

# INSTALAÇÃO DE PLANTA FOTOVOLTAICA EM UM RESTAURANTE COM USO DE *MODULE-LEVEL POWER ELECTRONICS*

Eng. Cássio Maciel Amanajás – cassioamanajas@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Dep. de Engenharia Elétrica

**Resumo.** O presente artigo aborda uma análise técnica da instalação de um sistema de geração fotovoltaica (FV) conectado à rede elétrica empregando a tecnologia MLPE (Module-Level Power Electronics), conhecido como Otimizador de Potência, em um restaurante em Fortaleza, Ceará, com uma área disponível de 201,2 m<sup>2</sup>. Foi optado pela tecnologia MLPE devido aos benefícios, como o aumento do rendimento em situações de sombreamento parcial, redução de perdas devido à divergência e monitoramento individualizado por módulo. O restaurante apresenta um consumo médio de 3.000 kWh/mês, totalizando 36.000 kWh/ano. Foi utilizado o software SolarEdge Designer para o dimensionamento, permitindo modelagem completa do projeto e análise detalhada das perdas. Foram instalados 56 módulos FV de 400W, totalizando 22,4 kWp de potência, além de 28 otimizadores de potência P110 e um inversor CC/CA de 27,6 kW. Foi realizada uma análise da geração de janeiro de 2021, durante a qual o sistema gerou 3,37 MWh. Comparado a um sistema de igual potência com um inversor tradicional Fronius 27 kW, sem tecnologia MLPE, foi notada uma diferença de 21% a mais de geração com a tecnologia MLPE - Otimizador de Potência. Este estudo fornece insights para o setor de energias renováveis, destacando a importância de tecnologias avançadas na otimização do desempenho de sistemas FV conectados à rede elétrica.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Tecnologia MPLE, Otimizador de Potência.

## 1. INTRODUÇÃO

O advento da geração fotovoltaica (FV) teve suas raízes profundamente associadas à corrida espacial travada entre os Estados Unidos da América (EUA) e a União Soviética (URSS). Durante esse período, a busca pela supremacia na exploração da tecnologia espacial foi um objetivo primordial para ambas as nações. Nesse contexto, surgiu a perspectiva de que, se fosse possível enviar um ser humano à Lua, também seria possível controlar a economia global com a mesma tecnologia. A célula FV emergiu como a opção mais viável, dada sua leveza e custo acessível, para fornecer eletricidade aos equipamentos espaciais durante longos períodos de operação. Isso culminou em um aumento significativo nos investimentos em pesquisa e desenvolvimento na área de geração FV (Moehlecke et al., 2014).

No Brasil, a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) surgiu em 2013 como uma instituição nacional, sem fins lucrativos, que congrega empresas que abrangem toda a cadeia de valor do setor FV com operações no território brasileiro. De acordo com dados divulgados pela ABSOLAR, o Brasil atingiu um marco significativo ao superar a marca histórica de 33 GW de capacidade operacional FV (Fig. 1), o que corresponde a 15,4% da matriz elétrica brasileira. Esses números abrangem tanto usinas de grande porte, denominadas como geração centralizada, quanto sistemas de menor capacidade instalados em telhados e áreas terrestres, conhecidos como geração distribuída (ANEEL/ABSOLAR, 2023). Essa conquista reforça o crescimento substancial do setor FV no país, demonstrando a relevância e a abrangência dessa fonte de energia tanto em usos de grande escala como em aplicações descentralizadas.

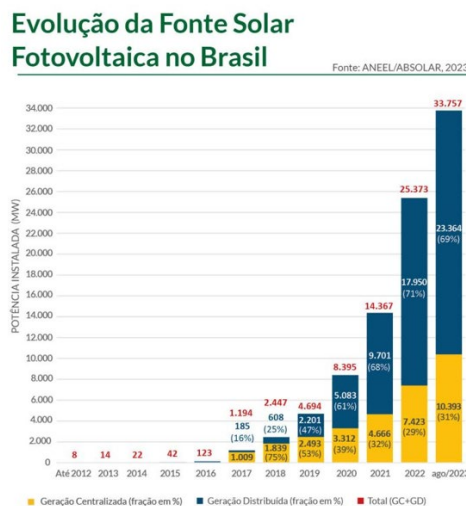


Fig. 1 – Evolução FV no Brasil - Fonte: Adaptado ANEEL/ABSOLAR (2023).

Nos projetos e execução de usinas FV são verificados desafios significativos, que incluem a restrição de espaço em telhados, obstruções devido a edifícios circundantes e a presença de poluição em ambientes urbanos densos. Consequentemente, tem-se buscado ativamente soluções para minimizar as perdas de geração. Entre as alternativas exploradas, destaca-se a crescente adoção da tecnologia de MPLE (*Module-Level Power Electronics*), a qual oferece vantagens como maior flexibilidade na instalação de módulos em diversas orientações e a capacidade de monitorar o desempenho de cada módulo individualmente. O MLPE é segmentado em dois tipos de dispositivos: (i) microinversores e (ii) otimizadores de potência. No Brasil e ao redor do mundo, a implementação dessas tecnologias está ganhando relevância, permitindo uma resposta eficaz aos desafios enfrentados na geração FV. Essas soluções não apenas aprimoram a eficiência dos sistemas, mas também oferecem maior flexibilidade de design e garantem um monitoramento detalhado e em tempo real, tornando-os recursos valiosos na otimização da geração FV.

O propósito do presente artigo é analisar a implantação de um projeto de geração FV utilizando a tecnologia MLPE em Fortaleza, Ceará. Os objetivos específicos compreendem na avaliação técnica da geração FV empregando a tecnologia MLPE; Comparar a geração FV entre um projeto que utiliza um inversor tradicional em cadeia (*string*) e um projeto que emprega a tecnologia MLPE; Abordar as vantagens e desvantagens associadas ao uso da tecnologia MLPE em projetos de geração FV. A estrutura do trabalho é composta por cinco tópicos: 1 – Introdução, com uma breve introdução ao tema, os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho; 2 – Metodologia, com descrição da instalação de um sistema de geração FV com MLPE, o estudo de caso e as etapas utilizadas; 3 – Resultados, com os resultados do projeto desenvolvido e uma comparação com outro sistema de geração FV sem MLPE; 4 – Conclusão; 5 - Referências bibliográficas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Considerações iniciais

O propósito é fornecer uma exposição detalhada sobre a tecnologia MPLE da SolarEdge - Otimizador de Potência, explicando seu funcionamento, bem como as etapas envolvidas no dimensionamento do projeto de um microgerador fotovoltaico. Este gerador possui uma potência nominal de 22,4 kWp, obtida através de 56 módulos FV, cada um com 400 Wp de potência. Este sistema foi projetado para atender às necessidades energéticas de um restaurante localizado em Fortaleza, Ceará, que está interligado à rede elétrica. Na Fig. 2 é ilustrada a posição geográfica desse empreendimento.

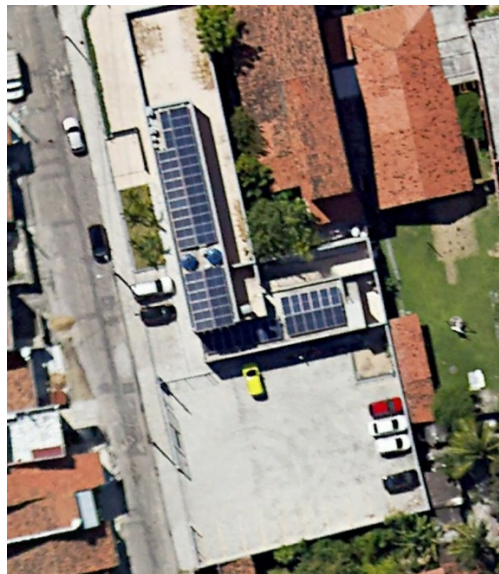
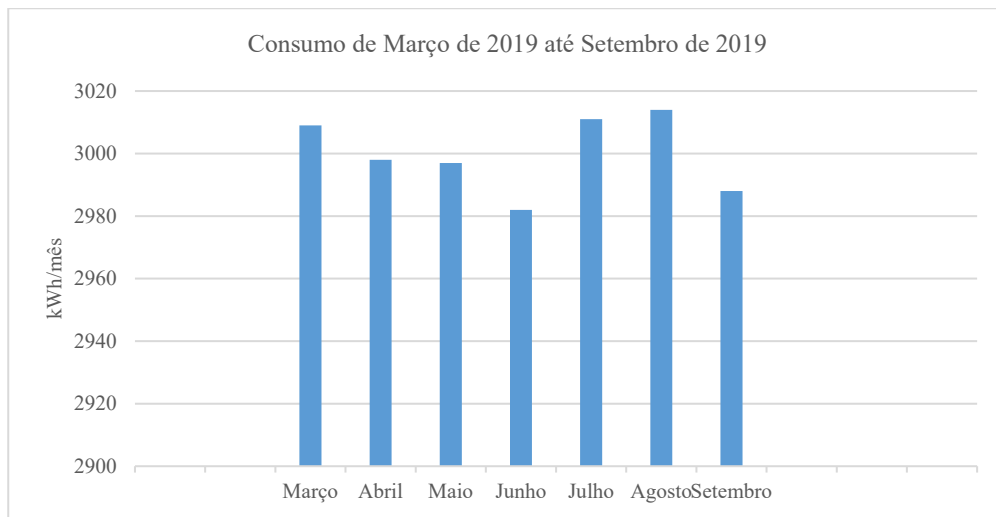


Fig. 2 – Localização da Usina FV  
Fonte: Google (2021).

O projeto foi elaborado com o propósito de produzir 3000 kWh por mês, uma quantia que corresponde à média de consumo energético requerido para atender às necessidades do estabelecimento. Essa estimativa se baseia nos registros de consumo de energia do restaurante, que foram registrados desde a sua inauguração em março de 2019 até o início do projeto FV em setembro de 2019, conforme apresentado no Tab. 1.



Tab. 1 – Consumo de eletricidade em 2019.

Fonte: Adaptado Fatura Enel

Os módulos FV foram implantadas em ambas as lajes do restaurante, cada uma localizada em níveis distintos e com dimensões desiguais. A opção pelo emprego do MLPE Otimizador de Potência se deu em virtude da orientação divergente dos módulos em ambas as lajes, bem como para mitigar os efeitos do sombreamento em uma porção da laje inferior, o qual poderia resultar em uma redução na capacidade de geração de energia.

## 2.2 Módulo FV de 400 W

Um dos componentes essenciais em qualquer projeto de geração FV é o módulo, que desempenha o papel crucial de converter a luz solar em eletricidade de corrente contínua (CC). Para este projeto específico, optou-se por utilizar um módulo composto por 144 células de silício policristalino, sob o modelo HiKu SUPER HIGH POWER POLY PERC MODULE CS3W-400, cada um deles com uma capacidade individual de 400 W. No Tab. 2 são apresentadas as principais características elétricas do módulo FV selecionado para este projeto nas Condições Padrão de Teste (STC).

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (STC)		
Potência Max. Nominal	$P_{max}$	400 W <sub>p</sub>
Tensão no ponto de Max. Potência	$V_{mp}$	38.7 V
Corrente no ponto de Max. Potência	$I_{mp}$	10.34 A
Tensão de circuito aberto	$V_{oc}$	47.2 V
Corrente de circuito aberto	$I_{sc}$	10.90 A
Eficiência do módulo	$\eta$	18.11 %

Tab. 2 – Características elétricas do módulo FV escolhido.

Fonte: Adaptado de Canadian (2018).

## 2.3 Inversor CC/CA SolarEdge.

O inversor desempenha o papel fundamental de receber a eletricidade gerada pelos conjuntos de módulos FV em corrente contínua (CC) e convertê-la em corrente alternada (CA), ajustando simultaneamente as características elétricas, como tensão e frequência, para que sejam compatíveis com os padrões da rede elétrica. Neste projeto, foi selecionado o modelo SE27.6K para essa função específica:

A tecnologia de tensão fixa garante que o inversor esteja sempre operando na sua melhor tensão de entrada, independentemente do número de módulos na *string* ou das condições ambientais. Um receptor de monitoramento de dados patenteado foi integrado ao inversor e agrega dados do rendimento do otimizador de potência de cada módulo FV. Estes dados podem ser transmitidos para a web e acessados via plataforma de monitoramento SolarEdge para análise do rendimento, detecção de falhas e solução de problemas dos sistemas FV (SolarEdge, 2021).

Na Tab. 3 são mostradas as características elétricas e as proteções de entrada do inversor SE 27.6K.

ENTRADA CC		
Máxima Potência-Pico (STC)	35640 @ 380 / 220	w
Máxima Tensão de Entrada	900 @ 380/220	Vdc
Tensão Nominal de Entrada	750 @ 380/220	Vdc
Proteção contra Inversão Polaridade	Sim	
Máxima Eficiência do Inversor	98	%
Detecção de Falha de Isolamento à Terra	700k $\Omega$ Sensibilidade	k $\Omega$
PROTEÇÃO CC		
Seccionadora CC - 2 Polos	1000V / 40A	
DPS CC	DPS Classe 2	
Inversão de polaridade	Sim	
Monitor de falha de isolamento	Sim	
Proteção anti-ilhamento	Sim	

Tab. 3 – Características elétricas da entrada CC e proteção CC do INVERSOR SE 27.6K.  
Fonte: Adaptado de SolarEdge (2019).

Na Tab. 4 são mostradas as características elétricas e as proteções de saída do inversor SE 27.6K.

SAÍDA CA		
Potência Máxima	26400 @ 380/220	VA
Tensão Nominal (FF/FN)	380 / 220	Vac
Faixa de Tensão (FF/FN)	323 - 437 / 187 - 253	Vac
Máxima Corrente Injetada (por fase)	40	A
Frequência Nominal	60 $\pm$ 5	Hz
Redes Trifásicas Compatíveis	3 / N / PE (WYE com Neutro)	V
PROTEÇÃO DE SAÍDA		
DISJUNTOR 3P	43A	
DPS CA	DPS 275VCA - 45KA	
Inversão de polaridade	Sim	
Monitor de falha de isolamento	Sim	
Proteção anti-ilhamento	Sim	

Tab. 4 – Características elétricas da entrada CA e proteção CA do INVERSOR SE 27.6K.  
Fonte: Adaptado de SolarEdge (2019).

## 2.4 Tecnologia MLPE Otimizador de Potência

Os otimizadores de potência surgiram como uma ideia pioneira durante a Conferência Anual de 2004 da *IEEE Industrial Electronics Society*, e posteriormente, seu conceito foi formalizado na publicação do *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Entretanto, naquela época, os resultados de eficiência não alcançaram níveis práticos satisfatórios. (WEIDONG XIAO, 2017). Um marco revolucionário ocorreu em 2006, com uma solução inovadora: o inversor inteligente com otimizadores de corrente contínua (CC). Esta inovação significativa transformou a coleta e o gerenciamento de energia em sistemas FV, deixando uma marca indelével no setor (SolarEdge, 2017). O otimizador de potência representa um conversor CC-CC que se conecta a cada módulo individual, transformando-os em painéis solares inteligentes. A notável característica desses otimizadores é sua capacidade de aprimorar a produção em sistemas FV, pois realizam uma monitorização contínua do ponto de potência máxima (MPPT) de cada módulo (SolarEdge, 2021).

A incorporação do MPPT ao nível de módulo oferece uma flexibilidade excepcional em projetos de instalações, permitindo a utilização de múltiplas orientações, inclinações e módulos com diferentes potências de pico na mesma *string*. Ao operar em conjunto com os inversores SolarEdge, os otimizadores de potência ajustam automaticamente a tensão da *string*, permitindo aos instaladores maior versatilidade na criação de sistemas FV mais eficientes, especialmente com *strings* mais longas e de comprimentos variáveis (SolarEdge, 2021). A decisão de empregar a tecnologia MLPE - Otimizador de Potência baseou-se em seu status de vanguarda no mercado de energia solar. Esta inovação oferece uma série de benefícios valiosos no projeto, incluindo um desempenho aprimorado em situações de sombreamento parcial, minimização das perdas devido a divergências (mismatch) e a capacidade de monitorar cada módulo individualmente.

As principais vantagens decorrentes da utilização da tecnologia MLPE incluem:

- Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (MPPT) a nível de módulo, com MPPT a cada dois módulos utilizando otimizadores de potência comerciais.
- Eficiência superior, com uma eficiência máxima de 99,5% e uma eficiência ponderada de 98,8%.

- Redução das perdas devido a divergências nos módulos, abrangendo variações na tolerância de fabricação, sombreamento parcial e o envelhecimento dos módulos.
- Medição avançada do rendimento em tempo real.
- Recurso de desligamento automático da tensão CC do módulo, priorizando a segurança dos instaladores e dos bombeiros.
- Compatibilidade com diversos tipos de módulos, incluindo módulos de silício cristalino, filme fino e alta corrente, abrangendo até os módulos bifaciais.

Essas características destacam a tecnologia MLPE como uma escolha vantajosa e moderna para otimizar o desempenho de sistemas FV. Na Fig. 3 é apresentado um exemplo de como cada módulo FV produz energia máxima e as perdas por "mismatch" são eliminadas, com uma comparação entre um sistema com inversor tradicional *string* e outro com sistema MLPE Otimizador de potência.

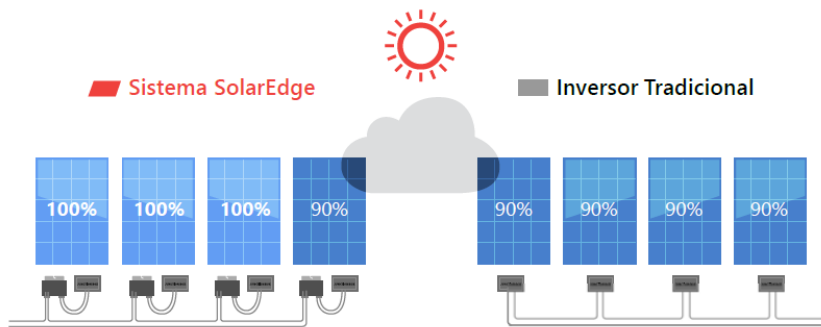


Fig. 3 – Comparativo MLPE x Inversor Tradicional *String*.  
Fonte: SolarEdge (2021).

Conforme demonstrado, no exemplo utilizando um inversor tradicional em configuração *string*, qualquer sombreamento afetando um único módulo FV resulta em perdas de geração em toda a *string*, impactando significativamente o rendimento do sistema como um todo. No entanto, quando se adota a tecnologia MLPE - Otimizador de Potência, esse mesmo sombreamento no primeiro módulo resulta em perdas de geração restritas apenas a esse, preservando o desempenho do restante da *string*. Como resultado, as perdas no sistema global são substancialmente reduzidas. No Tab. 5 são mostradas as características do otimizador P1100.

<b>OTIMIZADOR DE POTÊNCIA P1100</b>		
Potência Nominal CC	1100	W
Máxima Tensão Absoluta de Entrada	125	Vcc
Faixa de Tensão do MPPT	12.5 - 105	Vcc
Máxima Corrente De Curto-Circuito por Entrada (Isc)	14	Acc
Eficiência Máxima	99.5	%
Potência Máxima por <i>String</i>	12750	W

Tab. 5 – Características elétricas do Otimizador de Potência P1100.  
Fonte: Adaptado de SolarEdge (2019).

### 3. RESULTADOS

Nesta seção são exibidas imagens do projeto concluído, os resultados mensais da geração e uma comparação mensal com uma simulação realizada no software PVsyst, a qual utilizou um inversor tradicional em configuração *string* como referência. Na Fig. 4 é apresentada a usina FV instalada em dezembro de 2019.



Fig. 4 – Projeto Finalizado em dezembro de 2019.

Os resultados analisados levaram em conta os dados de monitoramento do sistema durante o mês de janeiro de 2021, conforme ilustrado na Fig. 5. O sistema de monitoramento é capaz de rastrear a produção de cada módulo FV individualmente, graças à conexão de cada módulo a um otimizador de potência. Isso permite a identificação de eventuais perdas de geração, assegurando que tais perdas não afetem o desempenho dos outros painéis na mesma *string*.



Fig. 5 – Geração no mês de janeiro de 2021.  
Fonte: Software Monitoramento SolarEdge.

No mês de janeiro de 2021, a eletricidade gerada foi de 3,37 MWh, um valor maior do que a média necessário para o estabelecimento que era de 3,00 MWh/mês. Na Fig. 6 é mostrada a geração FV no período de março de 2020 até fevereiro de 2021, sendo a geração total nesse período de 36,23 MWh, ou seja, uma média de 3.019 kWh/mês.



Fig. 6 – Geração de março de 2020 até fevereiro de 2021.  
 Fonte: Software Monitoramento SolarEdge.

Para efeitos de comparação, o software PVSyst foi empregado na simulação de um projeto com uma capacidade de 22,40 KWp. Este projeto utilizou os módulos FV de 400 W, mas empregou um inversor ECO 27.0-3-S com uma potência de 27 kW e não contou com a tecnologia de Otimização de Potência MLPE. Através dessa simulação, tivemos a oportunidade de comparar a produção entre um projeto que utiliza a tecnologia MLPE e outro que não a incorpora. A simulação abrangeu todos os parâmetros do projeto original que possuía MLPE, tais como irradiância, temperatura, posição dos módulos FV, perdas por sombreamento, com exceção do dispositivo de otimização de potência. No Tab. 6 é mostrada a simulação da geração através do software PVSyst.

Geração - PVSYST		
Janeiro	2,69	MWh
Fevereiro	2,38	MWh
Março	2,35	MWh
Abril	1,85	MWh
Mai	2,27	MWh
Junho	2,65	MWh
Julho	2,82	MWh
Agosto	3,01	MWh
Setembro	3,05	MWh
Outubro	3,07	MWh
Novembro	3,12	MWh
Dezembro	3,11	MWh
TOTAL	32,37	MWh
Média Mensal	2,6975	MWh

Tab. 6 - Geração PVSYST – PROJETO SEM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA.  
 Fonte: Adaptado PVSYST.

A comparação entre a geração mensal média do projeto FV com MLPE (3,019 MWh) e a simulação do projeto sem MLPE pelo Pvsyst (2,69 MWh) revelou um aumento de 11% na produção de eletricidade para o projeto com MLPE, resultando em maior economia e retorno para o proprietário. Ao analisar o mês de abril, o mês de menor geração do projeto FV sem MLPE (1,85 MWh) em comparação com o mesmo mês de 2020 do projeto FV com MLPE (2,4 MWh),

observamos uma diferença de 22,92%. Essa disparidade é devido ao MLPE fornecer um rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT) a nível de módulo, com MPPT a cada dois módulos, graças aos otimizadores de potência. Isso reduz as perdas devido ao desajuste entre os módulos FV, abrangendo tolerâncias de fabricação, sombreamento parcial e envelhecimento dos módulos FV.

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo abordou o desenvolvimento de um projeto de minigeração distribuída FV, utilizando a tecnologia de Otimizador de Potência (MLPE). A escolha desse enfoque foi baseada em uma revisão bibliográfica abrangente sobre sistemas de geração FV, culminando na seleção de um estudo de caso que permitiu a descrição detalhada da metodologia do MLPE e sua comparação com outra tecnologia. A análise do estudo de caso revelou um desafio inicial relacionado à orientação variável dos painéis e ao sombreamento causado pela estrutura circundante. A solução mais eficaz identificada foi a implementação do MLPE, que permitiu melhorar a geração de eletricidade por meio do rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) em nível de módulo. Os resultados demonstraram que o uso do MLPE se destacou como a opção mais vantajosa para atender à demanda média de 3.000 kWh/mês. A geração FV com MLPE alcançou uma média mensal de 3,019 MWh, superando em 11% o sistema sem MLPE, que gerou uma média de 2,69 MWh/mês, insuficiente para atender o consumo de 3.000 kWh/mês. A tecnologia MLPE demonstrou uma eficiência ao ser aplicada em locais com complexidade topológica que requerem a instalação de painéis solares em diferentes níveis e orientações. Além de superar desafios de sombreamento, a geração de eletricidade em nível de módulo ofereceu benefícios significativos em termos de rendimento mensal, destacando as vantagens desse sistema de maneira abrangente.

#### REFERÊNCIAS

- ABSOLAR., 2021. Infográfico ABSOLAR. Site da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>.
- ANEEL., 2012. PRODIST – Seção 3.7 – Acesso de Micro e Minigeração Distribuída. Disponível em:<[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo3\\_Revisao\\_5.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo3_Revisao_5.pdf)>.
- CANAL SOLAR., 2023. Maior sistema FV com MLPE do Brasil deve começar a operar no fim deste mês. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/maior-sistema-fv-com-mlpe-do-brasil-deve-comecar-a-operar-no-deste-mes/>>.
- MACÊDO, W. N., 2006. Análise do fator de dimensionamento do inversor fotovoltaico aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Tese para Doutorado. EP/FEA/IEE/IF, USP, São Paulo, SP.
- MATAVELLI, A. C., 2013. Energia solar: geração de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas. EEL, USP, Lorena, SP.
- MOEHLECKE, Adriano, et al., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL ELETROBRAS.
- NAKABAYASHI, R., 2016. Microgeração fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica. IEE-LSF, USP, São Paulo, SP.
- PINHO, M.A., 2012. Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Dissertação de Mestrado USP.
- SolarEdge, “Corporate Fact Sheet”, 2017
- SolarEdge. Otimizadores de Potência. Disponível em: < <https://www.solaredge.com/br/>>.
- Weidong Xiao., 2017. “Photovoltaic Power System: Modeling, Design, and Control”.

#### INSTALLATION OF A PHOTOVOLTAIC PLANT IN A RESTAURANT USING MODULE-LEVEL POWER ELECTRONICS

**Abstract.** *This article addresses a technical analysis of the installation of a photovoltaic (PV) generation system connected to the electrical grid using MLPE (Module-Level Power Electronics) technology, known as Power Optimizer, in a restaurant in Fortaleza, Ceará, with an available area of 201.2 m<sup>2</sup>. MLPE technology was chosen due to its benefits, such as increased yield in situations of partial shading, reduced losses due to divergence and individualized monitoring per module. The restaurant has an average consumption of 3,000 kWh/month, totaling 36,000 kWh/year. The SolarEdge Designer software was used for sizing, allowing complete modeling of the project and detailed analysis of losses. 56 400W PV modules were installed, totaling 22.4 KWp of power, in addition to 28 P110 power optimizers and a 27.6 kW DC/AC inverter. An analysis of the January 2021 generation was carried out, during which the system generated 3.37 MWh. Compared to a system of equal power with a traditional Fronius 27 kW inverter, without MLPE technology, a difference of 21% more generation was noted with MLPE - Power Optimizer technology. This study provides insights for the renewable energy sector, highlighting the importance of advanced technologies in optimizing the performance of grid-connected PV systems.*

**Keywords:** *Solar Energy, MPLE Technology, Power Optimizer.*