

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Gustavo Jorge Silva

**COMPARATIVO DA GERAÇÃO EM UMA USINA FOTOVOLTAICA UTILIZANDO
DUAS DIFERENTES TOPOLOGIAS DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS**

Belo Horizonte – MG
Novembro de 2019

Gustavo Jorge Silva

**COMPARATIVO DA GERAÇÃO EM UMA USINA FOTOVOLTAICA UTILIZANDO
DUAS DIFERENTES TOPOLOGIAS DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS**

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis de Energia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luís Guilherme Monteiro Oliveira

Belo Horizonte – MG

Novembro de 2019

S586c

Silva, Gustavo Jorge.
Comparativo da geração em uma usina fotovoltaica utilizando duas
diferentes topologias de inversores fotovoltaicos [recurso eletrônico] /
Gustavo Jorge Silva. – 2019.
1 recurso online (53 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Luís Guilherme Monteiro Oliveira.

"Monografia apresentada ao Curso de Especialização em
Fontes renováveis: geração, operação e integração da Escola de
Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais"

Bibliografia: f.53.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia renovável. 3. Sistemas de
energia fotovoltaica. 4. Geração distribuída de energia elétrica. 5.
Inversores elétricos. 6 - Energia solar. I. Oliveira, Luís Guilherme Monteiro.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Ângela Cristina Silva CRB/6 2361
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO GUSTAVO JORGE SILVA

Realizou-se, no dia 12 de dezembro de 2019, às 14:00 horas, Sala 2305 - 2o. andar - bloco 1 - Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Comparativo da geração em uma usina fotovoltaica utilizando duas diferentes topologias de inversores SOLARES FOTOVOLTAICOS*, apresentada por GUSTAVO JORGE SILVA, número de registro 2018707862, graduado no curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Luiz G. Monteiro de Oliveira - Orientador (PUC-MG), Prof(a). Danilo Iglesias Brandao (Universidade Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a monografia:

☒ Aprovada

☐ Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 12 de dezembro de 2019.

Prof(a). Luiz G. Monteiro de Oliveira (Doutor)

Prof(a). Danilo Iglesias Brandao (Doutor)

Secretaria do Curso de Especialização em
Fontes Renováveis - Geração, Operação
e Integração

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo suporte, a todos os colegas que me ajudaram durante toda a minha trajetória na graduação e na pós-graduação e ao Orientador deste trabalho, que me guiou durante a realização do mesmo.

**Um trabalho te dá um propósito e um significado. A vida
é vazia sem ambos.**

(Stephen Hawking)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo da geração de energia elétrica de uma usina fotovoltaica que está conectada a duas topologias diferentes de inversores de frequência. Instalados no mesmo local e conectados a módulos fotovoltaicos sob mesmas condições climáticas e de instalação, o trabalho busca comparar dados de potência, tensão, corrente e energia.

A princípio, aborda-se sobre alguns conceitos gerais relacionados a este tipo de geração de energia elétrica e sobre os principais elementos que compõem uma usina fotovoltaica. Em seguida, são descritas algumas das principais falhas que podem ocorrer com alguns dos elementos que compõem o sistema fotovoltaico.

Posteriormente, se descreve os principais tipos de inversores utilizados nesse tipo de geração e suas principais características. Em seguida, é apresentado um estudo de caso onde se aplica a principal metodologia deste trabalho, que é a comparação de parâmetros de geração utilizando duas topologias diferentes de inversores.

Por fim, tem-se a análise dos resultados obtidos e as conclusões feitas a partir do estudo realizado.

Palavras-chave: Geração distribuída, Inversores de frequência, Sistema solar fotovoltaico.

ABSTRACT

This work presents a comparative study of the electric power generation of a photovoltaic plant that is connected to two different topologies of frequency inverters. Installed in the same location and connected to photovoltaic modules under the same climatic and installation conditions, the work seeks to compare data on power, voltage, current and energy.

At first, it discusses some general concepts related to this type of electricity generation and also the main elements that make the photovoltaic system. Following are some of the main flaws that can occur with some of the elements that make up the photovoltaic system.

Subsequently, the main types of inverters used in this type of generation and their main characteristics are described. Next, a case study is presented where the main methodology of this work is applied, which is the comparison of generation parameters using two different inverter topologies.

Finally, there is the analysis of the results obtained and the conclusions made from the study.

Keywords: Distributed generation, Frequency inverters, Photovoltaic solar system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1. Átomo de silício [3]. | 19 |
| Figura 2 – Material do tipo N. | 20 |
| Figura 3 – Material do tipo P. | 20 |
| Figura 4 – Materiais do tipo P e N em um material semiconductor [2]. | 21 |
| Figura 5 – Geração de energia fotovoltaica em um material semiconductor. | 21 |
| Figura 6 – Módulo ou painel fotovoltaico. | 24 |
| Figura 7 – Descoloração no módulo fotovoltaico | 25 |
| Figura 8 – Rachadura nas células fotovoltaicas. | 26 |
| Figura 9 – Células desconectadas em um módulo fotovoltaico. | 27 |
| Figura 10 – Exemplos de quebra de vidro devido a falhas de fixação. | 27 |
| Figura 11 – Delaminação em um módulo FV. | 28 |
| Figura 12 – Defeitos de caixa de junção. | 30 |
| Figura 13: Topologia de um micro inversor. | 32 |
| Figura 14 – Micro inversor instalado. | 32 |
| Figura 15: Micro inversor APsystems. | 34 |
| Figura 16: Modularidade dos micro inversores. | 34 |
| Figura 17 – Topologia de ligação de um inversor string. | 35 |
| Figura 18 – Inversor de string do fabricante Goodwe. | 36 |
| Figura 19 – Operação dos otimizadores sobre condição ideal. | 37 |
| Figura 20 – Operação dos otimizadores com sombreamento parcial. | 38 |
| Figura 21 – Inversor com otimizadores SolarEdge. | 39 |
| Figura 22 – Foto do telhado da instalação. | 42 |
| Figura 23 – Detalhamento da instalação com pequenas diferenças de angulo. | 42 |
| Figura 24 – Detalhamento de cada tecnologia de inversor utilizada (1 – APsystems e 2- SolarEdge). | 43 |
| Figura 25 – Curvas de potência gerada em dois módulos com inversor APsystems. | 44 |
| Figura 26 – Curvas de corrente gerada em dois módulos com inversor APsystems. | 45 |
| Figura 27 – Curvas de tensão gerada em dois módulos com inversor APsystems. | 45 |
| Figura 28 – Curva de potência gerada para dois módulos com inversor SolarEdge. | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 – Curva de corrente gerada para dois módulos com inversor SolarEdge. | 46 |
| Figura 30 – Curva de tensão gerada para dois módulos com inversor SolarEdge. .. | 47 |
| Figura 31 – Curva de potência gerada pelos módulos com os inversores APsystems e SolarEdge. | 48 |
| Figura 32 – Energia gerada pelos módulos com os inversores APsystems e SolarEdge em um intervalo de tempo de uma semana..... | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Energia gerada pelos módulos com os inversores APsystems e SolarEdge em um intervalo de tempo de uma semana. | 49 |
|---|----|

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| FV | Fotovoltaico |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| IRENA | Agência Internacional de Energia Renovável |
| MLPE | <i>Module Level Power Electronics</i> |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracking</i> |
| VM | Tensão no máximo ponto de potência |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 - INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 Considerações Iniciais | 15 |
| 1.2 Objetivos do trabalho | 16 |
| 1.3 Metodologia | 16 |
| 1.4 Organização do texto | 17 |
| 2 - CONCEITOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTVOLTAICA..... | 18 |
| 2.1 Considerações iniciais..... | 18 |
| 2.2 Conceitos básicos | 18 |
| 2.3 Princípio de funcionamento do módulo fotovoltaico..... | 18 |
| 3 - OS MÓDULOS FOTVOLTAICOS E OS PRINCIPAIS DANOS QUE IMPACTAM A GERAÇÃO EM UMA USINA..... | 23 |
| 3.1 Considerações iniciais..... | 23 |
| 3.2 O módulo fotovoltaico..... | 23 |
| 3.3 Falhas e danos em módulo fotovoltaico e outros equipamentos | 24 |
| 3.3.1 Falhas nos módulos fotovoltaicos..... | 24 |
| 3.3.2 Falhas em conectores e conexões | 29 |
| 3.3.3 Perda por adesões no <i>Back Sheet</i> | 29 |
| 3.3.4 Falha na caixa de junções..... | 29 |
| 4 - OS INVERSORES DE FREQUÊNCIA FOTVOLTAICOS..... | 31 |
| 4.1 Considerações iniciais..... | 31 |
| 4.2 Inversores de frequência | 31 |
| 4.2.1 Micro inversores | 32 |
| 4.2.2 Inversor de <i>string</i> | 34 |
| 4.2.3 Inversor multi <i>string</i> | 36 |
| 5 - ESTUDO DE CASO EM UMA USINA EM MINAS GERAIS | 40 |
| 5.1 Considerações iniciais..... | 40 |
| 5.2 Estudo de caso | 40 |
| 6 - CONCLUSÕES..... | 52 |
| 6.1 Conclusões gerais..... | 52 |
| REFERÊNCIAS | 53 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A geração distribuída de energia elétrica é o processo de gerar energia elétrica através de pequenos geradores próximo a unidade consumidora. Esta geração pode ser solar, eólica, hídrica, biomassa, entre outros.

Após a publicação da REN 482/2012 pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), foi permitido a conexão da geração distribuída em telhados residenciais, comerciais, industriais e em terrenos e fazendas brasileiras. Com esta normativa passou a ser permitido a conexão de acessantes a rede da distribuidora de energia elétrica local, permitindo a geração de energia elétrica por clientes residenciais, em um modelo de negócio onde cada kWh gerado pela micro usina é abatido diretamente na fatura de energia elétrica do cliente da distribuidora.

O mercado do estado de Minas Gerais é classificado como um dos melhores mercados para a utilização de energia solar fotovoltaica. Isto se deve a alta taxa cobrada pela energia elétrica na distribuidora local, as condições dadas pelo governo de isenção de impostos e ao grande número de terrenos baratos e propícios a geração de energia elétrica, principalmente no norte do estado. Visando aproveitar esses benefícios, nota-se um crescente aumento no número de instalações de usinas fotovoltaicas.

Essas instalações podem utilizar diferentes tipos de equipamentos, já que se tem uma variedade de fabricantes, principalmente para os principais itens de uma usina, que são os painéis fotovoltaicos e os inversores fotovoltaicos. Dessa forma, usinas com uma mesma potência instalada, podem apresentar desempenhos diferentes se seus componentes instalados forem de diferentes fabricantes.

Assim, estudos comparativos podem ser feitos para analisar o desempenho de usinas fotovoltaicas quando se utiliza componentes de marcas distintas. No caso desse trabalho, o comparativo de desempenho foca-se nos inversores de frequência, que além de possuir diversos modelos, são fabricados por diferentes companhias.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo principal do trabalho é realizar um estudo de caso onde é feito a análise de dados da geração de uma usina fotovoltaica real utilizando dois diferentes modelos de inversores de frequências. Esses dois modelos são de diferentes fabricantes, porém ambos utilizam a tecnologia *Module Level Power Electronics* (MLPE). Com a análise de dados, será possível observar qual equipamento possui melhor desempenho nas mesmas condições de operação.

1.3. Metodologia

A metodologia, inicialmente, consiste em uma revisão bibliográfica sobre energia solar fotovoltaica, os conceitos básicos e o princípio de funcionamento do módulo fotovoltaico. Posteriormente, são detalhadas características dos módulos fotovoltaicos e os danos mais comuns que estes equipamentos apresentam.

Como ponto de partida do trabalho, o método científico utilizado será o de comparação, onde pretende-se comparar o desempenho de uma usina fotovoltaica utilizando dois tipos de inversores de frequências diferentes. Para isso, um capítulo é dedicado aos inversores, de maneira a detalhar as diferentes topologias e as principais características de cada um. A comparação será feita baseada em três parâmetros que serão coletados dos módulos fotovoltaico, são eles: potência gerada, tensão e corrente.

Para aplicação do método de comparação escolheu-se uma usina solar fotovoltaica implementada na cidade de Tocos do Moji/MG, que possui, em uma única usina, dois tipos de inversores de frequência de fabricantes diferentes. Os módulos fotovoltaicos conectados a esses inversores possuem as mesmas características de instalações, ou seja, mesmo ângulo de inclinação, mesma ventilação e sem a presença de sombreamentos. A análise utiliza dados de geração reais e seus resultados possibilitam um estudo comparativo do desempenho utilizando as duas topologias diferentes de inversores.

1.4. Organização do texto

A monografia está dividida em seis capítulos, incluindo este de introdução.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos conceitos básicos de um sistema fotovoltaico e o seu princípio de funcionamento.

No Capítulo 3 são apresentados os módulos fotovoltaicos e os principais problemas que afetam tanto estes módulos quanto outros equipamentos que estão presentes em uma usina fotovoltaica.

O Capítulo 4 descreve os diferentes tipos de inversores de frequências utilizados na geração de energia fotovoltaica e as características principais de cada um deles. Separou-se um capítulo específico para este componente já que eles apresentam um importante elemento do estudo desenvolvido nesse trabalho.

O Capítulo 5 analisa um estudo de caso, onde coletou-se os dados de geração de uma usina fotovoltaica real localizada em uma cidade de Minas Gerais. Essa análise tem o objetivo de comparar duas topologias diferentes de inversores instalados a módulos fotovoltaicos que estão sob as mesmas condições de operação.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões desta monografia fazendo um apanhado geral de todas as análises feitas.

2. CONCEITOS RELACIONADOS À GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1. Considerações iniciais

O capítulo 2 mostra os principais conceitos relacionados à energia fotovoltaica, além de apresentar os principais componentes que o constitui e as principais falhas que podem ocorrer nesses componentes.

2.2. Conceitos básicos

A usina solar fotovoltaica é composta basicamente por dois elementos principais: os módulos fotovoltaicos e inversores. Existem as estruturas de fixação, cabos, entre outros elementos que fazem parte do sistema, porém os módulos fotovoltaicos e os inversores são de longe os principais elementos utilizados em uma usina fotovoltaica.

Para compor um módulo fotovoltaico, ou painel fotovoltaico, é necessário a associação de inúmeras células fotovoltaicas em série e paralelo. Cada célula da associação possui uma corrente e tensão de pico em corrente contínua que podem gerar, dessa maneira a sua associação em série e paralelo possibilita variações de tensão e corrente que serão entregues nos terminais do módulo. Essa tensão e corrente em contínua utilizarão o inversor de frequência solar para transformar a corrente contínua em corrente alternada. Essa conversão é necessária já que as casas e a rede da concessionária utilizam a corrente alternada como fonte de energia na distribuição.

2.3. Princípio de funcionamento do módulo fotovoltaico

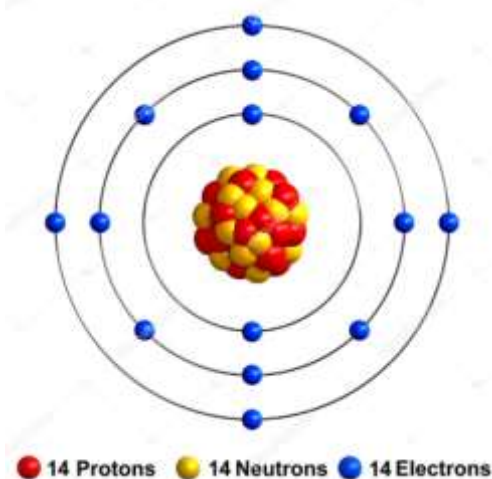
As células fotovoltaicas que compõe o módulo são constituídas por materiais semicondutores. Desta maneira, seu princípio de funcionamento é explicado a partir da teoria dos semicondutores. Existe uma grande variedade de materiais semicondutores, alguns exemplos são citados abaixo:

- Silício – Si;
- Germânio – Ge;

- Arseneto de Gálio – GaAs, etc.

O material semiconductor tem como característica ser tetravalente, ou seja, possuem quatro elétrons em sua última camada [2]. Esse fato pode ser comprovado utilizando como exemplo o átomo de silício, mostrado na Figura 1.

Figura 1. Átomo de silício [3].



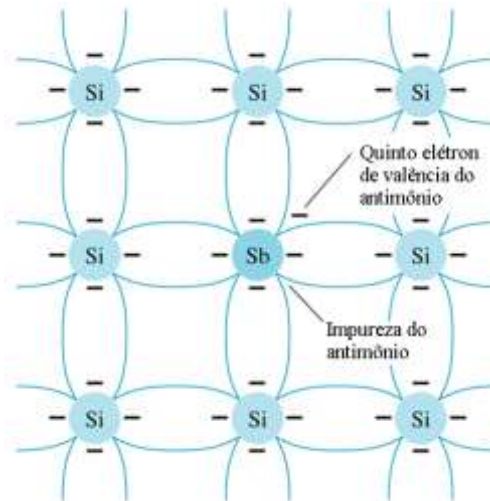
As características dos materiais semicondutores podem ser consideravelmente alteradas pela adição de determinados átomos de impurezas no material semiconductor puro. Um material semiconductor submetido ao processo de dopagem é chamado de material extrínseco. A dopagem é a inserção de impurezas no material de forma controlada [2].

Há dois materiais extrínsecos imprescindíveis para a fabricação de um dispositivo semiconductor:

- Material do tipo N
- Material do tipo P

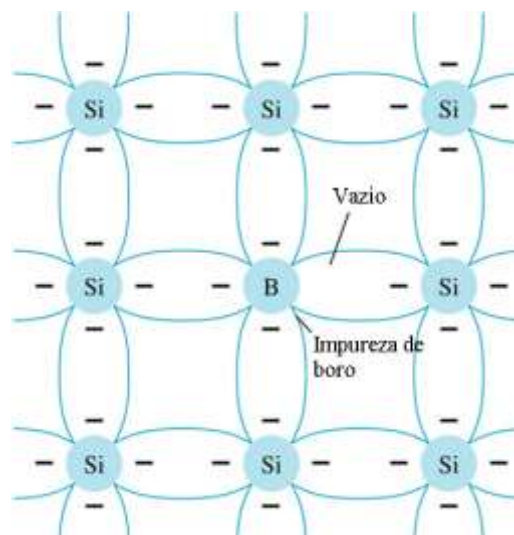
O material do tipo N é criado com a introdução dos elementos de impureza que tem cinco elétrons de valência (pentavalente) como antimônio, arsênio e fósforo, conforme mostra a Figura 2. As ligações covalentes entre os átomos ainda estão presentes e o quinto elétron está relativamente livre para se mover. As impurezas difundidas com cinco elétrons de valência são chamadas de átomos doadores [2].

Figura 2 – Material do tipo N.



O material do tipo P é criado com a introdução dos elementos de impureza que tem três elétrons de valência como boro, gálio e índio, conforme mostra a **Erro! Fonte d e referência não encontrada..** Há um número insuficiente de elétrons para completar as ligações covalentes. A lacuna resultante aceitará rapidamente um elétron livre. As impurezas difundidas com três elétrons de valência são chamadas de átomos aceitadores.

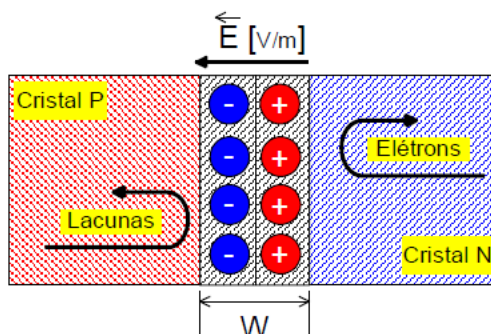
Figura 3 – Material do tipo P.



Quando os materiais do tipo N e tipo P são unidos, os elétrons e as lacunas da região de junção se combinam, conforme mostra a **Erro! Fonte de referência não e ncontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.,** formando um material

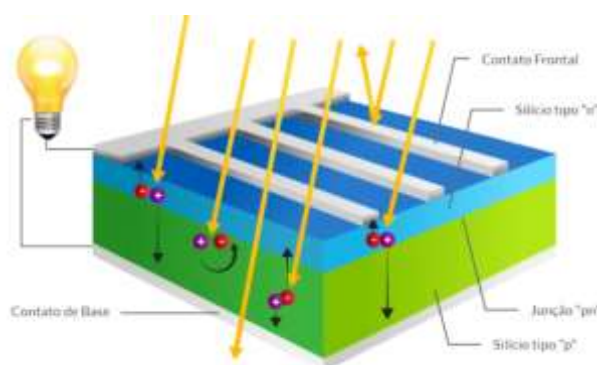
semicondutor similar ao utilizado nas células fotovoltaicas que dará o princípio de funcionamento da geração de energia elétrica.

Figura 4 – Materiais do tipo P e N em um material semicondutor [2].



A célula fotovoltaica de um módulo, com as características similares ao semicondutor descrito no parágrafo anterior, ao receber radiação solar, recebe a energia desses raios solares e os elétrons utilizam essa energia para atravessar a barreira da junção dos materiais tipo N e tipo P (onde está o **W** na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) [2]. Esse fluxo de elétrons faz com que se tenha o surgimento de uma tensão nos terminais da célula ou do módulo (constituído por várias células em série e paralelo). Essa tensão deve-se a concentração de cargas de sinais opostos nos dois terminais desse módulo. A Figura 5 mostra como é o surgimento dessa tensão nos terminais de um material semicondutor ao receber energia da radiação solar.

Figura 5 – Geração de energia fotovoltaica em um material semicondutor.



Quando se conecta uma carga ao módulo fotovoltaico que está sob a radiação solar, há um fluxo contínuo de elétrons, que nada mais é que o estabelecimento de uma corrente elétrica. Essa corrente, quando passa por uma carga, alimenta-a e fornece potência para o seu funcionamento.

Os dois tipos mais comuns de materiais semicondutor utilizados nas células fotovoltaicas comerciais são o silício policristalino e monocristalino [2].

3. OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E OS PRINCIPAIS DANOS QUE IMPACTAM A GERAÇÃO EM UMA USINA

3.1. Considerações iniciais

O capítulo 3 apresenta conceitos relacionados ao módulo fotovoltaico, além de apresentar os principais danos causados nos módulos e outros equipamentos que compõe uma usina fotovoltaica. Esses danos podem impactar diretamente na produção de energia elétrica.

3.2. O módulo fotovoltaico

As células fotovoltaicas que compõe o painel possuem uma grande durabilidade, graças aos investimentos feitos em pesquisa nessa área e a evolução da tecnologia ao longo dos anos. Estima-se que a durabilidade da célula fotovoltaica é de pelo menos 25 anos.

Uma célula fotovoltaica confiável, é essencial para uma matriz solar segura. O contínuo investimento em pesquisa é necessário para que se reduza o custo de fabricação das células e consequentemente se reduza o preço dos painéis, possibilitando uma maior popularização das usinas solares.

Para garantir a robustez das células fotovoltaicas, existem normas que regulam e testam sua qualidade, como a *IEC 61215* (“*Crystalline silicone terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*”, 2005) e *IEC 61730* (“*Photovoltaic (PV) module safety qualification*”, 2004). Essas normas são responsáveis por identificar grande parte dos problemas e falhas nas células fotovoltaicas.

A Figura 6 apresenta um exemplo de um módulo fotovoltaico atual. Estes módulos possuem grande robustez, porém é necessária especial atenção no manuseio e na instalação.

Figura 6 – Módulo ou painel fotovoltaico.



Na instalação, deve-se atentar aos perigos elétricos que podem causar acidentes, já que este equipamento pode operar em altos níveis de corrente contínua, que podem causar choques elétricos caso alguma pessoa entre em contato com um terminal energizado do painel. Ademais, cuidados no manuseio do módulo devem ser tomados, já que, apesar de robustos, danos físicos podem prejudicar o seu funcionamento ou causar falhas inesperadas.

3.3. Falhas e danos em módulo fotovoltaico e outros equipamentos

Um dano no módulo fotovoltaico pode reduzir sua produção de energia elétrica ou até mesmo cessar sua geração. Esses danos podem ser causados por ação humana, defeitos de fabricação ou fatores climáticos. Como esses danos estão intimamente ligados a produção de energia, os tópicos seguintes descreverão uma série de fatores que podem causar falhas ou danos nos módulos e também em outros equipamentos presentes em uma usina fotovoltaica [4].

3.3.1. Falhas nos módulos fotovoltaicos

Entre os problemas identificados nas células fotovoltaicas, os mais comuns são a descoloração e delaminação do encapsulamento do painel fotovoltaico, fadiga de solda, falha de solda e rachaduras. A seguir tem-se uma série de falhas que podem ocorrer nas células e módulos fotovoltaicos.

- Descoloração: A descoloração é um problema muito comum em módulos fotovoltaicos. Tecnicamente a descoloração é mais uma degradação do que uma falha. Na construção de uma célula fotovoltaica é determinada a sua cor para que ela opere na melhor faixa de radiação, por exemplo na cor azul escuro. Se este filtro é alterado, a célula não irá falhar, mas irá reduzir seu potencial de geração. **A fonte de referência não encontrada.** apresenta um módulo fotovoltaico contendo os problemas de descoloração em algumas células.

Figura 7 – Descoloração no módulo fotovoltaico



Esse problema pode ser detectado visualmente, portanto não é necessário ser um especialista para detectar a descoloração nas células fotovoltaicas.

- Rachaduras nas células: Apesar da robustez dos módulos, o manuseio incorreto e choques físicos intensos podem causar rachaduras nas células dos módulos. Essas rachaduras prejudicam a geração de energia elétrica e consequentemente pode comprometer a eficiência da usina.

Um exemplo de rachadura em um módulo pode ser visto na Figura 8 . Elas podem ter diferentes formatos e tamanhos.

Figura 8 – Rachadura nas células fotovoltaicas.

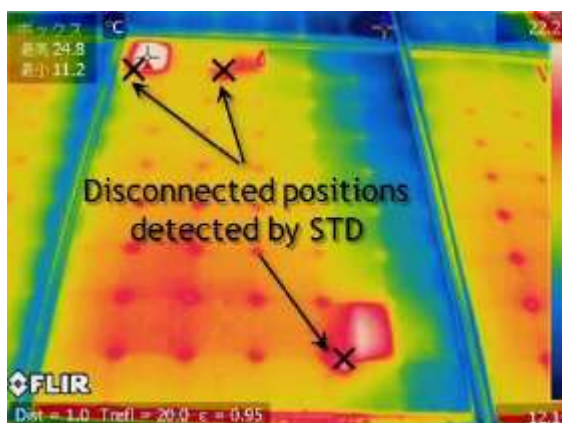


As rachaduras nas células em sua grande maioria são ocasionadas no transporte e manuseio dos módulos. No manuseio é importante sempre ter o cuidado de não pisar sobre os módulos e também não manusear ferramentas sobre os módulos. As rachaduras não são consideradas falhas, mas um dano causado pelo transportador ou instalador. Muitas vezes esse dano não pode ser percebido a olho nu.

- Células desconectadas e *ribbons*: Um módulo fotovoltaico é composto por diversas células fotovoltaicas interconectadas nos ribbons (fitas) em serie, para obter níveis de tensão superiores. Esta conexão nos ribbons ocorrem na parte de trás e frente da célula.

Como o módulo possui um grande número de células poderá ocorrer alguma conexão fraca entre células ou até mesmo uma desconexão. Esta desconexão poderá ocorrer devido a falha na solda, deformações nas células durante o processo de fabricação, ciclo térmico ou hot spots ou até mesmo estresse físico sofridos no transporte. A Figura 9 apresenta um módulo fotovoltaico contendo algumas células desconectadas.

Figura 9 – Células desconectadas em um módulo fotovoltaico.



- Falhas de fixação dos módulos: Toda fixação dos módulos deve ser feita seguindo o manual de fixação dos fabricantes, observando sempre a geometria do sistema. A fixação não pode ser muito fina ou estreita e não poderá sofrer muita pressão no aperto dos parafusos, pois poderá elevar a pressão no frame dos módulos, o que pode ocasionar a quebra da camada de vidro que protege o módulo.

A quebra do vidro promoverá a entrada de oxigênio e vapor de água entre as células, promovendo a corrosão do circuito elétrico e ainda ocasionando a elevação da temperatura de operação do módulo. A Figura 10 apresenta exemplos de quebra do vidro em módulos fotovoltaicos. A esquerda tem-se um exemplo de vidro quebrado devido ao excesso de aperto no parafuso ou utilização de parafuso muito estreito. Já o exemplo da direita mostra a quebra de vidro devido à má escolha do tipo do parafuso para a instalação do módulo.

Figura 10 – Exemplos de quebra de vidro devido a falhas de fixação.

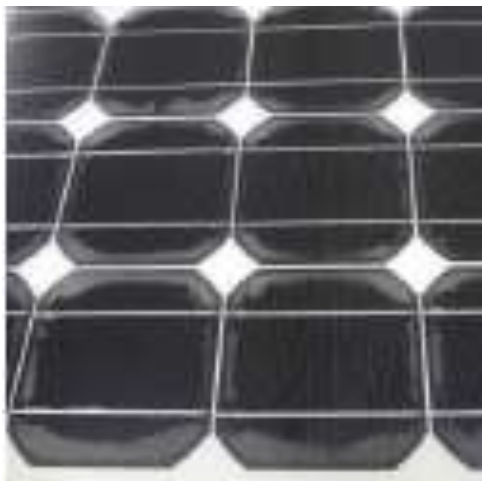


- Delaminação de células fotovoltaicas: O módulo fotovoltaico possui algumas camadas para proteção e melhor captação da radiação solar. Entre essas camadas estão o vidro, um polímero encapsulante e as células. A adesão entre o vidro e a célula

e entre o polímero encapsulante e a célula, pode ser comprometida por motivos climáticos, principalmente em lugares quentes e úmidos, ou até mesmo pela falta de limpeza. Se ocorre uma separação ou perda de adesão entre essas camadas do painel FV, diz-se que ocorreu uma delaminação. Esse dano pode ser detectado facilmente e ocorre com mais frequência nas bordas das células.

A delaminação irá permitir a corrosão e entrada de umidade na célula FV, promovendo a perda de potência no módulo. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um exemplo de delaminação em um módulo FV.

Figura 11 – Delaminação em um módulo FV.



- Transporte e instalação:

Grande parte dos painéis vendidos no mercado local chegam até nosso país via importação. O transporte requer uma atenção especial, pois o vidro dos painéis pode se danificar e também as células podem se avariar devido as vibrações e manuseios no transporte.

Vidros quebrados são menos influentes nas perdas do sistema FV, pois sua identificação é fácil, com uma simples inspeção visual é possível perceber se o vidro foi danificado ou não. Já as células danificadas podem não ser percebidas, pois somente com a inspeção visual não é possível detectar se a célula sofreu algum dano no transporte. Para verificar este dano, é necessário testes com câmera térmica ou imagem com eletroluminescência.

3.3.2. Falhas em conectores e conexões

As conexões elétricas podem sofrer falhas na *string box*, nos cabos de extensão, nas *combiner boxes* e nos inversores. Na maioria dos casos, os problemas são causados por utilizar conectores de diferentes fabricantes em uma mesma planta fotovoltaica, seja na conexão com módulos, seja na realização de cabos de extensão.

A falha na conexão pode ser grave, pois um conector crimpado de maneira incorreta pode colocar a planta solar total em cheque, podendo cessar a produção de energia. Além do mais, a utilização de conectores de diferentes fabricantes pode causar sobreaquecimento nas junções, ocasionar arcos elétricos e assim colocar em risco a vida de pessoas e a operação da usina.

3.3.3. Perda por adesões no *Back Sheet*

O *back sheet* do módulo protege os componentes da exposição direta ao ambiente e serve também para promover uma operação segura na presença de altas tensões em corrente contínua. O *back sheet* pode ser composto por vidro ou polímeros e merece atenção especial devido aos riscos que sua falha poderá ocasionar.

Caso o *back sheet* venha a falhar, a água ou orvalho podem penetrar na caixa de junção do módulo criando um caminho condutor elétrico até o solo e causar arcos elétricos, o que é grave para a segurança da usina e das pessoas.

3.3.4. Falha na caixa de junções

A caixa de junções fica fixada logo atrás do módulo fotovoltaico e nela é realizado a conexão elétrica do cabo e os diodos de *by-pass*. Os defeitos mais comuns que podem ocorrer nesse componente são:

- Fixação fraca entre a caixa de junções e o backsheet: a caixa de junção pode se soltar do backsheet, portanto é necessária uma fixação adequada;
- Abertura ou mal fechamento da caixa de junções durante o processo de fabricação;
- Má conexão de cabeamento: pode provocar arcos elétricos, dando início a um incêndio.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta alguns exemplos de defeitos em caixa de junção.

Figura 12 – Defeitos de caixa de junção.



4. OS INVERSORES DE FREQUÊNCIA FOTOVOLTAICOS

4.1. Considerações iniciais

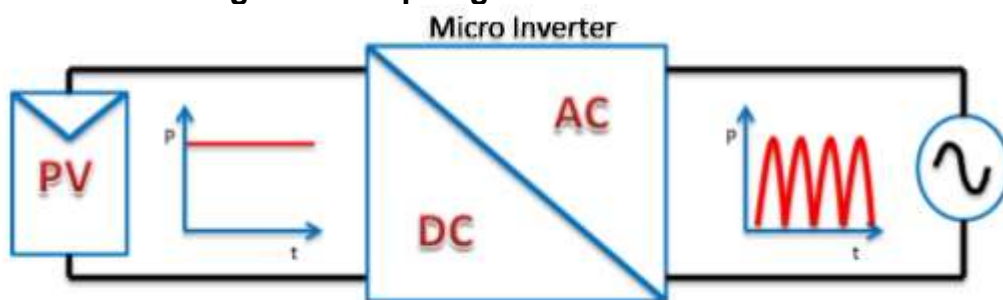
O capítulo 4 apresenta conceitos relacionados ao inversor de frequência fotovoltaico, apresentando características e alguns detalhes de diferentes modelos de inversores

4.2. Inversores de frequência

Vimos no capítulo anterior como funcionam os módulos FV e que eles geram uma tensão em seus terminais quando submetidos a radiação solar. Antes de conectar os terminais dos módulos ao sistema, deve-se converter a tensão e corrente gerada de contínua para alternada e então possibilitar a conexão com a rede da distribuidora local. Isso deve ser feito porque a energia que se recebe nas casas no Brasil é distribuída em corrente alternada pelas concessionárias, logo se a usina é conectada à rede, ela deve entregar uma energia compatível com a da distribuidora.

O equipamento que faz essa conversão de corrente contínua para alternada se chama inversor de frequência e são utilizados diferentes modelos para a geração de energia fotovoltaica. A Figura 13 apresenta a topologia de um inversor de frequência e como ele funciona conectado a uma planta FV e a rede do sistema. No Brasil, temos a disposição no mercado três tipos de inversores para micro geração distribuída: os micro inversores, inversores de string e inversores multi string. Os tópicos seguintes detalham cada um desses modelos aqui citados [5].

Figura 13: Topologia de um micro inversor.



4.3. Micro inversores

Os micro inversores são inversores de baixa potência, que possibilitam a ligação de maneira segura e com uma entrada disponível para cada placa fotovoltaica, funcionando de maneira independente por entrada. Devido à grande modularidade, este equipamento é indicado para instalações de pequeno porte residenciais.

Um micro inversor deve ser robusto, pois ele é instalado logo abaixo aos módulos fotovoltaicos, ficando expostos a intempéries ambientais, como excesso de temperatura e chuvas. A Figura 14 apresenta um micro inversor instalado em uma usina FV [6].

Figura 14 – Micro inversor instalado.



Seu funcionamento leva em consideração que cada placa possui uma entrada independente e um MPPT (Rastreador de máximo ponto de potência) para cada entrada de módulo fotovoltaico. Devido ao número de MPPTs e a instalação externa ao ambiente, este tipo de equipamento é recomendado o mercado residencial.

Entre suas características temos:

- Flexibilidade de instalação, devido ao número de rastreadores MPPT;
- Rapidez na instalação, não é necessário a utilização de cabeamento CC e equipamentos expostos em paredes;
- Maior segurança ao operador, a conversão de CC para CA é realizada em conjunto com o micro inversor, não sendo acessível;
- Instalação sem interferências nas edificações: O micro inversor é instalado logo abaixo dos módulos fotovoltaicos, possibilitando a instalação sem furos em uma residência;
- Níveis baixos de tensão CC, um único modulo fotovoltaico é conectado por entrada, trabalhando, portanto, com níveis menores que 50Vcc;
- Maior robustez no segmento, oferecendo garantia de até 15 anos contra defeitos de fabricação;
- Flexibilização de instalação, cada modulo pode assumir posicionamentos diferentes, sombreamentos diferentes e potências diferentes.
- Segurança: Não existe o contato de partes em corrente contínua em sua operação.
- Modularidade da usina solar fotovoltaica: É possível a instalação de módulos, conforme as entradas dos micro inversores, com potencias diferentes em cada entrada. Em caso de ampliação da planta solar, é possível adicionar micro inversores com módulos fotovoltaicos atuais referentes ao mercado;

Entre os principais fabricantes de micro inversores no mercado nacional temos o micro inversor da fabricante APsystems, como apresenta a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 15: Micro inversor APsystems.



A Figura 16 apresenta a modularidade dos micro inversores da APsystems.

Figura 16: Modularidade dos micro inversores.



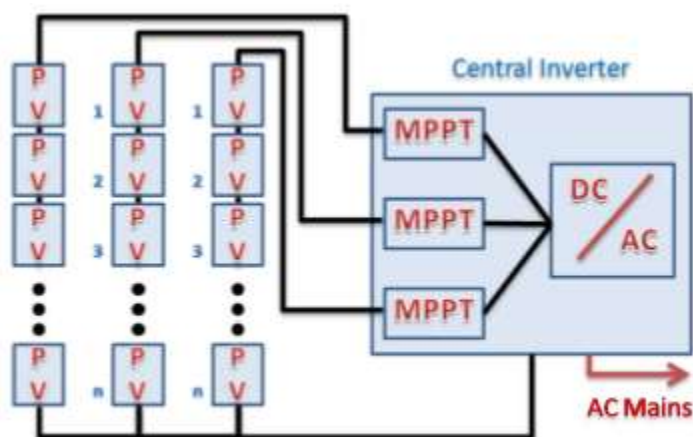
4.4. Inversor de *string*

Os inversores de string possuem seu funcionamento baseado na associação de módulos fotovoltaicos, que associados em serie e paralelo permitem que o inversor transforme a energia de corrente contínua para corrente alternada. Esta topologia de

inversor é o mais utilizado no país devido a seu custo de aquisição reduzido em comparação aos outros modelos.

A associação em série para a utilização deste tipo de inversor se faz necessária, pois ele opera com níveis de tensão altos e com um número de rastreadores MPPTs, reduzido. A Figura 17 apresenta a topologia de ligação de um inversor string [5].

Figura 17 – Topologia de ligação de um inversor string.



Entre suas principais características, tem-se:

- Baixo custo de aquisição, é o equipamento mais difundido no Brasil e com diversos fabricantes;
- Tempo de garantia próximo ao tempo de *payback* da usina solar fotovoltaica, 5 anos no geral;
- Devido a associação de módulos fotovoltaicos, não é permitido a instalação com módulos de diversas potências na mesma string;
- Os níveis de tensão de operação CC são altos, com fácil acesso a seus terminais, portanto é um equipamento que oferece maior risco aos operadores;
- Maior sensibilidade a sombreamentos;
- Menor flexibilidade, devido ao número de MPPTs finitos;
- Maior riscos de operação, como incêndios e choques elétricos.

Entre os principais fabricantes destes equipamentos temos a ABB, Fronius, SMA e GoodWe. A Figura 18 apresenta um inversor de string da marca GoodWe.

Figura 18 – Inversor de string do fabricante Goodwe.



4.5. Inversor multi *string*

Os inversores multi *string* são novos no mercado brasileiro e possuem seu funcionamento auxiliado por otimizadores de potência, que fazem o controle da geração de energia e também auxiliam na segurança da usina solar fotovoltaica. O principal fabricante de inversores multi string a nível mundial é o fabricante israelense SolarEdge.

Os inversores do fabricante SolarEdge possuem otimizadores de potência que trabalham com uma malha de controle em tensão fixa. Com a tensão fixa em corrente contínua, é então convertido em corrente alternada pelo inversor centralizado.

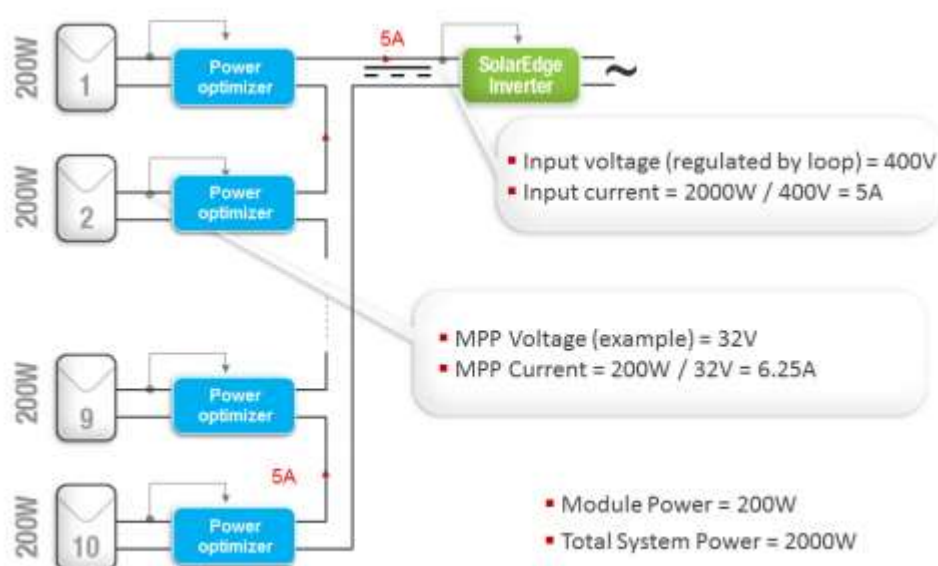
Os otimizadores de potência da SolarEdge são instalados logo abaixo das placas fotovoltaicas e permitem a máxima extração de potência de maneira individualizada. Como o número de otimizadores é elevado, eles permitem a monitoração a nível de módulo de todos os módulos fotovoltaicos da planta.

O otimizador de potência é um conversor DC/DC *buck boost*, com um controlador MPPT, que são conectados um ao outro em série, trabalhando com tensão fixa, permitindo que o inversor trabalhe em seu ponto ótimo de conversão.

O exemplo a seguir explica uma condição ideal de funcionamento desse inversor com otimizador: tem-se uma usina com 10 módulos de 200 Wp cada e assume-se que inicialmente os módulos estão expostos a irradiância total. A potência

de saída de cada módulo solar é mantido, em sua máxima potência, admitindo que a corrente de entrada (IIN) e tensão de entrada (VIN) de cada módulo seja transferido então para o barramento CC do otimizador. Assumindo que a tensão no máximo ponto de potência (VMP) seja igual a 32V e a corrente de entrada seja $200\text{W}/32\text{V} = 6,25\text{ A}$ e que a tensão de operação dos otimizadores de potência é de 400V, e que cada módulo esteja entregando 200W. Temos então que a corrente do inversor será de $2000\text{W}/400 = 5\text{A}$. Isto significa que os otimizadores estão atuando como conversores elevadores, convertendo 32V de tensão de entrada para a tensão de 40V. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a operação em condição ideal descrita anteriormente [7].

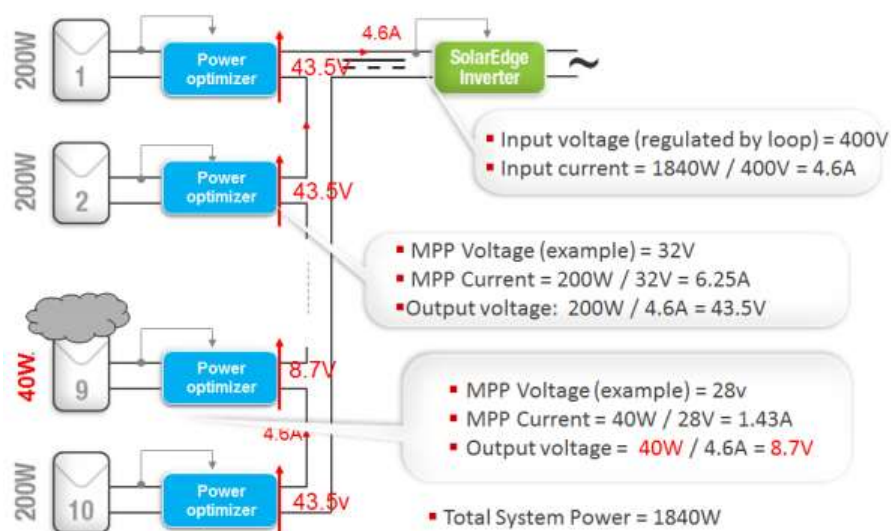
Figura 19 – Operação dos otimizadores sobre condição ideal.



Um segundo exemplo é o funcionamento da usina em condições de sombreamento: assume-se agora que apenas o módulo número 9 esteja sombreado e que sua potência seja de 40W com uma VMP = 28 V, e que sua corrente então é $40\text{W}/28\text{V} = 1,43\text{A}$. O somatório total de potência é $40\text{W} + 9 \times 200\text{W} = 1840\text{W}$. Como a série de otimizadores precisa manter a tensão fixa de 400V, a corrente total será de $1840\text{W}/400\text{V} = 4,6\text{ A}$. Neste caso, tem-se que os otimizadores que não estão sofrendo o sombreamento precisam de uma tensão de saída de $200\text{W}/4,6\text{A} = 43,5\text{V}$. Já o otimizador que possui sombreamento, entregará uma tensão de $40\text{W}/4,6\text{A} = 8,7\text{V}$. Assume-se a tensão fixa de 400V da série de otimizadores e tem-se então a

tensão de $9 \times 43,5V + 8,7V = 400V$. Neste caso, os otimizadores sem sombreamento estão atuando como conversores elevadores e o sombreamento como conversor abaixador. O exemplo descrito anteriormente com um módulo sombreado é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Operação dos otimizadores com sombreamento parcial.



A operação com tensão fixa traz alguns benefícios como:

- Flexibilidade na instalação: módulos com diferentes potências podem ser conectados e ainda instalados em diferentes inclinações.
- Maximização da eficiência do inversor e confiabilidade: O inversor da SolarEdge trabalha com tensão fixa, o inversor sempre opera com tensão fixa, portanto a conversão de CC para CA ocorre no ponto de melhor eficiência do inversor.
- Redução do custo de instalação: com a série de otimizadores é reduzido o cabeamento.
- Temperatura: Um dos fatores limitantes do tamanho das *strings* é a temperatura. Como o tamanho da string é único, dependendo do otimizador, a string pode ser maior;
- Maior segurança: todos os otimizadores de potência iniciam seu funcionamento com “1V de segurança” e somente é elevado seu nível de tensão quando é conectado à rede da distribuidora.

A Figura 21 apresenta um inversor com otimizador da marca SolarEdge.

Figura 21 – Inversor com otimizadores SolarEdge.



Os inversores da SolarEdge e APsystems utilizam a tecnologia *Module Level Power Electronics* (MLPE). Esta tecnologia permite que cada modulo trabalhe em seu melhor desempenho, mesmo em condições de sombreamento e diferentes inclinações, adicionando segurança as instalações.

5. ESTUDO DE CASO EM UMA USINA EM MINAS GERAIS

5.1. Considerações iniciais

O capítulo 5 apresenta um estudo de caso que engloba os conceitos até aqui vistos e aplica em uma planta real instalada em uma cidade de Minas Gerais.

5.2. Estudo de caso

Este estudo de caso contém a análise da geração de uma usina fotovoltaica instalada na cidade de Tocos do Moji - MG. Nesta usina utiliza-se duas diferentes topologias de inversores, sendo elas: inversores SolarEdge e inversores APsystems. O objetivo desse estudo é comparar o desempenho da usina fotovoltaica frente aos dois modelos de inversores de frequências utilizados. Para isso compara-se três parâmetros obtidos das medições da usina, sendo eles: potência gerada, tensão e corrente. A potência gerada pelos módulos conectados aos inversores de duas diferentes topologias fornece uma comparação interessante, já que os módulos conectados a esses inversores estão sob mesmas condições climáticas e de instalação.

Como o estudo é de comparação de geração entre dois modelos diferentes de inversores, a seguir, detalha-se cada um desses modelos para melhor entendimento do estudo. Os inversores utilizados na comparação são:

- Micro inversor APsystems, modelo YC1000:

O micro inversor APsystems YC1000 possui quatro canais de entrada, com uma potência de saída de pico de 1130W. Sua eficiência máxima é de 95%, com eficiência de MPPT de 99,9%.

- SolarEdge SE17k:

O inversor SolarEdge SE17K, conectado em 127/220V possui uma potência máxima de saída de 13.365W, com uma eficiência máxima de 98%.

- Otimizador de potência P730:

O otimizador de potência P730, possui uma potência nominal de 730W, com uma faixa de tensão de MPPT de 12,5 a 105V, apresentando uma eficiência máxima de 99,5%.

Apesar de ter sido citado anteriormente, agora faz-se uma descrição detalhada do local onde a usina está instalada. A planta solar fotovoltaica está instalada na cidade de Tocos do Moji, sul de Minas Gerais. No local funciona uma distribuidora de morangos que devido ao uso intenso de câmaras frias, sua fatura de energia elétrica tem um custo representativo em seu orçamento. A rede de energia elétrica pertence à Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. A Figura 22 apresenta uma foto do telhado onde foi feita a instalação e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a apresenta uma foto com os detalhes da usina instalada.

Para suprir o consumo de energia elétrica local, foi necessário a instalação de 44 módulos de 330Wp, do fabricante DAH Solar, modelo DHP72P - Policristalino, utilizando o micro inversor do fabricante APsystems YC1000 trifásico 127/220V de 1kVA de potência máxima de saída e um inversor do fabricante SolarEdge SE17k, com 18 otimizadores de potência modelo P730 do fabricante SolarEdge.

No micro inversor foram conectados 8 módulos fotovoltaicos, contemplando então dois YC1000.

Entre as características do local, temos que o telhado é um telhado de ginásio, ou seja, possui diferentes inclinações, dificultando a instalação de inversores *string*. No local temos a presença de sombreamento devido a ação de circuladores de ar, porém o *mismatch* para módulos deve ser observado, uma vez que cada placa fotovoltaica apresenta uma diferente inclinação, resultando em potências diferentes por módulos.

O modelo dos otimizadores utilizados é o P730. Como característica, ele exige a associação em série de dois módulos fotovoltaicos, portanto é possível acompanhar via Internet a geração de cada dois módulos. Devido a característica do otimizador e a necessidade de associação de módulos, a planta fotovoltaica foi instalada com a associação de módulos em série na mesma inclinação, ou seja, mesma linha do telhado, evitando assim o *mismatch* de módulos fotovoltaicos.

Para maior aproveitamento de área, foi utilizado trilhos metálicos de 6,6m, com apoios finais com altura ajustadas, viabilizando a instalação dos módulos fotovoltaicos no local.

Figura 22 – Foto do telhado da instalação.



Figura 23 – Detalhamento da instalação com pequenas diferenças de ângulo.



Apesar da usina conter um total de 44 módulos instalados, para uma análise mais fiel coletou-se os dados de geração de dois módulos conectados ao inversor com otimizador SolarEdge e 2 módulos utilizando micro inversor APsystems, que estavam com a mesma inclinação e com as mesmas condições de instalação. Estes módulos utilizados são apresentados na Figura 24, sendo os dois módulos selecionados em amarelo com o número 1 utilizando os micro inversores APsystems os dois módulos

selecionados em amarelo com o número 2 utilizando a tecnologia SolarEdge com otimizadores.

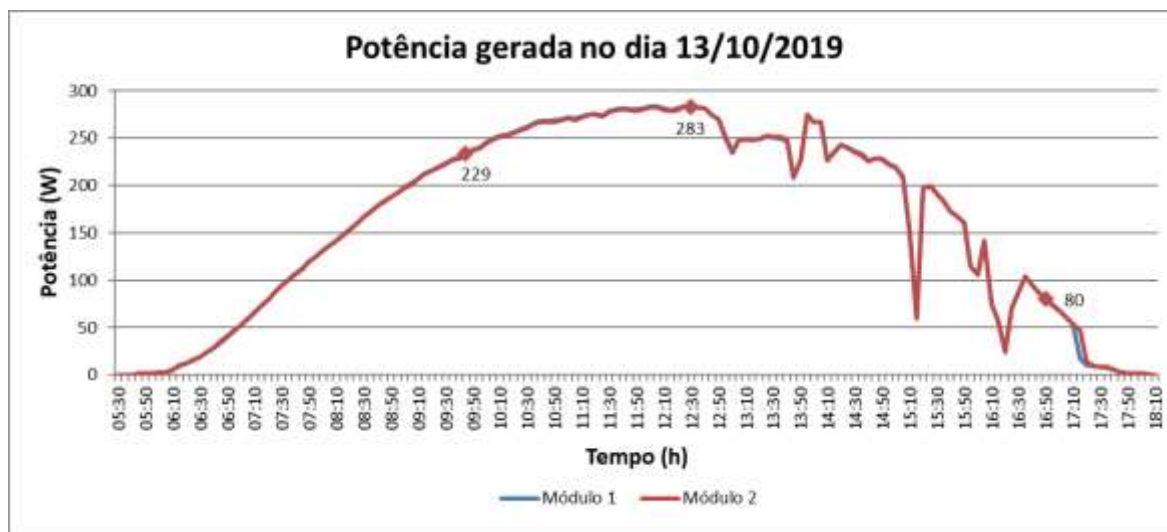
Figura 24 – Detalhamento de cada tecnologia de inversor utilizada (1 – APsystems e 2- SolarEdge).



Todos os dados utilizados para as análises foram retirados dos respectivos sites dos fornecedores dos dois modelos de inversores citados. Esses sites monitoram em tempo real os módulos instalados em seus respectivos inversores.

Inicialmente tem-se uma comparação da geração de um dia específico no mês de outubro, que foi o dia 13/10/2019. Nessa comparação, além dos dados da potência gerada mostra-se dados de tensão e corrente dos pares de módulos APsystems e SolarEdge. O gráfico da Figura 25 apresenta a geração no dia 13/10/2019 para os dois módulos que utilizam o inversor APsystems. O que se pode notar é que a maior geração ocorre por volta de meio-dia, tanto para o módulo 1 quanto para o módulo 2. Alguns pontos foram marcados no gráfico e apresentam o valor da potência gerada naquela hora do dia, como por exemplo, a potência de 283W gerada próximo as 12:30 h, como aponta a curva da Figura 25. Outro detalhe é que as curvas de geração dos dois módulos estão praticamente sobrepostas, o que era esperado, já que os dois módulos estão lado a lado sob as mesmas condições e utilizando o mesmo modelo de inversor.

Figura 25 – Curvas de potência gerada em dois módulos com inversor APsystems.



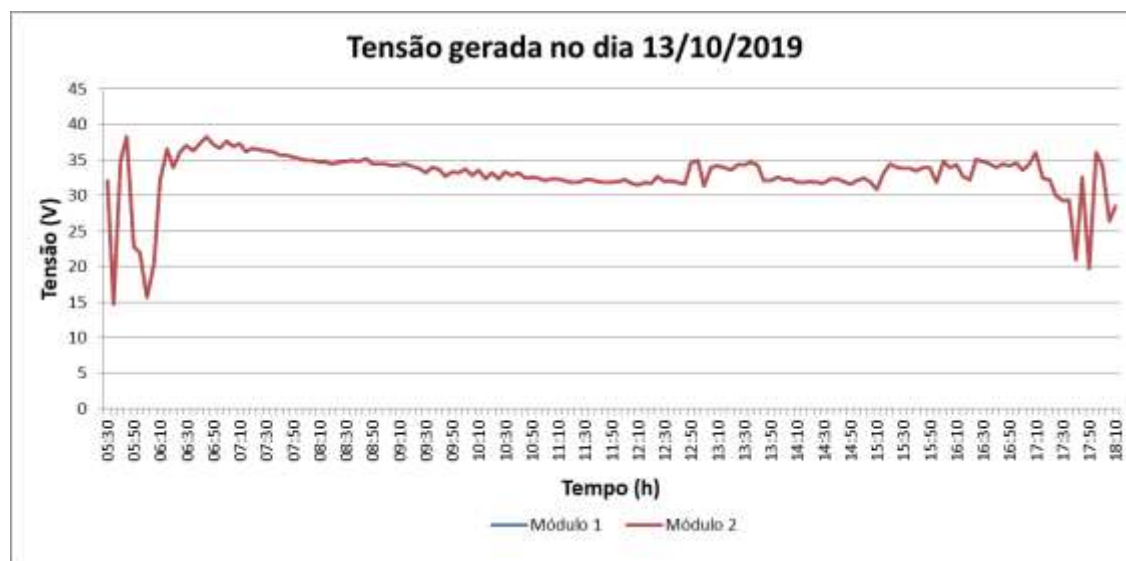
Para a mesma data, apresenta-se também a curva de tensão e a curva de corrente geradas pelos dois módulos que utilizam o inversor APsystems. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a curva de corrente para os dois módulos. Novamente percebe-se uma sobreposição das curvas devido aos mesmos fatores anteriormente explicados. A curva de corrente se parece muito à curva de potência gerada, isso porque a variação da corrente está diretamente ligada à irradiação recebida pelos módulos. Assim, na medida em que se aumenta a irradiação, a corrente aumenta devido ao maior fluxo de elétrons que atravessa o dipolo elétrico do material químico da placa.

A tensão gerada durante o dia 13/10/2019 é apresentada na **Erro! Fonte de r** **eferência não encontrada.**, pode-se notar um comportamento diferente das curvas apresentadas anteriormente nas Figuras 25 e 26. A curva já inicia com um valor de tensão alto, isso porque mesmo sem geração de potência nas primeiras horas do dia, existe a tensão de circuito aberto nos terminais dos módulos, desta maneira há a leitura desta tensão. Durante o dia pode-se perceber que há uma queda na tensão e depois um aumento novamente ao final do dia, formando uma espécie de pequeno vale no formato da onda da tensão. Isso ocorre porque com o aumento da irradiação há uma pequena queda de tensão devido aos efeitos da temperatura. Porém essa queda é bem pequena se comparada ao aumento da corrente, portanto a geração tende a aumentar ao longo do dia, até atingir seus valores máximos em horários próximos ao meio dia.

Figura 26 – Curvas de corrente gerada em dois módulos com inversor APsystems.



Figura 27 – Curvas de tensão gerada em dois módulos com inversor APsystems.



As mesmas curvas de potência, corrente e tensão são geradas para o inversor SolarEdge e são apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada., Erro! Fonte de referência não encontrada. e**

Figura 30, respectivamente. A diferença dessas curvas para as curvas anteriores é que o inversor SolarEdge utiliza um otimizador que faz a análise de dois módulos em série. Desta maneira, a curva de potência e a curva tensão apresentam a soma dos valores de potência e tensão do módulo 1 e módulo 2 em uma única curva. A curva de corrente não se soma, já que a corrente que passa pelo módulo 1 é a mesma que passa pelo módulo 2, já que estes dois módulos estão conectados em série.

Figura 28 – Curva de potência gerada para dois módulos com inversor SolarEdge.



Figura 29 – Curva de corrente gerada para dois módulos com inversor SolarEdge.

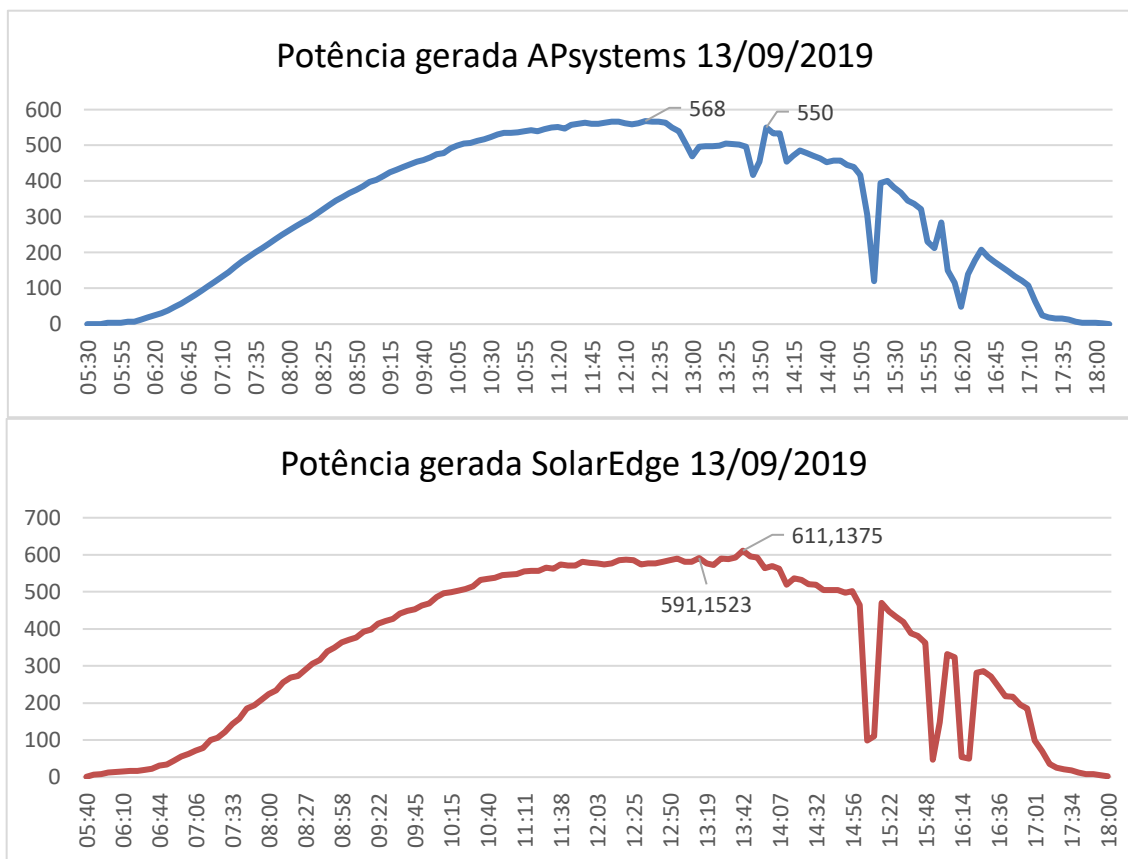


Figura 30 – Curva de tensão gerada para dois módulos com inversor SolarEdge.



Para uma melhor comparação dos dois inversores para a data do dia 13/10/2019, a Figura 31 apresenta em um mesmo gráfico as curvas de potência geradas pelo inversor APsystems e pelo inversor SolarEdge.

Figura 31 – Curva de potência gerada pelos módulos com os inversores APsystems e SolarEdge.



Como o otimizador do inversor SolarEdge fornece os dados da soma das potências geradas pelos dois módulos, somou-se a potência dos dois módulos que utilizam o inversor APsystems e assim fez-se uma curva que pode ser comparada utilizando os mesmos critérios, como mostra a Figura 31.

Pela Figura 31 pode se observar que potência gerada pelos módulos do APsystems nunca ultrapassam a faixa de 600W, isso pelo fato do micro inversor APsystems limitar essa potência, já que sua potência nominal é de 548 W. Já o inversor SolarEdge utilizado tem tensão nominal suficiente para gerar o valor de pico dos módulos, caso eles alcancem esse valor ou valores próximos.

A análise dos gráficos anteriores fez um comparativo de potência, tensão e corrente no período de um dia para os dois tipos de inversores utilizados (SolarEdge e APsystems). Apesar de se ter o detalhamento de mais variáveis na análise anterior, o importante para a análise global é a energia gerada pela usina, que é o que será creditado na conta de energia do cliente. Dessa maneira, fez-se um estudo de geração

em um período de uma semana utilizando os mesmos pares de módulos com inversores APsystems e SolarEdge da análise anterior.

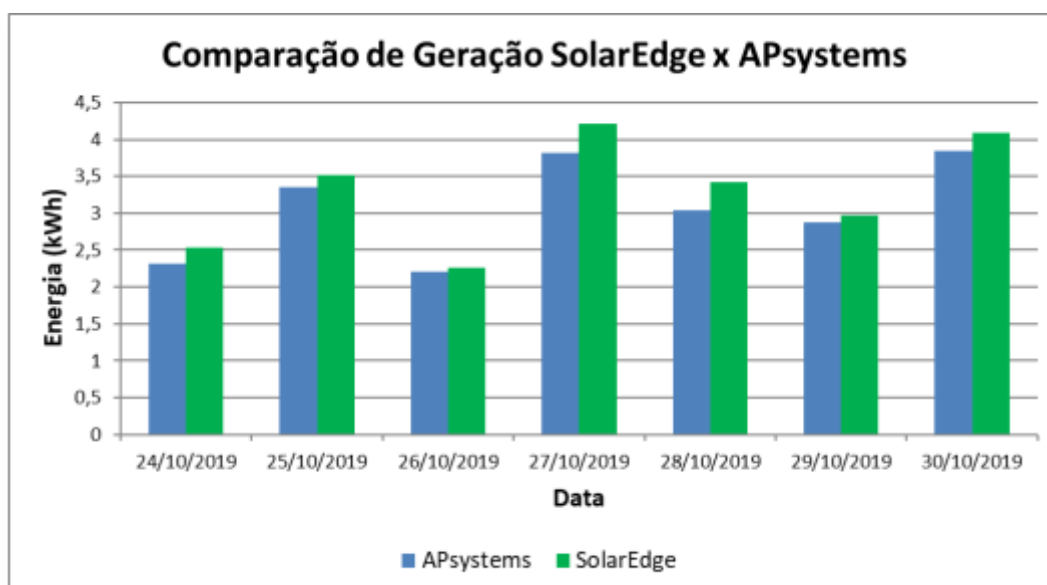
O período de análise vai do dia 24/10/2019 a 30/10/2019, ou seja, sete dias de análise. A Tabela 1 apresenta o comparativo de geração de energia nos módulos selecionados utilizando os dois modelos de inversores.

Tabela 1 – Energia gerada pelos módulos com os inversores APsystems e SolarEdge em um intervalo de tempo de uma semana.

| Data | Energia (kWh) | |
|--------------|---------------|--------------|
| | APsystems | SolarEdge |
| 24/10/2019 | 2,32 | 2,54 |
| 25/10/2019 | 3,35 | 3,51 |
| 26/10/2019 | 2,2 | 2,26 |
| 27/10/2019 | 3,82 | 4,21 |
| 28/10/2019 | 3,04 | 3,43 |
| 29/10/2019 | 2,88 | 2,97 |
| 30/10/2019 | 3,84 | 4,09 |
| Total | 21,45 | 23,00 |

A Figura 32 apresenta o gráfico dos dados apresentados na Tabela 1, onde tem-se as energias geradas pelos módulos com os dois diferentes tipos de inversores.

Figura 32 – Energia gerada pelos módulos com os inversores APsystems e SolarEdge em um intervalo de tempo de uma semana.



O que se pode notar é que a geração dos módulos conectados aos inversores SolarEdge superou a geração do APsystems em todos os dias. Isso acontece devido aos seguintes fatores:

- *Overpaneling* dos micro inversores:

O micro inversor escolhido, possui uma potência nominal de 900W. Com a utilização de 4 módulos fotovoltaicos de 330Wp, temos uma potência máxima de entrada de 1320W, ou seja, temos uma potência de 46,6% acima a potência nominal do inversor.

Para que a curva de geração tenha uma maior eficiência em períodos de baixa radiação solar, é utilizado o *overpaneling*. A prática de *overpaneling* é comum ao mercado solar fotovoltaico, uma vez que devido as influências de temperatura são raros os momentos em que o módulo entrega sua potência nominal ao inversor. A cada grau de temperatura que elevamos no módulo, é reduzido cerca de 0,5% em sua eficiência.

- Limitação da potência de entrada:

Nos canais analisados, temos uma potência de 330Wp por entrada. A potência nominal do equipamento é de 900W, ou seja, 225Wp por canal por potência nominal. O micro inversor operando em sua potência máxima de saída, teremos uma potência máxima de entrada de 282,5Wp. Nos dados analisados, é percebido que em alguns momentos do dia, as placas fotovoltaicas entregam sua potência máxima, porem quando comparado com o SolarEdge, o otimizador de potência apresenta uma potência de entrada de 730W, ou seja, uma potência inferior a potência máxima entregue pelas duas placas conectadas em série.

Como percebido, em alguns momentos do dia, o SolarEdge é capaz de drenar uma potência superior a potência drenada pelo micro inversor APsystems.

- Eficiências:

Conforme analisado no manual dos equipamentos, o SolarEdge possui uma eficiência nos otimizadores e inversores superior ao micro inversor APsystems. O SolarEdge opera com tensão fixa, como a tensão é fixa, o conversor sempre opera em seu ponto de máxima eficiência ou próximo a ele. Os otimizadores possuem uma alta eficiência, e não realizam a conversão de CC para CA, apenas elevam ou reduzem a tensão, para manter a tensão da *string* fixa.

- Número de conversões:

Utilizando micro inversores, temos que a cada quatro módulos fotovoltaicos, será realizado uma conversão de CA para CC. Analisando de uma maneira global, quanto maior o número de conversões, maior a importância das eficiências de conversão, e maior as perdas.

Comparando o micro inversor com um inversor multi *string*, a conversão de CC para CA é centralizada, com tensão fixa, sem a presença de *overpaneling*, portanto com uma eficiência global superior.

6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões gerais

Com este trabalho foi possível verificar a diferença de geração de energia elétrica através das placas fotovoltaicas com a utilização com duas topologias de inversores fotovoltaicos.

No período analisado, o inversor com otimizadores da SolarEdge foi superior em geração a 7,2% no período analisado, que é de 7 dias. A superioridade de geração se deve principalmente a diferença de *overpaneling* entre equipamentos, fazendo com que se imponha uma limitação de potência ao inversor.

A diferença de geração analisando a longo prazo, em um período mínimo de 10 anos, não continuará nestes valores, motivados principalmente pelo número de rastreadores MPPTs apresentados no micro inversor, com o envelhecimento das placas e consequente redução de potência, o *overpaneling* se reduzirá, porém o *mismatch* entre placas será superior.

Com a elevação do *mismatch* entre placas, devido a necessidade de associação das placas fotovoltaicas em série no SolarEdge, sua potência gerada tende a reduzir enquanto no micro inversor se elevará.

Apesar da diferença de geração entre equipamentos, os dois equipamentos são os melhores equipamentos disponíveis no mercado nacional e são as melhores opções que quem pretende gerar sua própria energia elétrica com qualidade, robustez e principalmente segurança.

REFERÊNCIAS

- [1] International Renewable Energy Agency - IRENA, **Renewable Energy and Jobs Annual Review 2019**. Disponível em:
["https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019"](https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019). Acesso em: 9 de novembro de 2019.

- [2] V. R. Junior, **Teoria de Semicondutores**, Itabira/MG: Notas de Aula. Disponível em ["https://br.depositphotos.com/148131135/stock-photo-3d-render-of-atom-structure.html"](https://br.depositphotos.com/148131135/stock-photo-3d-render-of-atom-structure.html). Acesso em: 9 de novembro de 2019.

- [3] International Energy Agency - IEA, **Review on Failures of Photovoltaic Modules, Report IEA-PVps T13-01:2013**. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2013_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf. Acesso em: 9 de novembro de 2019.

- [4] D. M. Scholten, N. Ertugrul, W. L. Soong, School of Electrical and Electronic Engineering, **Micro-Inverters in Small Scale PV Systems: A Review and Future Directions**. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6725465>. Acesso em: 9 de novembro de 2019.

- [5] APSYSTEMS. **Manual do Usuário – YC1000-3-380 Micro inversor Trifásico Ver 1.0 PT BR APsystems**. Disponível em:
https://microinversor.com.br/repositorio/pt-br_yc1000-3-380-for-brazil-user-manual_rev1.0_2017-10-14.pdf. Acesso em: 9 de novembro de 2019.

- [6] SOLAREEDGE. Application Note: **SolarEdge Fixed String Voltage, Concept of Operation**. Disponível em: https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se_application_fixed_string_voltage.pdf. Acesso em: 9 de novembro de 2019.