCIMENTO, 2004).

No cenário atual, analisando esse salto no campo da geração fotovoltaica na cadeia de suprimentos nos últimos meses, é possível verificar o ritmo de expansão da geração distribuída no território brasileiro de forma crescente. Segundo a pesquisa Greener (2021), o volume importado de módulos no primeiro semestre de 2021 que foi cerca de 4,88 GW, superou o volume importado total do ano de 2020 que foi 4,76 GW, mesmo em um cenário pós pandemia e com deficiências no fornecimento de equipamentos dos principais fabricantes.

Alguns fatores influenciaram fortemente para que esse crescimento não fosse ainda maior. A China é o país onde se concentram 9 dos 10 maiores fornecedores de módulos do mundo, o país enfrenta desde 2020 um crescente aumento no preço do polissilício, principal matéria prima na fabricação de módulos que constitui cerca de 60% da estrutura de custos dos insumos, e junto a isso está passando por um processo de racionamento de energia, o que limita a produção desses equipamentos em grande escala.

Nesse cenário de crescimento do mercado e aceleração tecnológica no setor, novos equipamentos destinados ao uso em sistemas fotovoltaicos são ofertados ao mercado pelos

fabricantes, e junto a isso novas soluções integradas a esses sistemas utilizando o conceito de *smart energy* estão surgindo e ganhando atenção dos principais consumidores, exemplos dessas inovações são os microinversores e os otimizadores de potência usados na conversão de energia, são denominados tecnologia MLPE e são o foco de estudo dessa pesquisa, além disso tem-se também a evolução dos módulos fotovoltaicos que estão invadindo o mercado solar.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é mostrar como a tecnologia *Module-Level Power Electronics* (MLPE) tem viabilizado plantas fotovoltaicas de grande porte a operarem de forma mais segura e financeiramente viáveis aos consumidores e participantes da Geração Distribuída (GD).

### **1.1.1 Objetivos específicos**

I – Mostrar a diferença de geração entre os inversores simplificados com otimizadores de potência e os inversores *string*.

II – Mostrar a receita em R\$ que se tem a mais com a tecnologia MLPE.

III – Mostrar a viabilidade da tecnologia MLPE para sistema fotovoltaicos de grande porte e o retorno financeiro a longo prazo.

## **1.2 Justificativa**

Uma das principais preocupações para quem gera sua própria energia é a garantia de segurança para o local e as pessoas que ali convivem, e em seguida vem o gargalo do preço a ser pago por isso. Quando se opta por um equipamento com mais qualidade e tecnologia avançada, é inevitável o pensamento de investir mais financeiramente por isso, o que analisando o desempenho de funcionamento a longo prazo, nem sempre a sentença é verdadeira. Esse estudo se baseia na análise técnica e financeira de sistemas fotovoltaicos de grande porte com duas diferentes tecnologias, mostrando como resultado final que a tecnologia de microinversor e otimizadores denominada MLPE existente no mercado hoje não é o que demanda maior investimento quando se olha para o *Return Over Investment* (ROI) a longo prazo.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

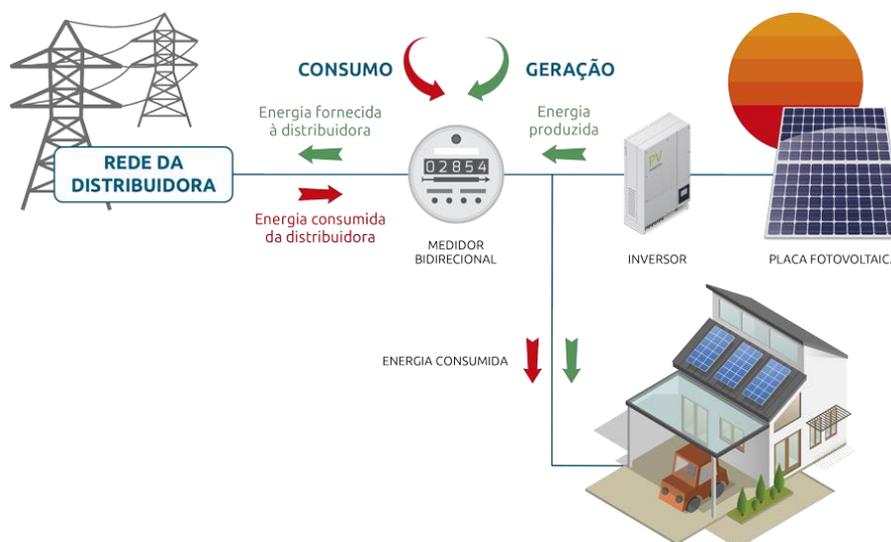
### 2.1 Sistema fotovoltaico

O sistema gerador fotovoltaico é composto por 2 equipamentos fundamentais para o seu correto funcionamento, que são: os módulos fotovoltaicos e o inversor. Juntos, esses componentes são capazes de transformar a energia proveniente do sol, em energia elétrica. A conversão ocorre da seguinte forma descrita nos parágrafos a seguir.

Os módulos são responsáveis por captar os fótons que, ao atingir as células fotovoltaicas, causam o desprendimento de elétrons dos átomos da célula, fazendo com que haja um fluxo de elétrons que gera a corrente elétrica. Esse efeito relatado por Edmond Becquerel em 1839 é conhecido como efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica não armazena energia, ela mantém esse movimento de elétrons enquanto houver incidência de luz sobre sua superfície gerando a corrente que por sua vez desce por ligação entre os módulos e condutores ao inversor fotovoltaico (PINHO e GALDINO, 2014).

Quando a corrente gerada pelas células constituintes dos módulos fotovoltaicos chega ao aparelho denominado inversor, há uma transformação dessa corrente que vem na forma contínua (CC) para a forma alternada (CA), que é a utilizada nas residências e estabelecimentos, como ilustrado na Figura 1. O papel do inversor, além dessa conversão, é também proteger o circuito que entra e sai por ele através de dispositivos de proteção que entram em ação quando houver qualquer anomalia no sistema. Essa energia que passa pelo inversor é enviada a rede de distribuição que faz a compensação da energia gerada e consumida pela unidade consumidora.

Figura 1 - Esquemática de um sistema fotovoltaico *on-grid*



Fonte: Inovacare Solar (2021).

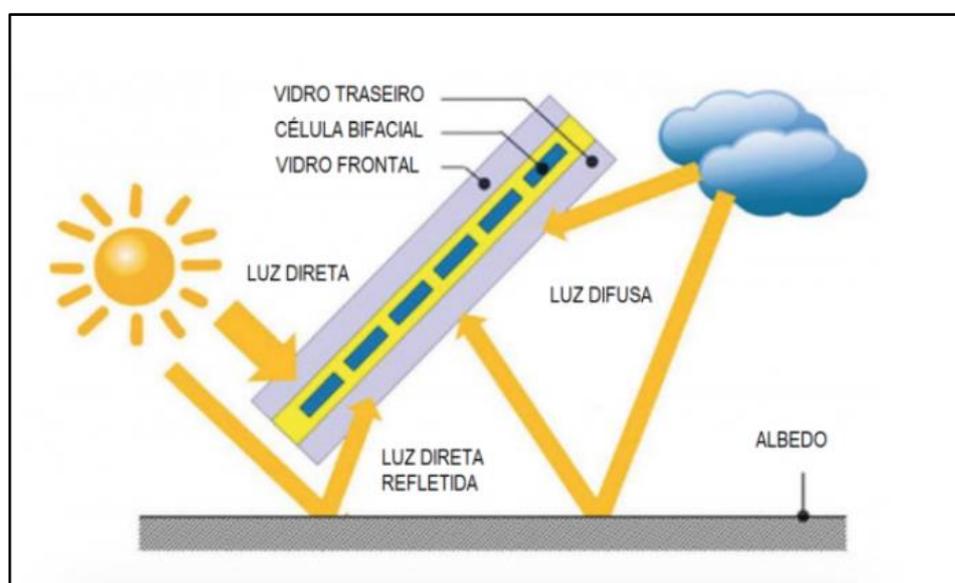
## 2.2 Principais tecnologias de módulos fotovoltaicos

Os tópicos a seguir mostram as principais tecnologias empregadas em módulos fotovoltaicos no cenário de mercado atualmente.

### 2.2.1 Bifaciais

Os módulos bifaciais são compostos por duas faces constituídas por células solares bifaciais que geram energia em ambos os lados quando instalados nas condições ideais. Para que haja geração de energia na parte traseira do módulo, é necessário que alguns requisitos sejam atendidos, como inclinação do módulo em relação ao solo, pitch, altura da estrutura de fixação, tipo de solo existente e o albedo. A Figura 2 representa o processo de captação de luz por esses módulos.

Figura 2 - Captação de luz pela bifacialidade do módulo

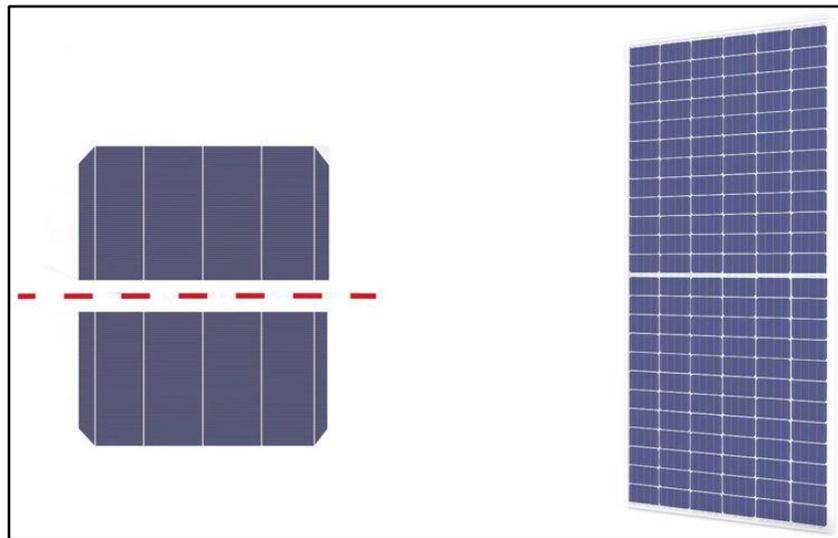


Fonte: Canal Solar (2021).

### 2.2.2 Half Cell

Os módulos fotovoltaicos denominados *half cell* são constituídos por células divididas ao meio no layout retangular como mostrado na Figura 3, ao invés de quadrados como os convencionais. Esse corte ao meio possibilita um aproveitamento melhor da potência do painel, tornando-o mais eficiente e mantendo a mesma dimensão padrão.

Figura 3 - Módulo fotovoltaico com células cortadas ao meio



Fonte: Canal Solar (2021).

Essa tecnologia de corte ao meio da célula, permite que a corrente seja metade do que normalmente se passa, uma vez que a potência elétrica depende do quadrado da corrente, ela é diretamente afetada diminuindo o estresse elétrico do material e possibilitando um aumento da vida útil.

Outra característica dessa tecnologia é que com a corrente reduzida pela metade, tem-se a diminuição das perdas ôhmicas em  $\frac{1}{4}$  do que seria (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Dado que pela Lei de Ohm, a potência é:

$$P = R \times i^2 \quad (1)$$

Onde:

$P$  - Potência

$R$  - Resistência

$i$  - Corrente elétrica

Com a célula dividida, esse cálculo passa a ser:

$$P = R \times (i/2)^2 = R \times (i^2/4)$$

Com a corrente reduzida pela metade e a individualização dos circuitos das células, temos uma melhor dissipação de calor e menos danos com *hotspots* e efeitos de corrente reversa.

### 2.2.3 Monocristalinos

Os módulos fotovoltaicos monocristalinos são compostos por silício em lingotes de forma homogênea como mostrado na Figura 4, com *wafers* mais puros do que o policristalino, essa pureza pode ser identificada imediatamente na cor das células, que possuem coloração escura indicando o grau de pureza do silício. Esses módulos são unificados em menos cristais, fazendo com que a célula seja mais eficiente e gere mais energia ocupando menos espaço. Sua eficiência já ultrapassa a marca de 21%, dispondo cada vez mais de tecnologias com potência acima de 600 W.

Figura 4 - Processo de fabricação do silício monocristalino



Fonte: Canal Solar. (2021)

## 2.3 Motivos de perdas de geração em sistemas fotovoltaicos

Nos sistemas fotovoltaicos, tem-se as chamadas perdas por *mismatch* ou perdas por incompatibilidade entre os módulos. Essas perdas ocorrem por diferença de geração que força o MPPT a se nivelar ao módulo de menor geração para operar corretamente. Os principais causadores de perdas de geração de energia por *mismatch* são indicados a seguir.

### 2.3.1 Diferenças de fabricação

Assim como nas demais áreas de fabricação das indústrias, os painéis fotovoltaicos de um mesmo lote não são 100% idênticos, cada um tem sua própria digital de fabricação e há diferenças que interferem na potência de saída desses equipamentos. Todos os módulos têm uma tolerância de fabricação que pode variar para diferentes lotes. No processo de fabricação, como representado na Figura 5, vários testes são realizados para identificar possíveis falhas nesses equipamentos, e metrificar os parâmetros adequados de entrada e saída de potência.

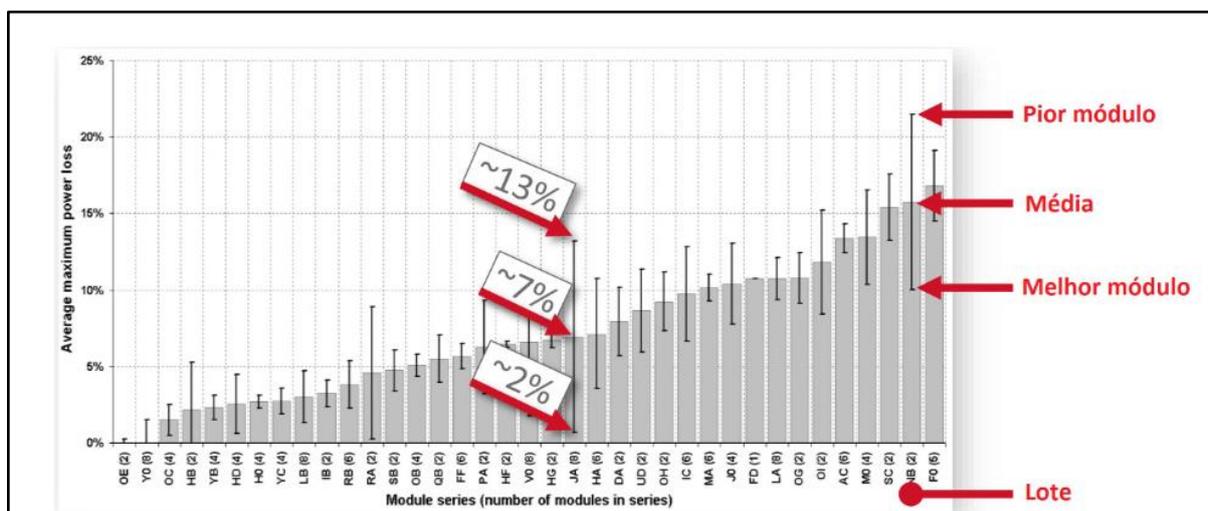
Figura 5 - Fabricação de módulos fotovoltaicos



Fonte: Amici (2021).

### 2.3.2 Degradação desigual dos módulos

Todo e qualquer módulo fotovoltaico sofre degradação ao longo da vida útil do sistema, e essa degradação não é uniforme para todos os módulos do sistema, visto que não funcionam no seu MPP (*Maximum Power Point*) durante esse período estimado de produção. Essa degradação pode chegar a cerca de 20% do desempenho esperado do equipamento e varia de módulo para módulo, por causa das diferenças de fabricação e fatores externos que podem vir a afetar a sua constituição como exemplificado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Percentual de perda de energia por *mismatch* em módulos fotovoltaicos

Fonte: Ecori Energia Solar.

### **2.3.3 Sujidade**

A deposição de matéria sólida na superfície dos módulos como poeira, excrementos de animais, neve ou outros elementos, causam a perda de energia na produção do sistema fotovoltaico, uma vez que haverá o impedimento da luz solar atingir as células, e assim não se prosseguir o ciclo para o efeito fotovoltaico.

### **2.3.4 Sombreamento nos módulos**

As perdas ocasionadas por sombreamento são as mais comuns encontradas pelas empresas que fazem a instalação do equipamento, e esse fator é extremamente importante para o correto dimensionamento do sistema. O sombreamento é previsível, quando causado por árvores ao redor, postes, antenas, prédios, pela própria arquitetura do sistema e até mesmo por módulos adjacentes obscurecendo os demais. Esse sombreamento também pode ser imprevisível, quando algo cai em cima de um módulo como folhas, excrementos de pássaros, nuvens e demais fatores (SANTOS; MIGLIANO, 2020).

### **2.3.5 Danos de transporte**

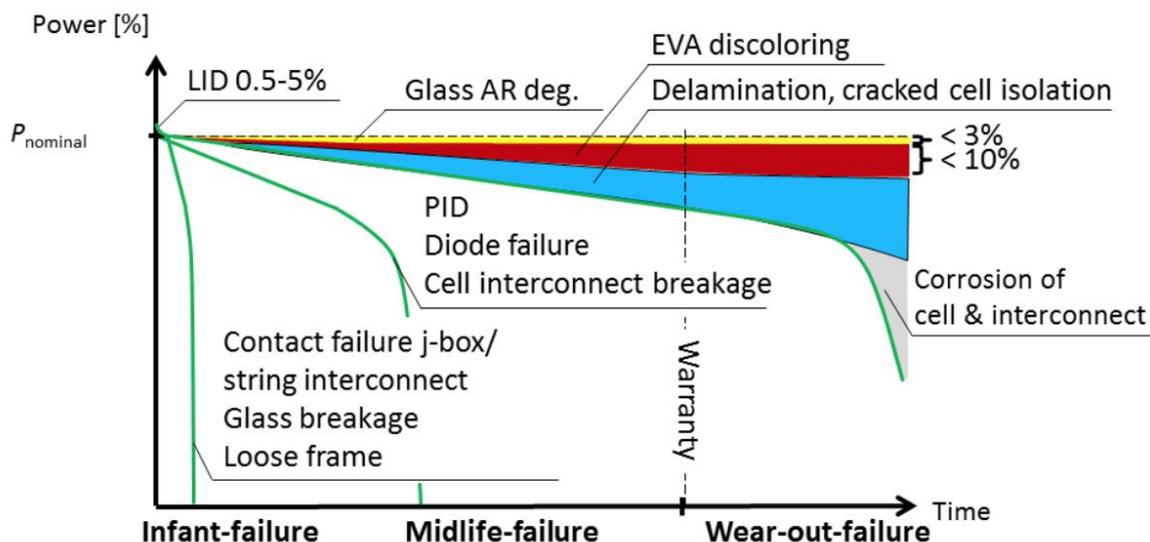
As células dos módulos fotovoltaicos são materiais sensíveis e frágeis, sendo necessário um cuidado desde a fabricação, transporte até a instalação dos módulos para evitar microfissuras nestes, pois uma vez criadas essas microfissuras, o equipamento passa a apresentar falhas ou hotspots, comumente conhecido como pontos quentes, que causam aquecimento pontual na área do painel. O ponto quente ou *hot-spot* é caracterizado como um fenômeno de falha que consiste no aquecimento generalizado da célula fotovoltaica ou apenas de uma porção da célula que fica sujeita a uma temperatura superior à das demais células que compõem o circuito em série (ANJOS, 2016).

### **2.3.6 Delaminação**

A delaminação é caracterizada como a perda da aderência entre as camadas do módulo, essa falha pode ocorrer pela má laminação no processo de fabricação, má qualidade do material ou até mesmo durante a vida útil do equipamento. Essa ruptura entre os elementos pode causar perdas por dissipação e contato de partes vivas do equipamento com a estrutura. Esse fator de perda de geração geralmente é ocasionado em condições de exposição do sistema a altas temperaturas ou grande umidade. Quando a barreira de proteção é rompida, a parte elétrica do equipamento sofre maior degradação afetando diretamente na eficiência e geração de energia.

O Gráfico 2, especificamente na área azul, mostra como a falha por delaminação afeta na degradação de potência do módulo.

Gráfico 2 - Fenômenos que causam degradação em módulos fotovoltaicos



Fonte: Amara Solar Renovables (2020).

## 2.4 Inversores e microinversores

Neste tópico são abordadas as principais tecnologias existentes no mercado fotovoltaico de inversores solares.

### 2.4.1 Microinversores

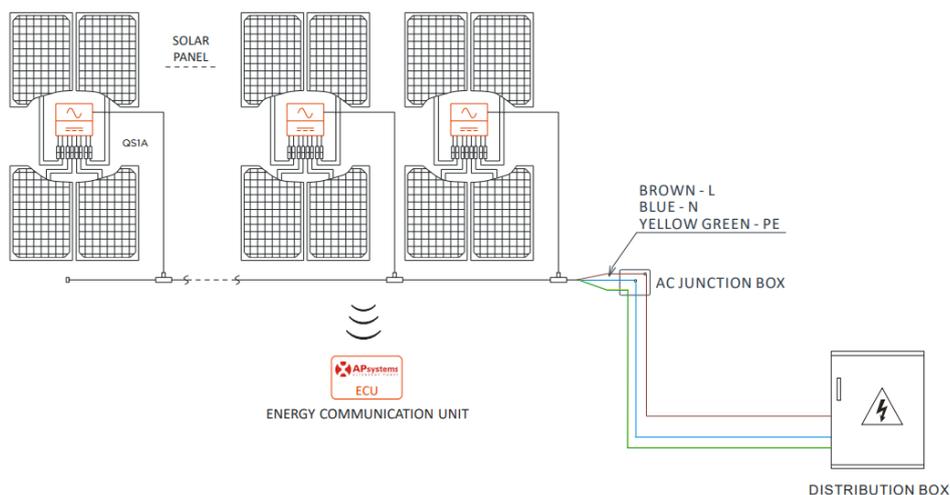
Classificado como tecnologia MLPE, esse equipamento tem o intuito de transformar a corrente contínua que vem dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, que é a forma utilizada pelas residências, estabelecimentos e pela concessionária de energia.

Existe uma diferença notável com os inversores convencionais que é o MPPT ou rastreamento do ponto de máxima potência do sistema. Todos os inversores possuem MPPTs, mas diferem em suas quantidades de acordo com cada tecnologia.

No microinversor, tem-se o MPPT a nível de módulo, ou seja, existe um para cada módulo ou a cada dois módulos. Nos inversores convencionais tem-se um para cada *string*, ou seja, um para cada fileira de painéis em série.

Com essa modularidade como mostrada na Figura 6, é possível rastrear o ponto de máxima potência de cada painel separadamente, o que ocasiona uma individualização na geração de energia, monitoramento cirúrgico do sistema e diminuição das perdas por *mismatch*.

Figura 6- Diagrama de ligação do microinversor QS1A

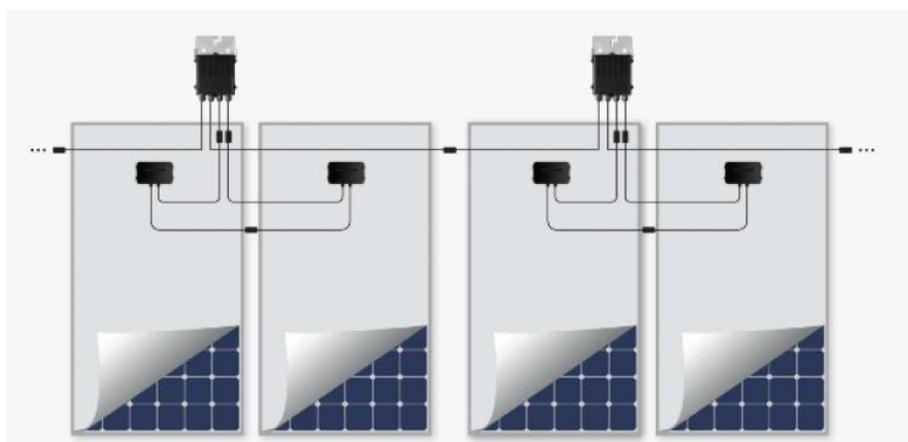


Fonte: APsystems® (2021).

### 2.4.2 Inversores simplificados com otimizadores de potência

Outra categoria dessa linha de equipamentos são os chamados inversores simplificados com otimizadores de potência. Essa tecnologia consiste em um inversor de parede que tem a função de transformar a corrente contínua que vem das *strings* em corrente alternada. Com esse inversor tem-se acoplados junto aos módulos os otimizadores de potência que completam esse sistema, esse otimizadores tem a função de rastrear o Ponto de Máxima Potência - MPP dos módulos individualmente, separando a geração em um ou dois módulos em série em cada otimizador como mostrado na Figura 7, além disso, esse dispositivo tem integrado a ele o sistema de *rapid shutdown* ou desligamento rápido, que na identificação de alguma perturbação na instalação, diminui a tensão de operação para uma tensão de segurança que pode chegar a 1 V, evitando assim quaisquer danos ao sistema.

Figura 7 - Esquema de ligação do otimizador de potência com os módulos



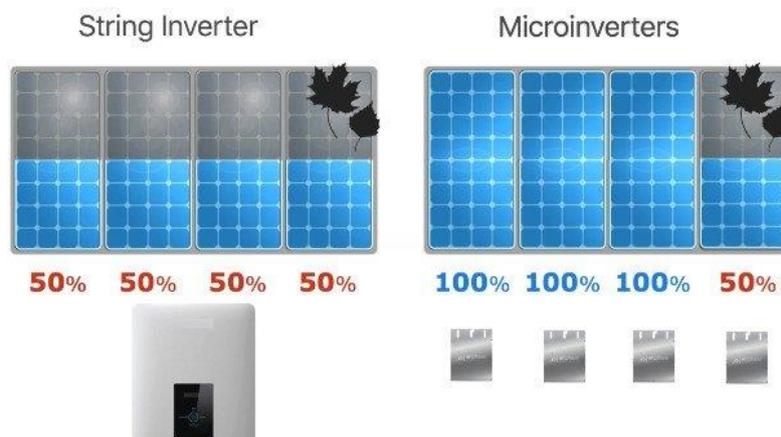
Fonte: Ecori Energia Solar (2019).

### 2.4.3 Inversores *string*

Os inversores convencionais ou de parede são denominados *string*, pois o rastreamento da faixa de potência dele é a nível do conjunto de módulos em uma fileira conhecida como a *string* ou a nível único do sistema. Essa topologia de inversor mantém a tensão do sistema em um nível alto, uma vez que são colocados mais módulos em série, somando assim a tensão que passa no circuito.

O inversor *string* tem a função de fazer a transformação da corrente contínua (CC) do sistema em corrente alternada. Esse modelo se diferencia da tecnologia MLPE por não ter o rastreamento individualizado dos painéis, o seu nível de monitoramento não é modular, mas rastreia o conjunto e nivela o sistema pelo módulo que está gerando menos como observado na Figura 8, para que não gere estresse elétrico no arranjo.

Figura 8 - Diferença entre inversor string e MLPE



Fonte: Portal Energia (2018)

## 2 METODOLOGIA

Este capítulo discorre sobre a metodologia utilizada para o monitoramento da geração de cada sistema, assim como a aplicação de uma planilha em excel que calcula o retorno financeiro de cada sistema durante sua vida útil. Para análise da diferença de geração de energia e recurso financeiro investido para diferentes tecnologias, foram monitorados dois sistemas fotovoltaicos *on grid* na cidade de Fortaleza-CE durante 3 meses.

Os sistemas foram diferenciados pelo inversor usado em cada um deles, o sistema *string* denominado neste trabalho como sistema *string 01* é composto por um inversor de corrente convencional *string*, e o segundo sistema denominado como sistema MLPE *02* é composto por um inversor simplificado com otimizadores de potência.

### 3.1 Discriminação dos equipamentos utilizados em cada sistema

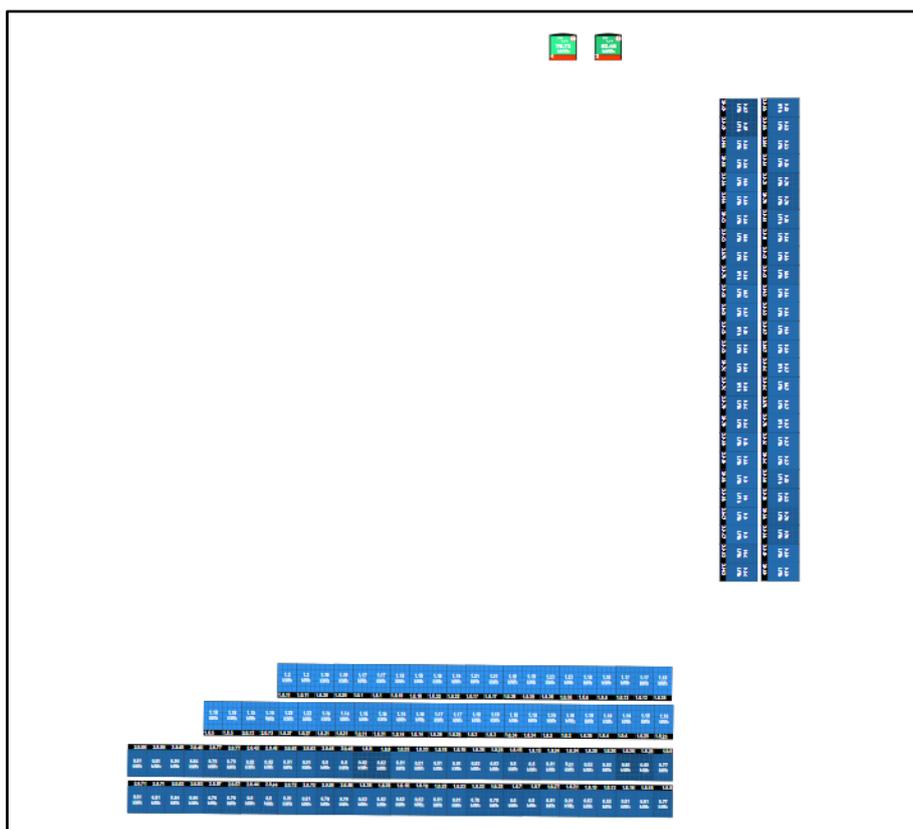
Foi realizado o monitoramento de ambos os sistemas durante 3 meses e obtidos os resultados da geração de energia de cada sistema separadamente. Abaixo encontram-se as características de cada instalação acompanhada, assim como a localização.

O sistema *string 01* está localizado na Rua Joaquim Felício, Messejana, em Fortaleza-CE e é composto por 01 inversor convencional do fabricante Canadian de 60 kW de potência nominal, totalizando 60 kW de inversor e 69,76 kWp com módulos RESUN 545W instalado em telhado metálico.

O sistema MLPE *02* está localizado na Rua Senador Pompeu, Centro, Fortaleza-CE, como apresentado na Figura 9, é composto por 03 inversores simplificados com otimizadores de potência do fabricante SolarEdge de 20,1 kW de potência nominal cada, totalizando 60,3 kW de inversor e 70,20 kWp com módulos DAH 450 W instalado em telhado metálico.

Ambos os sistemas estão instalados em telhado metálico, embora não se encontre elementos que possam causar sombreamento, existem as perdas por temperatura, uma vez que o metal utilizado nesses telhados esquenta consideravelmente.

Figura 9 - Layout do sistema de monitoramento da SolarEdge



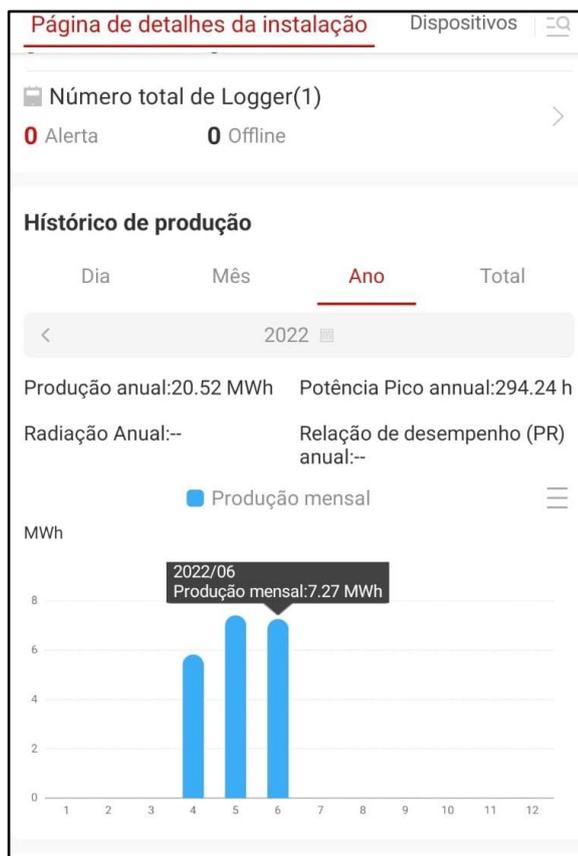
Fonte: SolarEdge (2020).

### 3.2 Análise da geração de energia através do sistema de monitoramento

Foi acompanhado o desempenho dos sistemas utilizados através do sistema de monitoramento de cada fabricante dos inversores, uma vez que a empresa que realizou a instalação tem acesso aos dados do sistema no primeiro dia de geração por app ou site próprio disponibilizado.

Para o sistema *string 01* foi utilizado o aplicativo de monitoramento da *Canadian CSI Cloud Pro*® como mostrado no Gráfico 3, foram analisados os dados de geração dos meses referente a abril, maio e junho de 2022. Para o mês de junho foi considerado a geração até o dia 29 de junho.

Gráfico 3 - Monitoramento dos últimos 3 meses do inversor Canadian Solar



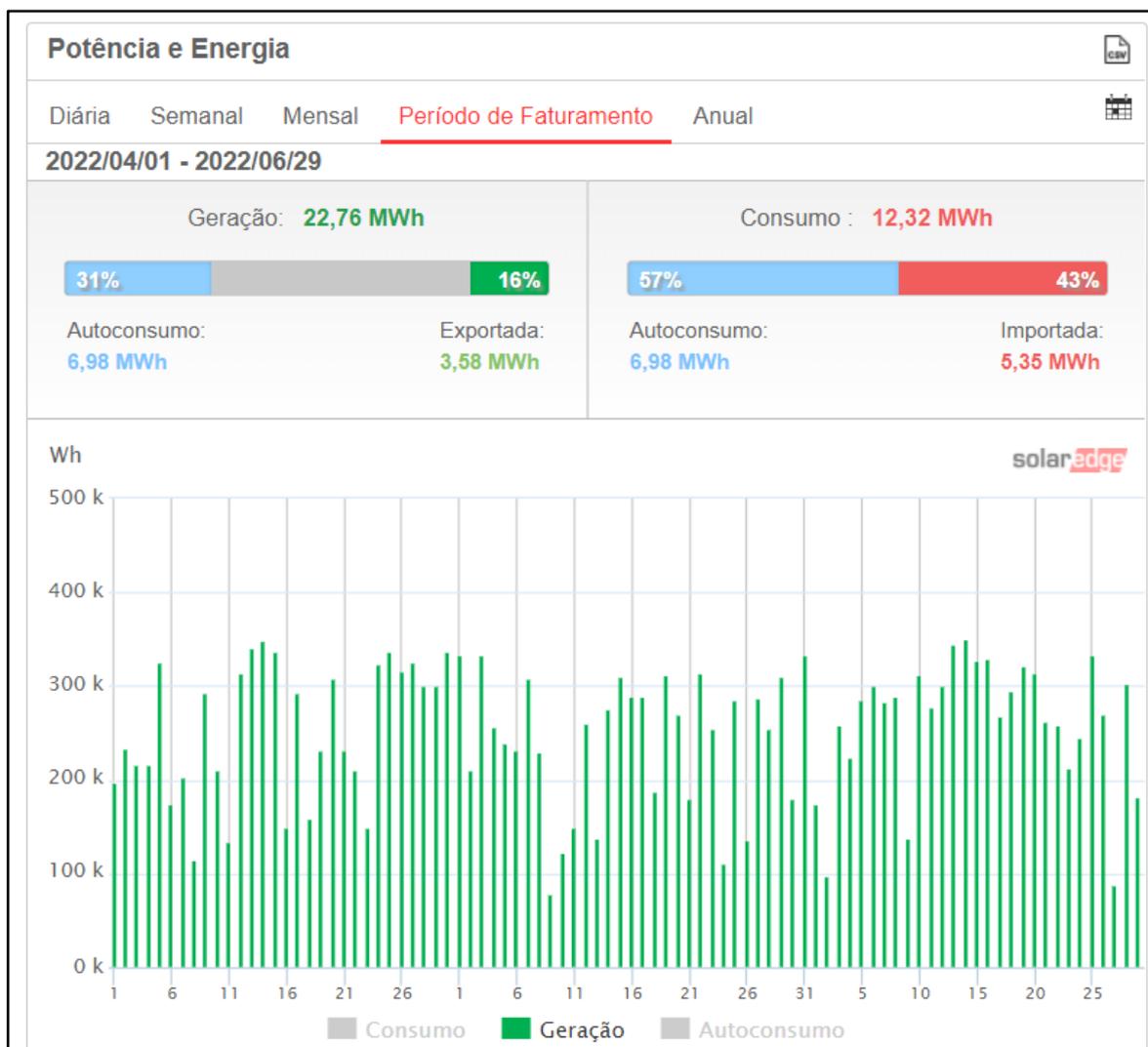
Fonte: Autora (2022).

Foi constatado que nos últimos 3 meses de geração do sistema com inversor string, teve o total de 20,52 MWh, uma média de 6,84 MWh/mês, equivalente a uma geração de 6.840 kWh/mês. Nota-se que no mês de abril a geração foi bem menor comparada aos demais meses, visto que nesse período são os meses mais chuvosos no estado, é esperado que a geração seja menor que os demais.

Levando em consideração que o sistema acima é novo e tem 3 meses de funcionamento, temos poucas perdas de geração por *mismatch*, principalmente ocasionada pela degradação dos módulos, pois a diferença da potência de saída é pequena.

Para o sistema MLPE 02 foi acompanhado o monitoramento através do aplicativo SolarEdge Monitoring como mostrado no Gráfico 4 dos meses de abril, maio e junho de 2022, considerando o mês de junho somente até o dia 29, como o sistema *string*.

Gráfico 4 - Monitoramento dos últimos 3 meses do inversor solaredge



Fonte: Autora (2022).

Foi constatado que nos últimos 3 meses de geração do sistema com inversor simplificado com otimizadores de potência, teve o total de 22,76 MWh, uma média de 7,58 MWh/mês, equivalente a uma geração de 7.580 kWh/mês. Mesmo com a potência de 0,44 kWp acima da potência do inversor convencional, esse sistema foi instalado em 2020, portanto, os módulos fotovoltaicos já têm perdas por degradação consideráveis visto o tempo de vida útil já passado.

### 3.2 Análise financeira de cada sistema durante a vida útil

Para a análise financeira de dois sistemas fotovoltaicos estudados, foi utilizada uma planilha no excel que calcula o *Levelized cost of electricity* (LCOE), conhecido como

custo nivelado de energia. Através dessa ferramenta é possível metrificar o quanto cada solução escolhida vai custar no fim da vida útil para o consumidor.

Foi modificado na planilha todas as abas em amarelo, iniciando com a porcentagem de geração a mais com a solução com MLPE, que foi calculada nos três meses de monitoramento em torno de 10%, mas podendo chegar até 25% segundo estudo realizado por Souza (2019).

Em seguida foi inserida a degradação anual dos módulos, que é encontrada no datasheet de cada fabricante, como os que foram utilizados têm o mesmo percentual de 0,5% ao ano, foi esse o valor usado para o estudo. Na aba de produção, foi inserido o valor utilizando a média mensal encontrada com o monitoramento, visto que o sistema com MLPE nos 3 meses gerou 22,76 MWh, temos uma média de 7,58 MWp, multiplicando por 12 meses referente ao ano, temos o valor de 90,96, MWh/ano. Foi usado esse mesmo raciocínio para o sistema convencional e encontrado o valor de 82,08 MWh/ano. Para a tarifa de energia, foi utilizado o valor de R\$ 0,85 para fins de análise como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Cálculo do custo e receita do sistema fotovoltaico

CÁLCULO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA										
Geração adicional com MLPE	10%									
Degradação anual dos módulos	0,50%									
<b>Ano</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Produção (MWh) MLPE	90,96	90,51	90,05	89,60	89,15	88,71	88,27	87,82	87,38	86,95
Produção (MWh) Convencional	82,08	81,67	81,26	80,85	80,45	80,05	79,65	79,25	78,85	78,46
<b>Total 25 anos</b>	<b>Diferença</b>									
Produção (MWh) MLPE	2.142,65	209,18								
Produção (MWh) Convencional	1.933,47									
<b>Tarifa (R\$/kWh)</b>	<b>0,85</b>									
<b>Total 25 anos</b>	<b>Diferença</b>									
Receita (R\$) MLPE	1.821.251,94	177.800,32								
Receita (R\$) Convencional	1.643.451,62									
<b>(%)Aumento da tarifa no ano</b>	<b>0%</b>									
<b>Ano</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Receita (R\$) MLPE	77.316,00	76.929,42	76.544,77	76.162,05	75.781,24	75.402,33	75.025,32	74.650,19	74.276,94	73.905,56
Receita (R\$) Convencional	69.768,00	69.419,16	69.072,06	68.726,70	68.383,07	68.041,16	67.700,95	67.362,44	67.025,63	66.690,50
<b>Total 25 anos</b>	<b>Diferença</b>									
Receita (R\$) MLPE	1.821.251,94	177.800,32								
Receita (R\$) Convencional	1.643.451,62									

Fonte: Autora (2022).

Com a inserção desses dados, foi calculado o percentual de geração durante os 25 anos que é a média dada pelos fabricantes para a vida útil e desempenho dos módulos fotovoltaicos. Com a instabilidade da porcentagem de aumento da tarifa de energia ano a ano, não foi considerado nesse cálculo o aumento, caso tivesse sido inserido, o valor da receita seria maior,

como estamos analisando a diferença de receita entre uma tecnologia e outra, essa informação pode ser desconsiderada. A aba de produção e receita se estende até os 25 anos, como a tabela se estendeu além da tela, não foi possível colocar integral.

O cálculo de produção ao longo do período foi realizado considerando o valor em MWh anual menos a degradação dos módulos a cada ano, assim tendo a geração com as perdas por degradação inserido. Já o cálculo da receita, foi realizado considerando a geração anual multiplicada pela tarifa convencional.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados obtidos do monitoramento, foi possível verificar um aumento de geração maior com MLPE comparado ao sistema com inversor *string*, mesmo o sistema com inversor e otimizador conter 0,44 kWp a mais que o convencional, o sistema estava instalado desde 2020, então tem-se uma perda e geração por degradação dos módulos em torno de 1%, somando-se 0,5% a cada ano, tem-se a compensação da geração por essa razão tornando os sistemas similares.

Analisando a parte financeira, o LCOE ao fim dos 25 anos de desempenho é calculado levando em consideração o capex e opex do sistema, ou seja, além dos custos relacionados ao capital investido para obtenção dos kits e instalação, temos também os custos operacionais de manutenção do mesmo, e foi levado em consideração ao calcular o custo nivelado de energia das diferentes tecnologias.

Para o sistema com tecnologia MLPE, foi inserido levado em consideração o preço do kit (módulo e inversor), a troca de inversor em 12 anos, pois o equipamento já vem com garantia standard de 12 anos e o custo com Operação e Manutenção (O&M), que por ter individualização na geração, é possível verificar pelo próprio monitoramento quando houver o problema e qual foi o equipamento que apresentou defeitos, facilitando a detecção e diminuindo os custos com manutenção e visitas para testes.

A inserção de dados do inversor *string* foi feita utilizando o valor do kit (inversor e módulo) obtido para instalação, a troca de inversor em 10 anos, uma vez que o equipamento vem com garantia standard de 10 anos e o custo com O&M que se mostra maior que o sistema com MLPE, pois como o monitoramento não é a nível de módulo, a detecção de falhas se torna mais onerosa, necessitando de testes mais profundos e in loco.

O cálculo de O&M foi feito com valor de referência usado no mercado que gira em torno de 1,5 a 3% do capex do sistema, para fins de análise foi utilizado o valor de 2%. A diferença entre o MLPE e o *string* é estimada em torno de 20% mais barata, por ter o monitoramento mais cirúrgico e rápido. A Figura 11 mostra o resumo dos cálculos.

Figura 11 - Cálculo do LCOE

<b>RESUMO DOS CÁLCULOS</b>				
	<b>MLPE</b>	<b>Inversor string</b>	<b>Diferença</b>	<b>%</b>
<b>Potência sistema (kWp)</b>	70,20	69,76		
<b>Preço do Kit (R\$)</b>	240.740,00	204.629,00	36.111,00	17,65%
<b>Troca Inversor (R\$)</b>	32.110,95	25.000,00		
<b>Total Compra + Troca (R\$)</b>	272.850,95	229.629,00	43.221,95	18,82%
<b>Energia 1° ano (MWh/ano)</b>	90,96	82,08	8,88	9,76%
<b>Energia 25° ano (MWh/ano)</b>	80,65	72,78	7,87	9,76%
<b>Produção Total em 25 anos (MWh)</b>	2.142,65	1.933,47	209,18	9,76%
<b>Receita Total em 25 anos (R\$)</b>	1.821.251,94	1.643.451,62	177.800,32	
<b>Receita Total em 25 anos + Aumento Tarifa (R\$)</b>	1.821.251,94	1.643.451,62	177.800,32	
<b>O&amp;M Ano (R\$)</b>	3.274,06	4.092,58		
<b>O&amp;M Total em 25 anos (R\$)</b>	81.851,60	102.314,50		
<b>Total Despesas (R\$)</b>	354.702,55	331.943,50		6,86%
<b>LCOE (R\$/kWh)</b>	0,1655	0,1717		-3,58%

Fonte: Autora (2022)

Verificou-se que o sistema com MLPE tem o custo em reais por kWh menor que o sistema *string*, custando R\$ 0,1655 e o sistema tradicional custando R\$ 0,1717. Isso mostra que ao longo dos 25 anos de vida útil o sistema vai gerar mais energia com menor preço utilizando a primeira tecnologia do que com a segunda, mesmo com um custo para obtenção do sistema maior.

#### 4 CONCLUSÃO

Com os dados obtidos no estudo realizado, foi possível comprovar em termos técnicos e financeiros que a tecnologia com otimizadores de potência da topologia MLPE, mesmo tendo um custo a curto prazo maior, se torna mais barata e mais eficiente do que a opção com inversor convencional, quando se leva em consideração a vida útil total estimada de geração.

Em termos técnicos tem-se um ganho de energia aproximado de 10% comparando a produção nos últimos 3 meses estudados e a projeção para 25 anos. Em termos financeiros, tem-se uma diferença de 3,58% do custo de energia entre as soluções estudadas, sendo a tecnologia a nível de módulo mais barata que a nível de sistema.

Para o consumidor e as empresas que prestam serviço de instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, é evidente que a longo prazo a topologia MLPE é mais vantajosa para ambas as partes, por se tratar de equipamentos mais avançados e com valores para obtenção semelhantes. Contudo, é necessário sempre levar em consideração o local de instalação, as condições de telhado e sombreamento para poder se optar pela melhor solução.

Com esse estudo, pode-se notar que plantas de energia solar cada vez maiores são capazes de ser alocadas opções tecnológicas de última geração sem pesar demais o investimento ao consumidor.

## REFERÊNCIAS

AMARA SOLAR RENOVBLES S.L.. **Enemigos de la fotovoltaica – delaminación**. 2020. Disponível em: <https://www.amara-e.com/enemigos-fotovoltaica-delaminacion/>. Acesso em: 28 jun. 2022.

AMICI, Eduarda. **BYD Energy do Brasil irá lançar módulos fotovoltaicos com 450 MW de potência**. 2021. Energia Hoje. Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/byd-energy-do-brasil-ira-lancar-modulos-fotovoltaicos-com-450-mw-de-potencia/>. Acesso em: 21 jun. 2022.

ANJOS, Ruben Serra dos. **Análise e simulação de pontos quentes em painéis fotovoltaicos**. 2016. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2016. Cap. 3.

APSYSTEMS LATAM. **Instalação - Manual do usuário**. 2021. Disponível em: [https://latam.apsystems.com/wp-content/uploads/2021/11/4302117102\\_APsystems-Microinverter-QS1A-For-LATAM-User-manual\\_Rev1.4\\_PT\\_2021-11-09-1.pdf](https://latam.apsystems.com/wp-content/uploads/2021/11/4302117102_APsystems-Microinverter-QS1A-For-LATAM-User-manual_Rev1.4_PT_2021-11-09-1.pdf). Acesso em: 28 jun. 2022.

ECORI ENERGIA SOLAR. **Esquema Ligação P730**. 2019. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/6c363-esquema-de-ligacao-p700.jpeg>. Acesso em: 28 jun. 2022.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física - Eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 812 p.

INOVACARE SOLAR (São Paulo). **Sistema on-grid (conectado à rede)**. Disponível em: <https://inovacare.solar/tecnologia>. Acesso em: 21 jun. 2022.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-Graduação Lato-Sensu em Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras - Minas Gerais, 2004. Cap. 2.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.

PORTAL SOLAR (São Paulo). **Célula fotovoltaica: tudo o que você precisa saber**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>. Acesso em: 07 jun. 2022.

PRANGE, Nathanael Günter. **Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Baseados em Silício Monocristalino e Policristalino.** 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/13040/1/An%c3%a1lise%20de%20Desempenho%20de%20Sistemas%20Fotovoltaicos%20Baseados%20em%20Sil%c3%adicio%20Monocristalino%20e%20Policristalino.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.

REIS, Pedro. Portal Energia. **Como escolher o melhor inversor para o Sistema Solar da minha casa?** 2018. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/como-escolher-o-melhor-inversor-para-o-sistema-solar-da-minha-casa/>. Acesso em: 28 jun. 2022.

SANTOS, Juan Carlos Alves; MIGLIANO, Antônio Carlos da Cunha. **Estudo do sombreamento e intempéries para melhor aproveitamento e eficiência energética dos painéis fotovoltaicos.** 2020. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/dialogos/article/view/943/921>. Acesso em: 28 jun. 2022.

SOUZA, João Paulo de. (São Paulo). Ecori Energia Solar. **Módulos Fotovoltaicos - Perdas por Mismatch em Sistemas Fotovoltaicos.** 2019. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos--perdas-por-mismatch-em-sistemas-fotovoltaicos>. Acesso em: 16 abr. 2022.

SOUZA, João Paulo de. **Tecnologia MLPE - como os microinversores se tornaram referência no mercado fotovoltaico.** 2019. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/tecnologia-mlpe--como-os-microinversores-se-tomaram-referencia-no-mercado-fotovoltaico#:~:text=que%20merecem%20aten%C3%A7%C3%A3o%3A-,1.,2..> Acesso em: 30 jun. 2022.

TECHNOLOGIES, Solaredge. **Monitoramento do sistema de produção, cliente Camelo.** Disponível em: <https://monitoring.solaredge.com/solaredge-web/p/site/2278396#/dashboard>. Acesso em: 28 jun. 2022.

THIAGO MINGARELI CAVALINI (São Paulo). Canal Solar. **Módulos bifaciais com PVsyst: fatores a considerar.** 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/modulos-bifaciais-com-pvsyst-fatores-a-considerar/>. Acesso em: 23 fev. 2022.

VILLALVA, Marcelo. **Módulos fotovoltaicos half-cell: fique por dentro da tecnologia half-cell e como ela pode potencializar a geração de energia.** 2019. Canal Solar. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/modulos-fotovoltaicos-half-cell/#:~:text=A%20tecnologia%20half%2Dcell%20consiste,custo%20de%20um%20m%C3%B3dulo%20comum..> Acesso em: 04 maio 2022.