

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

JOÃO VINICIUS PIQUERAS HALUCHE

**ANÁLISE DO IMPACTO DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR (FDI)
EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA - PR

2019

JOÃO VINICIUS PIQUERAS HALUCHE

**ANÁLISE DO IMPACTO DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR (FDI)
EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA - PR

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

JOÃO VINICIUS PIQUERAS HALUCHE

ANÁLISE DO IMPACTO DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR (FDI) EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 04 de Outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno(a) João Vinicius Piqueras Haluche foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues
Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Me. Romildo Alves dos Prazeres
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues
UTFPR

Prof. Me. José Maia
UTFPR

| |
|---|
| O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso |
|---|

Resumo

HALUCHE, João Vinicius Piqueras. **Análise do Impacto do Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) em Sistemas Fotovoltaicos**. 49 pág. Monografia (Especialização em Energia Renováveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Com o aumento da demanda de energia elétrica no Brasil, está se buscando alternativas de fontes de geração, para assim ser possível atender esta crescente da demanda. Ainda, questões ambientais estão sendo cada vez mais exigentes em função do aquecimento global. Com isso, os projetos e instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil estão crescendo anualmente em níveis acentuados e com isso questões técnicas começam a ser abordadas. Este trabalho tem como objetivo apresentar e analisar o impacto da determinação em projeto do Fator de dimensionamento do Inversor (FDI) nestes sistemas. Dessa maneira, foram levantados os dados de instalação, irradiação no plano do painel e a geração de energia no período de avaliação de seis sistemas fotovoltaicos conectados à rede com FDIs diferentes. Com estes dados levantados, realizou-se a comparação da *Performance Ratio* dos sistemas afim de verificar qual o impacto que este fator teve na performance destes sistemas. Notou-se que os sistemas com FDI praticamente igual a 1 tiveram os melhores resultados de *performance ratio*.

Palavras Chaves: Energia Solar. Energia Fotovoltaica. Fator de Dimensionamento do Inversor.

ABSTRACT

HALUCHE, João Vinicius Piqueras. **Impact of the Inverter Loading Ratio (ILR) Analysis in Photovoltaic Systems.** 49 pg. Monograph (Specialization in Renewable Energies) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Due to the increasing demand for electrical energy in Brazil, alternative sources of generation are being researched to be able to support this growing demand. Still, environmental issues are becoming rigorous due to global warming. With this, the projects and installations of grid-connected photovoltaic systems in Brazil are growing annually at sharp levels and as a result, technical issues are beginning to be addressed. This work aims to present and analyze the impact of design determination of Inverter Loading Ratio (ILR) on these systems. Thus, the installation data, panel plane irradiation and power generation in the evaluation period of six grid-connected photovoltaic systems with different ILRs were collected. With these data, the performance ratio of the systems was compared in order to verify the impact that this ratio had on the performance of these systems. The systems that presented the better performance ratio were those with ILR near to 1.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Energy. Inverter Loading Ratio.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 7 – Características físicas – “PLANTA 3” | 38 |
| Tabela 8 – Energia produzida pela “planta 3” | 38 |
| Tabela 9 – PR – “planta 3” | 39 |
| Tabela 10 – Características físicas – “PLANTA 4” | 40 |
| Tabela 11 – Energia produzida pela “planta 4” | 40 |
| Tabela 12 – PR – “planta 4” | 41 |
| Tabela 13 – Características físicas – “PLANTA 5” | 42 |
| Tabela 14 – Energia produzida pela “planta 5” | 42 |
| Tabela 15 – PR – “planta 5” | 43 |
| Tabela 16 – Características físicas – “PLANTA 6” | 43 |
| Tabela 17 – Energia produzida pela “planta 6” | 44 |
| Tabela 18 – PR – “PLANTA 6” | 44 |
| Tabela 19 – Separação dos sistemas em grupos | 45 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura de célula fotovoltaica..... | 16 |
| Figura 2 - Espectro eletromagnético da radiação solar..... | 17 |
| Figura 3 - Evolução da capacidade instalada no mundo..... | 20 |
| Figura 4 - Quantidade anual de conexões..... | 21 |
| Figura 5 - Módulo Fotovoltaico..... | 22 |
| Figura 6 - Informações técnicas módulo fotovoltaico..... | 23 |
| Figura 7 - Curva I-V e P-V..... | 24 |
| Figura 8 - Stringbox Solar..... | 24 |
| Figura 9 - Inversor fotovoltaico..... | 25 |
| Figura 10 - Ligação série..... | 26 |
| Figura 11 - Ligação paralelo..... | 27 |
| Figura 12 - Ganho na produção energética..... | 32 |
| Figura 13 - "Clipping"..... | 33 |
| Figura 14 - Sistema Fotovoltaico "planta 1"..... | 34 |
| Figura 15 - Irradiação corrigida "PLANTA 1"..... | 34 |
| Figura 16 – Sistema Fotovoltaico “planta 2”..... | 35 |
| Figura 17 – Irradiação corrigida “PLANTA 2”..... | 36 |
| Figura 18 – Sistema Fotovoltaico “planta 3”..... | 37 |
| Figura 19 – Irradiação corrigida “PLANTA 3”..... | 38 |
| Figura 20 – Sistema Fotovoltaico “planta 4”..... | 39 |
| Figura 21 – Irradiação corrigida “PLANTA 4”..... | 40 |
| Figura 22 – Sistema Fotovoltaico “planta 5”..... | 41 |
| Figura 23 – Irradiação corrigida “PLANTA 5”..... | 42 |
| Figura 24 – Irradiação corrigida “PLANTA 6”..... | 43 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 | TEMA..... | 11 |
| 1.1.2 | Delimitação do Tema..... | 12 |
| 1.2 | PROBLEMAS E PREMISSAS..... | 12 |
| 1.3 | OBJETIVOS..... | 12 |
| 1.1.3 | Objetivo Geral..... | 12 |
| 1.1.4 | Objetivos Específicos..... | 13 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA..... | 13 |
| 1.5 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 13 |
| 1.6 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 15 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 16 |
| 2.1 | ENERGIA SOLAR – CONCEITOS..... | 16 |
| 2.1.1 | O efeito fotovoltaico..... | 16 |
| 2.1.2 | Radiação Solar..... | 18 |
| 2.2 | ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO..... | 19 |
| 2.3 | COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE..... | 22 |
| 2.3.1 | Módulos Fotovoltaicos..... | 23 |
| 2.3.2 | Stringbox..... | 25 |
| 2.3.3 | Inversores..... | 26 |
| 2.4 | TIPOS DE LIGAÇÃO ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS..... | 27 |
| 2.4.1 | Ligação série..... | 27 |
| 2.4.2 | Ligação paralelo..... | 28 |
| 2.4.3 | Ligação Mista..... | 29 |
| 2.5 | ÍNDICES DE MÉRITO..... | 29 |
| 2.5.1 | Yield (produtividade)..... | 29 |
| 2.5.2 | Fator de Capacidade..... | 30 |
| 2.5.3 | Performance Ratio (Taxa de Desempenho)..... | 31 |
| 2.7 | O FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR (FDI)..... | 31 |
| 3. | DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÕES..... | 34 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.6 | APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 1” | 34 |
| 3.1.1 | Cálculo da PR – “planta 1” | 36 |
| 3.2 | APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 2” | 36 |
| 3.2.1 | Cálculo da PR – “planta 2” | 38 |
| 3.3 | APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 3” | 38 |
| 3.3.1 | Cálculo da PR – “planta 3” | 40 |
| 3.4 | APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 4” | 40 |
| 3.4.1 | Cálculo da PR – “planta 4” | 42 |
| 3.5 | APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 5” | 42 |
| 3.5.1 | Cálculo da PR – “planta 5” | 44 |
| 3.6 | APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 6” | 44 |
| 3.6.1 | Cálculo da PR – “planta 6” | 45 |
| 3.7 | COMPARAÇÃO ENTRE AS PERFORMANCES RATIOS (PRS) | 46 |
| 4. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 49 |
| | REFERÊNCIAS | 50 |

1. INTRODUÇÃO

As instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) vem aumentando de forma acelerada na maioria dos países ao redor do mundo.

De acordo com o estudo levantado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a capacidade instalada acumulada mundial alcançou 402,5GW no final de 2017, mostrando uma adição de mais de 98GW somente neste mesmo ano (ABSOLAR, 2018)

No Brasil o cenário não é diferente, tanto que neste mesmo estudo consta que no ano de 2017 o Brasil ingressou no ranking mundial de potência instalada adicionada por ano. Ou seja, no ano de 2017 o Brasil foi o décimo país que mais instalou sistemas de energia solar fotovoltaica (ABSOLAR, 2018).

Com o número de instalações de SFVCR crescendo em todo o mundo e também no Brasil, é de extrema importância que estes sistemas sejam confiáveis e seguros. Em termos da confiabilidade dos sistemas, existem diversos fatores que influenciam neste quesito, sendo uma delas o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI).

Este FDI é representado pela razão entre a potência de saída dos inversores fotovoltaicos e a potência pico instalada de módulos do sistema. (ZILLES et al, 2012)

De forma matemática, este fator pode ser representado também pela equação 1.1.

$$FDI = \frac{P_{inv}}{P_{FV}} \quad (1.1)$$

Isto posto, é necessário que se conheça as vantagens e as desvantagens que estão embutidas na determinação do FDI em SFVCR. O FDI pode ser determinado entre 0 e 1 mostrando que a potência de saída do inversor é menor que a potência pico dos módulos (inversor sobrecarregado) ou pode ser maior que

1, mostrando que a potência de saída do inversor é maior que a potência pico dos módulos.

O preço dos módulos fotovoltaicos vem apresentando uma acentuada redução em seus preços. Já os inversores, apesar de também apresentarem uma redução de custo, não é tão acentuada quando comparada à dos módulos. Com isso, busca-se otimizar ao máximo a utilização destes equipamentos, e para isto, a prática de determinar FDI entre 0 e 1 nos projetos está cada vez mais presente (PINHO e GALDINO, 2014).

Portanto, o levantamento de dados de plantas com diversos FDIs diferentes e a comparação entre estes dados é de grande importância para avaliação das vantagens e desvantagens presentes nesta prática.

1.1 TEMA

O fator de dimensionamento do inversor (FDI) em sistemas fotovoltaicos é definido pela razão entre a potência máxima de saída do inversor e a potência total dos módulos do sistema. Portanto, o FDI de um sistema nos diz quanto a potência máxima de saída do inversor representa em relação à potência dos módulos. Quando esse FDI fica entre 0 e 1, significa que este inversor está “sobrecarregado” ou com “oversizing”, o que implica em consequências na produção de energia, nos índices de mérito e na vida útil dos equipamentos. Quando fica maior do que 1, significa que este inversor está “subcarregado”.

Nas folhas de dados dos fabricantes de inversores fotovoltaicos, existe um dado chamado geralmente de “potência máxima CC” ou “potência máxima de entrada” que define o máximo de potência de módulos que pode ser instalada na entrada deste inversor. Ainda não há um consenso entre os profissionais do setor de sistemas fotovoltaicos quanto a este fator, e ainda cabe que este fator depende da localização do projeto, dos equipamentos escolhidos, das condições onde o projeto será executado, entre outros

1.1.2 Delimitação do Tema

Comparar, com sistemas reais, informações como produção de energia, perdas do sistema e *Performance Ratio* (taxa de desempenho) de sistemas fotovoltaicos com diferentes FDIs.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O sobrecarregamento dos inversores em sistemas fotovoltaicos vem se tornando cada vez mais comum nos projetos destes sistemas. Dados reais confirmam que realmente há um ganho na produção de energia quando se sobrecarrega o inversor, mas por outro lado, as desvantagens decorrentes desta prática não são realmente levadas em consideração no projeto, ou pelo menos a maioria delas. Os próprios fabricantes dizem em suas folhas de dados que seus equipamentos suportam uma potência de entrada muito superior à sua potência nominal. Talvez tudo isso ocorra por desconhecimento dos projetistas ou simplesmente por ser um mercado novo e que ainda não são conhecidos os problemas que podem surgir decorrentes deste sobrecarregamento. Essa vantagem de produção de energia é realmente vantajosa? A produtividade do sistema aumenta? No que diz respeito à performance, essa vantagem de produção de energia eleva a performance do sistema também? Estes são alguns pontos importantes que devem ser levantados e debatidos por profissionais e pesquisadores do setor.

1.3 OBJETIVOS

1.1.3 Objetivo Geral

Analisar o impacto da determinação do sub ou sobrecarregamento do inversor em projetos de sistemas fotovoltaicos, comparando cenários de projetos com diferentes FDIs.

1.1.4 Objetivos Específicos

- Levantar as principais vantagens e desvantagens ao se determinar um FDI em projeto.
- Selecionar sistemas para comparações.
- Delimitar os critérios de comparação de sistemas com diferentes FDIs.
- Comparar os índices de mérito destes sistemas.

1.4 JUSTIFICATIVA

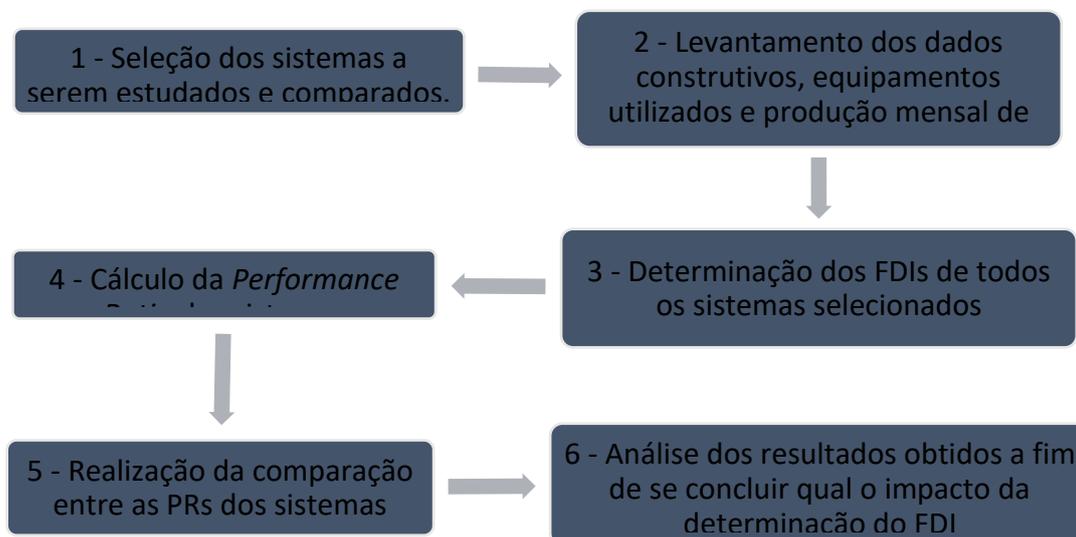
Inversores para sistemas fotovoltaicos são equipamentos eletrônicos e tem como componente principal o seu módulo de potência. Este módulo é fabricado para trabalhar em sua potência nominal de fábrica, porém a maioria dos fabricantes do setor de energia fotovoltaica determinam que seus inversores suportam grandes sobrecargas, chegando em alguns casos em até 50%. Ou seja, um inversor de 3kW de potência nominal suporta até 4,5kW de potência instalada em suas entradas. Sendo assim, essa sobrecarga (potência de módulos superior à potência do inversor) submetida aos inversores acarreta em um aumento na produção de energia do sistema, porém também acarreta em um aumento de perdas no sistema, aumento da temperatura de trabalho dos inversores, entre outros. Com isso, busca-se comparar sistemas com diferentes FDIs e levantar informações pertinentes para chegar-se a uma conclusão das reais vantagens e desvantagens decorrentes da determinação deste fator de dimensionamento.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho será estruturado de forma a levantar dados de plantas de SFVCR existentes e reais, e a partir destes dados, realizar uma comparação entre o desempenho destas plantas. Estes sistemas serão divididos em grupos para minimizar o efeito de outras variáveis que possam influenciar no desempenho, a fim

de comparar-se a influência da determinação do FDI no desempenho destas plantas fotovoltaicas.

O protocolo de pesquisa deste trabalho, que está apresentado a seguir, tem o intuito de demonstrar os passos das atividades realizadas para que se chegasse aos resultados obtidos.



1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

1 – Introdução – Apresentação do que trata o presente trabalho, quais os objetivos a serem alcançados, as justificativas pertinentes, a problematização e a metodologia seguida para a realização deste.

2 – Fundamentação Teórica – Revisão e fundamentação acerca do assunto de energia solar, sistemas fotovoltaicos, panorama brasileiro e apresentação de conceitos a serem abordados no trabalho.

3 – Desenvolvimento e Discussões – Apresentação das plantas a serem analisadas, levantamento dos dados destas plantas, cálculo dos índices de mérito, comparação entre as plantas e comparação com dados de irradiação disponibilizados pelo Atlas Solar do Estado do Paraná.

4 – Conclusões e Sugestões – Conclusões acerca dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados conceitos gerais sobre a energia solar fotovoltaica, a fim de fundamentar o assunto para melhor entendimento do presente do trabalho.

○ 2.1 ENERGIA SOLAR – CONCEITOS

2.6.2 2.1.1 O efeito fotovoltaico

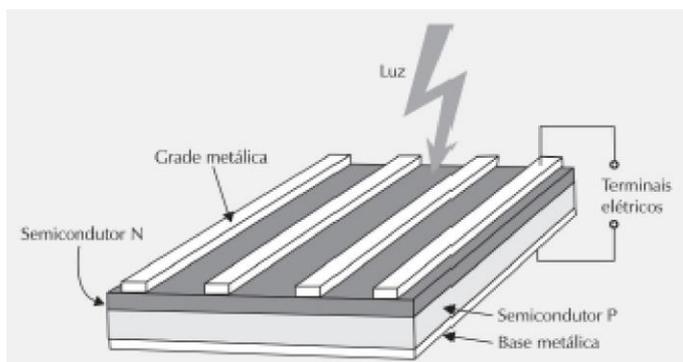
O que permite que a tecnologia da energia solar fotovoltaica seja possível e aplicada para geração de energia elétrica é o efeito fotovoltaico. Este efeito, descoberto em 1839 por Edmond Becquerel, consiste no surgimento de uma tensão elétrica nos terminais de uma célula eletroquímica, sendo este efeito causado pela absorção da energia presente na luz (PINHO E GALDINO, 2014).

Quando a célula é atingida por raios solares, estes raios, devido à sua energia, de uma forma simplória, fazem com que os elétrons livres dos materiais componentes das células se soltem e fiquem livres. Esses elétrons então, através de condutores específicos, são transportados pela célula. Esse transporte de elétrons, ou seja, cargas elétricas em movimento, caracterizam corrente elétrica.

As primeiras células fotovoltaicas que se tem registro foram feitas a partir do selênio e fabricadas por E. Frits em 1883. Após isso, em 1950, nos Laboratórios Bell, localizado nos Estados Unidos da América, as primeiras células com materiais semicondutores, no caso o silício, começaram a se desenvolver (PINHO E GALDINO, 2014).

A Figura 1 representa a estrutura de uma célula fotovoltaica e seus principais componentes.

Figura 1 - Estrutura de célula fotovoltaica



Fonte: VILLALVA, 2015

Nota-se na Figura 1 que a célula é composta por duas camadas de material semicondutor, representados por P e N. Além destes materiais, pode-se perceber uma grade metálica superior e uma base metálica inferior (VILLALVA, 2015).

Estas partes metálicas, ou seja, os coletores que formam as grades e a base, funcionam como os terminais elétricos. Sendo por esses materiais que os elétrons atingidos pelos raios solares são transportados para gerar a corrente elétrica.

O material semicondutor que está presente nas células fotovoltaicas, em sua grande maioria, é o silício. Esse condutor se faz presente em duas principais formas, conhecidas como monocristalino e policristalino.

A formação básica de uma célula fotovoltaica se baseia na junção de duas camadas de semicondutores. Sendo uma destas camadas de material tipo P e outra do tipo N. Por suas características, o material do tipo P apresenta falta de elétrons e o material do tipo N apresenta sobra de elétrons. Devido à esta diferença de elétrons entre as duas camadas, há uma circulação de elétrons entre estas. Quando estas camadas entram em contato uma com a outra, forma-se uma junção, fazendo com que os elétrons em sobra do material N migrem para as lacunas presentes no material P, formando uma barreira de potencial. Quando a luz do sol atinge a camada de material N, que fica na parte superior da célula, estes raios fornecem energia para os elétrons, fazendo com que estes rompam a barreira de potencial e alcancem a camada de material P (VILLALVA, 2015).

Apesar de uma única célula não conseguir de maneira isolada gerar uma quantidade relativamente grande de energia, estas podem ser conectadas uma as outras formando uma cadeia de células e assim aumentando significativamente a geração de energia elétrica.

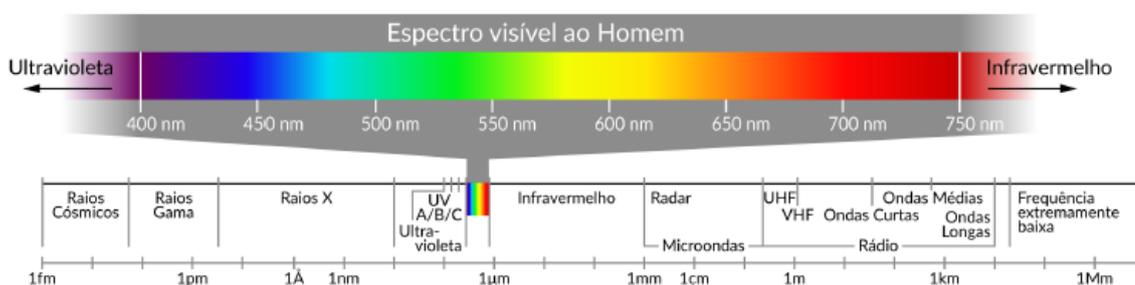
2.1.2 Radiação Solar

A energia proveniente do sol é um recurso renovável considerado inesgotável se comparado ao intervalo de tempo da vida humana no planeta. A taxa de emissão de energia que vem do sol é praticamente constante há bilhões de anos e com potencial energético suficiente para abastecer a vida na Terra por muito tempo (PEREIRA et al, 2017).

A radiação solar é a forma como a energia do sol é transmitida até a Terra. Essa radiação é composta por ondas eletromagnéticas com diferentes comprimentos de onda e diferentes frequências (VILLALVA, 2015).

Esta radiação emitida pelo sol contempla uma ampla faixa do espectro eletromagnético, desde o ultravioleta até o infravermelho. A Figura 2 representa um modelo de espectro eletromagnético da radiação solar.

Figura 2 - Espectro eletromagnético da radiação solar



Fonte: PEREIRA et al, 2017.

Os raios solares que chegam à Terra, em sua maior parte, estão localizados na faixa da luz visível, cerca de 50%. O restante se divide entre a faixa

da radiação infravermelha invisível e também a faixa da radiação ultravioleta invisível (PINHO E GALDINO, 2014).

A radiação solar ainda pode ser dividida em duas grandezas diferentes, a irradiância e a irradiação. A irradiância se refere à quantidade de radiação solar que atinge uma determinada área e está relacionada com a potência, sendo sua unidade dada por W/m^2 . Já a irradiação está relacionada com a energia propriamente dita, ou seja, é a irradiância integrada em um determinado intervalo de tempo. Sendo sua unidade dada por Wh/m^2 .

As condições Standard Test Conditions (STC) em que as células fotovoltaicas são testadas, é mantida uma irradiância de $1000W/m^2$. Quando esta irradiância varia, a potência instantânea das células também varia.

2.2 ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO

A partir da resolução normativa N^o 482 de 17 de abril de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tornou-se possível a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil.

Até então, não era possível realizar a instalação de um sistema fotovoltaico nesta modalidade, o que mudou com a chegada da REN 482. Com esta regulamentação em vigência, foi regulamentado o chamado sistema de compensação de energia. Esse sistema consiste na injeção de energia elétrica por parte do consumidor na rede de distribuição da concessionária de energia. O trecho a seguir foi retirado da própria resolução e em resumo explica o funcionamento deste sistema.

Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (REN 482, 2012, pag. 2).

Logo, o consumidor pode instalar um sistema de geração de energia fotovoltaica em sua propriedade, utilizar a energia para seu consumo próprio e o excedente de energia é injetado na rede da concessionária, tornando-se créditos para serem utilizados posteriormente em outro mês ou em outra unidade consumidora.

Neste sistema de compensação de energia existem quatro modelos de negócio que podem ser adotados pelos consumidores interessados. Sendo estes o autoconsumo na própria unidade de geração, o autoconsumo remoto, a geração em empreendimento com múltiplas unidades consumidoras e a geração compartilhada. A seguir, as definições e principais regras de cada modelo.

- Autoconsumo na própria unidade de geração: é o modelo em que o consumidor instala o sistema de geração distribuída em sua unidade consumidora e utiliza toda a energia gerada nessa própria unidade. Os créditos gerados pelo excedente de energia que é injetada na rede, é utilizado no mês seguinte para abater o faltante deste mês e assim sucessivamente.
- Autoconsumo remoto: é o modelo em que o consumidor instala o sistema de geração distribuída na sua unidade consumidora, utiliza a energia gerada na própria unidade e o excedente de energia que é injetada na rede é destinada a outra ou outras unidades. Para este caso, é necessário que as faturas de energia de todas as unidades estejam na mesma titularidade e que estejam na mesma área de concessão (mesma concessionária de energia).
- Geração em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras: é o modelo em que se caracterizam os condomínios, tanto verticais quanto horizontais. É definido quando se tem unidades consumidoras independentes e uma unidade consumidora para as instalações de uso comum que seja de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário. O sistema de geração distribuída

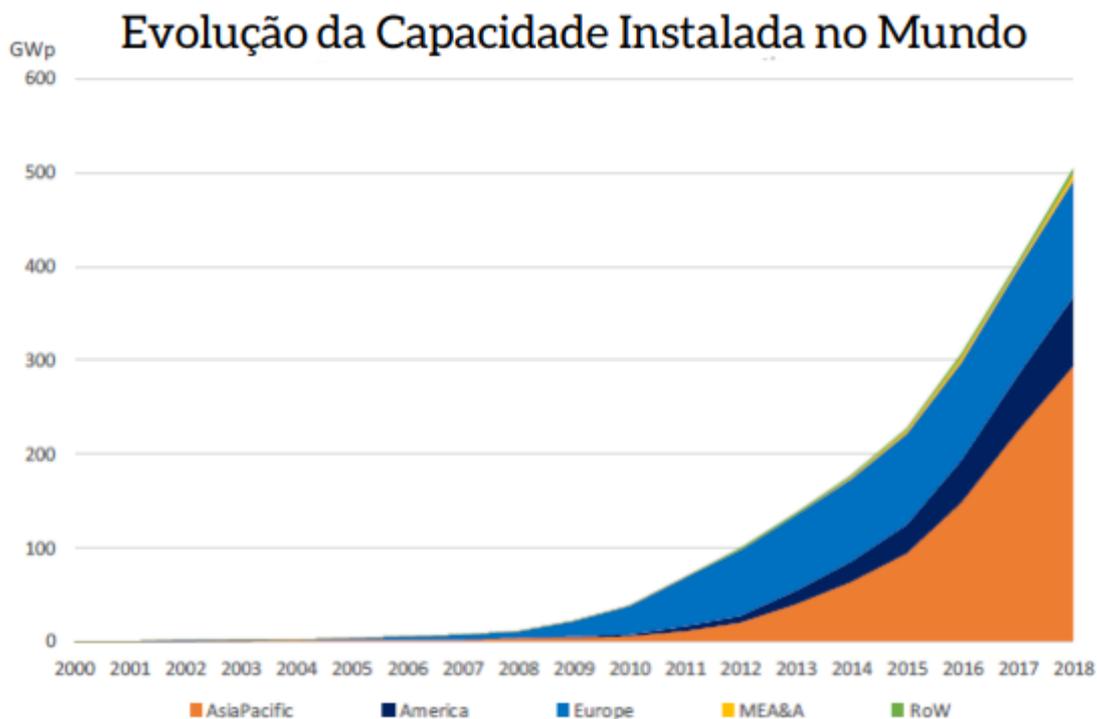
pode ser instalado para abater somente a unidade da área comum do empreendimento ou até para dividir entre os condôminos.

- Geração compartilhada: é o modelo em que consumidores se juntam em forma de consórcio ou cooperativa para criar uma unidade que contenha o sistema de geração distribuída e a energia excedente é distribuída entre os consorciados ou cooperados.

A partir destas definições, a quantidade de instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica cresceu de forma exponencial no país. A seguir apresentam-se dados reais que representam este crescimento.

Começando pelos dados referentes às instalações de âmbito internacional, na Figura 3 pode-se observar o crescimento de forma exponencial evidenciado pelo formato da curva na evolução da capacidade instalada no mundo de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Figura 3 - Evolução da capacidade instalada no mundo

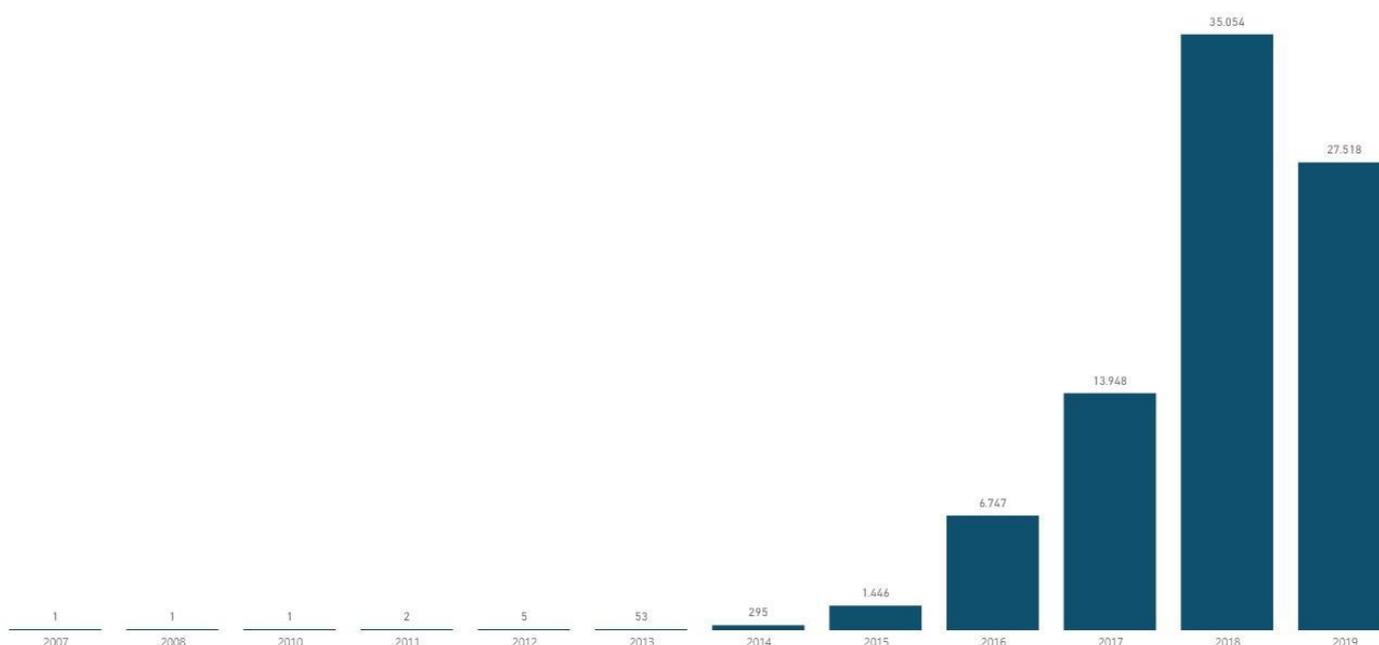


Fonte: IEA PVPS, Snapshot of Global PV Markets – Preliminary Report, 2019

Nota-se que em todos os continentes, houve um grande aumento na capacidade instalada de sistemas de geração fotovoltaica conectada à rede nos últimos anos. Percebe-se que nas américas o aumento entre os anos de 2008 e 2018 foi de mais de 300 vezes.

Na Figura 4 pode-se observar a quantidade de conexões de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ano a ano, desde 2007 até 2019. Ressalta-se que o ano de 2019 ainda não está finalizado e por isso o número de conexões ainda é menor que o ano de 2018.

Figura 4 - Quantidade anual de conexões



Fonte: ANEEL, 2019

2.3 COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede basicamente são compostos por módulos fotovoltaicos, stringbox (caixa de proteção CC) e inversor. Cada projeto é único e demanda uma série de cálculos e análises para se determinar quais os equipamentos necessários e adequados para o projeto em questão. A seguir, tem-

se uma descrição destes principais equipamentos que compõe um sistema fotovoltaico.

2.6.3 2.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Figura 5 - Módulo Fotovoltaico



Fonte: Canadian Solar Inc.

O módulo fotovoltaico é o principal componente de um sistema fotovoltaico, já que é este equipamento que é responsável por converter a energia vinda dos raios solares em corrente elétrica e consequentemente em energia elétrica.

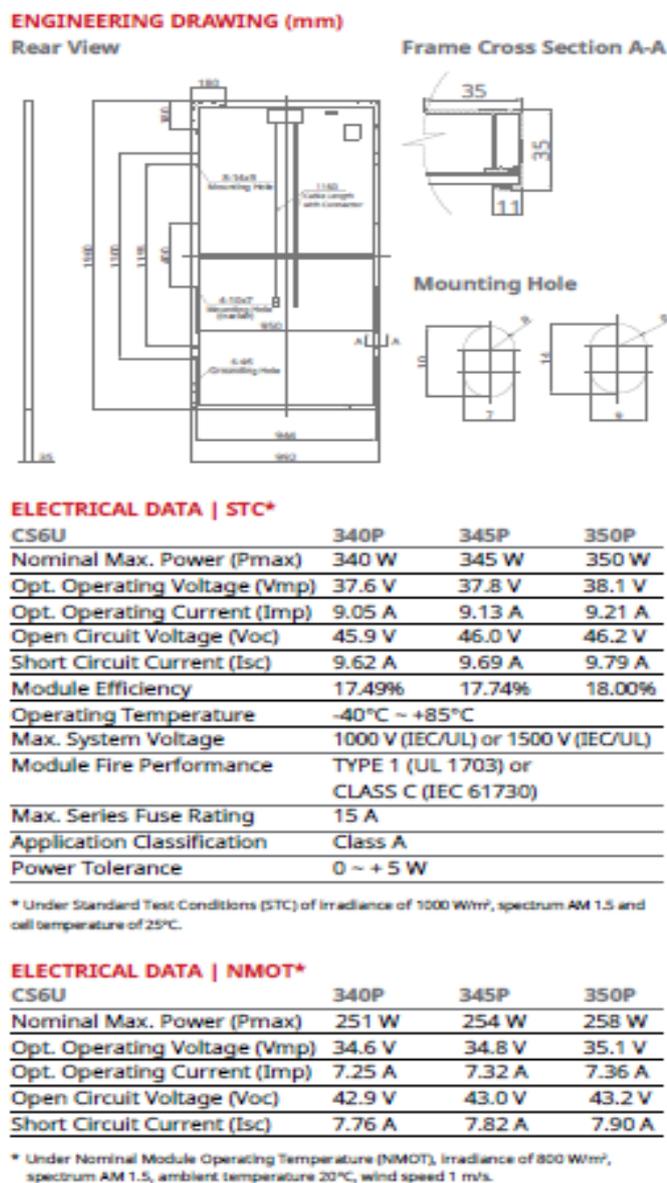
Os módulos fotovoltaicos são constituídos de várias células fotovoltaicas ligadas em série e/ou paralelo para produzir tensão e corrente suficientes para a produção de energia (PINHO e GALDINO, 2014).

Geralmente, os módulos são constituídos de 60 ou 72 células em série e/ou paralelo, obtendo níveis de tensão adequados, já que em série as tensões são somadas e em paralelo as correntes são somadas. A grande maioria dos módulos utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede são constituídos de células de silício, tanto policristalino quanto monocristalino.

As principais informações contidas nas folhas de dados dos módulos estão nas chamadas Condições Padrão de Teste (do inglês *Standard test conditions* – *STC*) e servem como base para cálculos necessários para casamento entre

módulos e inversores, sistemas de proteção e assim por diante. Estas principais informações estão contidas como exemplo na Figura 6.

Figura 6 - Informações técnicas módulo fotovoltaico

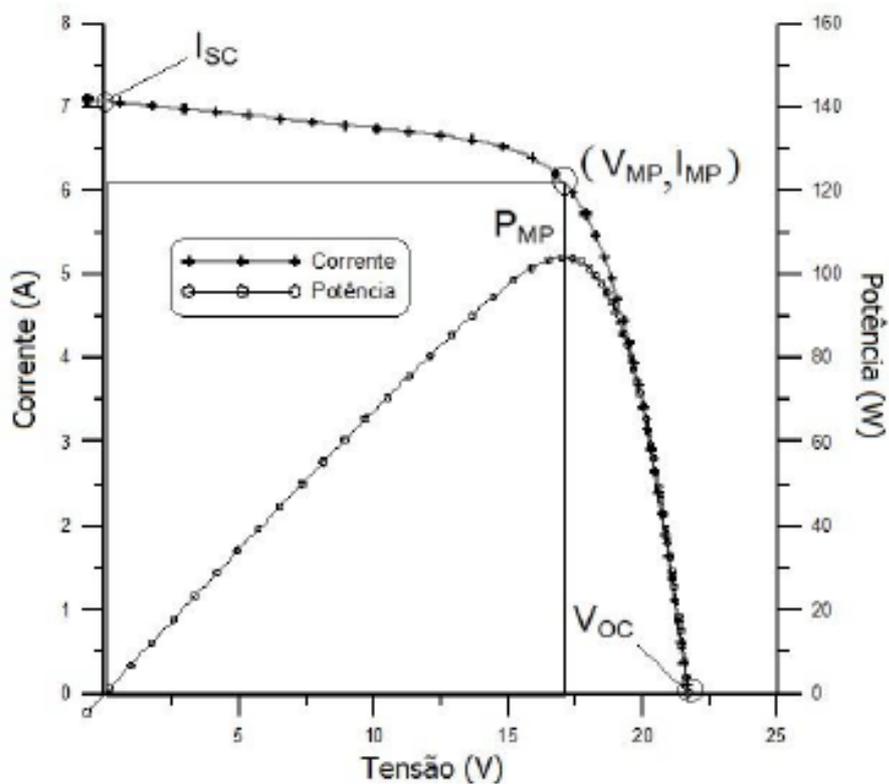


Fonte: Canadian Solar Inc.

Em posse destas informações e das outras que também constam nas folhas de dados e nos manuais de instalação dos módulos, é possível dar início ao projeto de sistemas fotovoltaicos.

O funcionamento dos módulos fotovoltaicos pode ser entendido e representado pelas curvas I-V e P-V dos módulos. A Figura 8 apresenta uma curva I-V e P-V característica de módulos fotovoltaicos de silício policristalino.

Figura 7 - Curva I-V e P-V



Fonte: PINHO e GALDINO, 2014

Interpretando as curvas da Figura 7, é possível entender o funcionamento completo de um módulo fotovoltaico.

2.3.2 Stringbox

Figura 8 - Stringbox Solar



Fonte: Clamper

Stringbox é o nome dado a linha elétrica que contempla os elementos de proteção e seccionamento necessários para a segurança e qualidade de um sistema fotovoltaico. Esta stringbox deve também ser dimensionada para cada projeto pois cada tipo de arranjo de módulos necessita de tipos diferentes de proteção e seccionamento, de acordo com normas.

A stringbox pode ser composta por chaves seccionadoras, disjuntores de corrente contínua, fusíveis, dispositivos de proteção contra surtos (DPS), bornes de entrada e saída, entre outros, dependendo das necessidades de cada projeto.

2.3.3 Inversores

Figura 11 - Inversor fotovoltaico



Fonte: Sungrow

O inversor fotovoltaico tem uma participação muito importante na constituição de um sistema fotovoltaico conectado à rede. É responsável por converter a energia elétrica em corrente contínua que advém dos módulos fotovoltaicos para energia elétrica em corrente alternada. Essa conversão permite que os inversores se conectem à rede de distribuição da concessionária, mantendo os padrões de tensão, frequência e harmônicos.

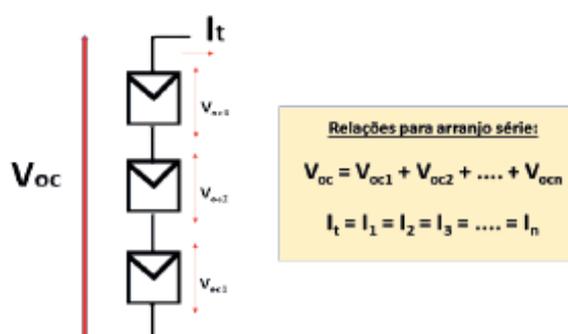
Outra função extremamente importante que competem aos inversores é a otimização da produção energética dos módulos fotovoltaicos. Isso porque em todos os inversores on-grid existe um dispositivo chamado de Seguidor do Ponto de Máxima Potência (SPMP ou MPPT em inglês). Este dispositivo realiza uma varredura em tempo real das curvas I-V e P-V dos módulos fotovoltaicos, sempre procurando o maior produto entre tensão e corrente que fornecerá como consequência a maior potência de saída dos módulos nas condições do momento de análise.

2.4 TIPOS DE LIGAÇÃO ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para se garantir uma produção de energia satisfatória e suficiente para atender a demanda das cargas elétricas em que o sistema é instalado, é necessário que módulos fotovoltaicos sejam conectados entre si. Essa conexão entre módulos pode ser feita de maneiras diferentes, sendo a ligação série, ligação paralelo e ligação mista, que é a união da ligação série com a ligação paralelo no mesmo arranjo.

2.6.4 2.4.1 Ligação série

Figura 10 - Ligação série



Fonte: Ayrão, 2019

Neste tipo de ligação, o terminal positivo de um módulo é conectado ao terminal negativo do outro, mantendo esta sequência até que se atinja os valores necessários de potência, tensão e corrente.

Para dispositivos que tenham os mesmos parâmetros elétricos, quando conectados em série, as tensões são somadas e a corrente elétrica se mantém constante, como apresentado nas Equações 2.1 e 2.2.

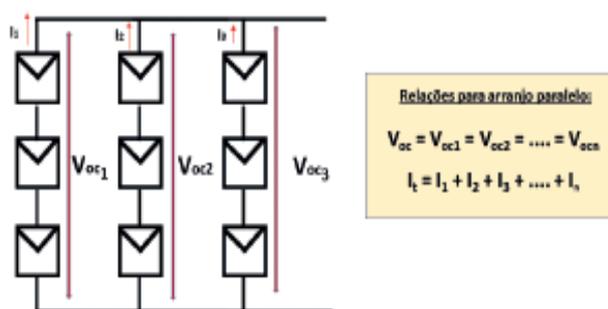
$$V = V1 + V2 + \dots + Vn \quad (2.1)$$

$$I = I1 = I2 = \dots = In \quad (2.2)$$

Uma vantagem deste tipo de ligação é a manutenção da corrente do sistema em baixos valores, permitindo o uso de cabos de pequena seção (AYRÃO, 2019). Uma desvantagem seria por justamente estarem em série, se um módulo da série apresentar algum defeito ou simplesmente tiver uma performance inferior aos demais, todos os módulos desta série acompanharão a performance do pior módulo da série, limitando assim a potência de saída e também a performance do próprio sistema.

2.6.5 2.4.2 Ligação paralelo

Figura 11 - Ligação paralelo



Fonte: Ayrão, 2019

Diferentemente da ligação série, na ligação paralelo os terminais positivos dos módulos são interligados entre si e o mesmo acontece com os terminais negativos. Neste tipo de ligação, as tensões se mantêm constante e as correntes são somadas. As Equações 2.3 e 2.4 representam estas ocorrências de tensão e corrente neste tipo de ligação.

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.3)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.4)$$

Uma vantagem deste tipo de ligação é justamente a capacidade de se conectar várias séries em paralelo, sem ultrapassar os valores máximos de tensão. Uma desvantagem é o valor da corrente que vai se somando, impactando na seção transversal dos condutores.

2.6.6 2.4.3 Ligação Mista

A ligação mista é a união dos dois tipos de ligação citados acima (série e paralelo) no mesmo arranjo fotovoltaico. Em sistemas de médio e grande porte, é necessário a utilização deste tipo de ligação.

2.5 ÍNDICES DE MÉRITO

Os índices de mérito de sistemas fotovoltaicos são indicativos utilizados para realizar a medição das grandezas destes sistemas. A partir do cálculo destes índices é possível a comparação por exemplo com as grandezas constantes no Atlas Solar do Estado do Paraná. Com isso, pode-se chegar a conclusões de que o sistema em operação está funcionando corretamente ou se está apresentando alguma anomalia.

2.6.7 2.5.1 Yield (produtividade)

O primeiro índice de mérito abordado por este trabalho é o Yield ou índice de produtividade do sistema.

De acordo com Urbanetz (2014), o Yield é a normalização da energia gerada pelo sistema fotovoltaico em kWh a cada kWp de potência instalada, normalmente vinculada a um intervalo de um ano. Ainda, o Yield pode ser calculado com a Equação 2.4.

$$YF = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_n} = \frac{E(t)}{P_n}$$

(2.4)

Sendo

T o período analisado em dias;

P(t) a potência entregue pelo sistema em kW;

P_n a potência nominal do painel solar em kWp;

E(t) a energia gerada no intervalo T em kWh.

Com o cálculo do Yield, é possível observar se para as condições de instalação do sistema, o mesmo está tendo a produtividade de energia esperada se comparado à valores normatizados como os do Atlas Solar do Paraná.

2.5.2 Fator de Capacidade

O Fator de Capacidade representa a relação entre a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e a energia gerada caso o mesmo operasse durante 24 horas por dia por 365 dias por ano em sua máxima potência (BENEDITO, 2009).

Este fator pode ser calculado como apresenta a Equação 2.5.

$$Cf = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_n \times T} = \frac{E(t)}{P_n \times T} = \frac{YF}{T}$$

(2.5)

Sendo

T o período de tempo de avaliação, geralmente 1 ano;

P_n a potência máxima do painel solar em kWp.

O fator de capacidade não é muito utilizado para sistemas fotovoltaicos pois estes sistemas dependem das condições climáticas e das horas de sol dos dias. Logo, quando comparado com outras fontes de energia, para sistemas fotovoltaicos, este fator é menor.

2.6.8 2.5.3 Performance Ratio (Taxa de Desempenho)

Segundo Urbanetz (2014) a *Performance Ratio* de um sistema fotovoltaico é a relação entre o Yield e a irradiação média diária mensal no plano do painel fotovoltaico, normalmente vinculado a um período de análise de um ano. Com isso, a Equação 2.6 apresenta a forma de cálculo da PR.

$$PR = \frac{E(t)}{P_n} = \frac{G_{ref}}{H(t)} = \frac{YF}{H(t)} \quad (2.6)$$

Sendo

H(t) a irradiação no plano do painel fotovoltaico em kWh/m².dia;

G_{ref} a irradiância nas condições STC (1000W/m²).

A *Performance Ratio* é o principal índice de mérito de um sistema fotovoltaico, já que representa as perdas do sistema, ou seja, quanto menor a PR, maior as perdas presentes no sistema. Outra vantagem é que o PR pode ser utilizado para comparar sistemas em locais e condições de instalação diferentes.

2.7 O FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR (FDI)

A definição do FDI é dada pela relação entre a potência máxima do gerador fotovoltaico (potência de módulos) e a potência máxima de saída do inversor. O ajuste deste fator é importante para se utilizar o máximo da energia gerada com uma maior eficiência (COSTA, 2010).

A equação 2.3 representa a forma de calcular o FDI de sistemas fotovoltaicos.

$$FDI = \frac{P_{ca}}{P_{cc}}$$

(2.3)

Sendo:

P_{cc} : Potência máxima do gerador fotovoltaico (kWp)

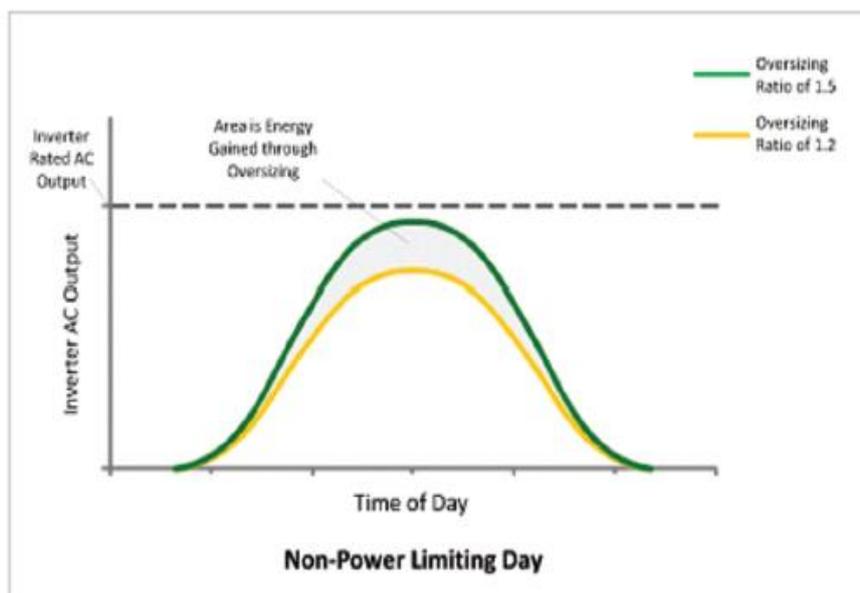
P_{ca} : Potência máxima de saída do inversor (kW)

Por exemplo, quando se tem um $FDI = 0,75$, significa que a potência de inversor corresponde à 75% da potência máxima de módulos (ZILLES, 2012).

É importante que na etapa de projeto e de escolhas de equipamentos, o FDI seja levado em consideração, pois este fator pode ter impacto direto na performance dos sistemas projetados.

Sabe-se que quando em projeto, determina-se um FDI menor que 1, ou seja, a potência do inversor é menor do que a potência máxima de módulos fotovoltaicos, busca-se elevar a produção de energia se comparado com o mesmo sistema com FDI igual a 1. Isso se dá pelo alargamento da curva de produção de energia do sistema, pois como se tem mais potência instalada de módulos, a área de captação de radiação solar também é maior. Sendo assim, o sistema com FDI menor que 1 produz mais energia do que o sistema com FDI igual a 1, pois com este alargamento da curva de produção de energia, o sistema começa a gerar energia mais cedo e continua gerando energia até mais tarde do que o outro tipo, além de no pico de irradiância também processar mais energia. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 12, onde se compara um sistema tendo $FDI = 0,833$ e $FDI = 0,667$.

Figura 12 - Ganho na produção energética



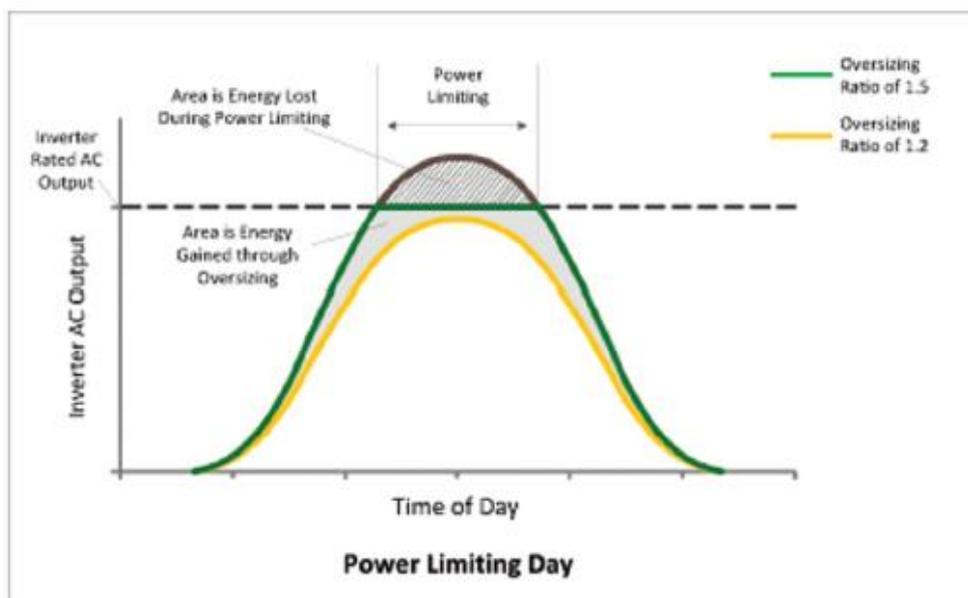
Fonte: Fiorelli et al, 2013.

Por outro lado, quando se diminui o FDI, em momento de pico de irradiância, começa a ocorrer em alguns momentos o fenômeno conhecido como “clipping”. Este fenômeno é o corte ou ceifamento de potência realizado pelo próprio inversor

para evitar que a sobrecarga danifique o equipamento. Ocorre quando a potência de módulos entrega uma potência maior que a máxima potência de saída do inversor (LUOMA, 2011).

Este fenômeno pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - "Clipping"



Fonte: Fiorelli et al, 2013.

Logo, fica claro a importância da correta análise e determinação do FDI em projetos fotovoltaicos para que se garanta uma boa eficiência e performance dos sistemas.

3. DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÕES

Para a realização dos cálculos da *Performance Ratio (PR)* dos sistemas analisados, utilizou-se a base de dados do Atlas Solar do Paraná para a coleta dos índices de irradiação no plano horizontal. Com esses dados, alimentou-se o programa Radiasol (software desenvolvido pela UFRGS para correção da irradiação global horizontal para o plano dos módulos) para determinar a irradiação incidente no plano dos módulos. Em posse dos dados construtivos do sistema e da irradiação corrigida, para o cálculo da PR só falta a energia produzida pelos sistemas. Esta é obtida através dos sistemas de monitoramento dos próprios inversores e registrada em plataforma online.

Para a realização deste estudo, foi considerado o período de três meses consecutivos, sendo este de maio de 2019 a julho de 2019. O período mencionado foi escolhido devido às suas temperaturas mais amenas se comparados com os outros meses do ano, afim de reduzir as perdas de produção de energia devido à temperatura.

A seguir, serão apresentados os dados técnicos dos sistemas analisados, bem como o cálculo da *Performance Ratio (PR)* de cada um. Com isso, será realizada uma discussão sobre os resultados obtidos.

Os critérios utilizados na seleção destas plantas de deram principalmente pelas características construtivas dos sistemas em questão e também pela disponibilidade dos dados dos equipamentos dos sistemas como um todo.

3.6 APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 1”

O sistema fotovoltaico conectado à rede denominado de “PLANTA 1” é composto por 14 módulos de silício policristalino de 320Wp da fabricante chinesa Build your dreams (BYD). Estes estão conectados em 2 strings com 7 módulos em série cada, resultando em uma potência total de 4,48kWp. O inversor utilizado é um Canadian de potência igual a 5kW, com 2 buscadores de máxima potência (MPPT).

Figura 14 - Sistema Fotovoltaico "planta 1"



Fonte: O autor.

As características físicas de instalação do sistema podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas - "PLANTA 1"

| Características físicas – "PLANTA 1" | |
|--------------------------------------|----------------|
| Local | Paranaguá – PR |
| Montagem | Telhado |
| Orientação (Azimute) | 129° Oeste |
| Inclinação | 16° |

Fonte: O autor.

A irradiação corrigida, em kWh/m².dia, no plano dos módulos para este sistema pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 - Irradiação corrigida "PLANTA 1"

| MAIO | JUNHO | JULHO |
|------|-------|-------|
| 2,57 | 2,37 | 2,42 |

Fonte: Radiasol.

Ainda, na Tabela 2, apresenta-se a energia produzida pelo sistema nos meses de análise e também a média destes três meses.

Tabela 2 - Energia produzida pela "planta 1"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|--------|------|-------|-------|-------|
|--------|------|-------|-------|-------|

| | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Energia produzida (kWh) | 222 | 248 | 264 | 244 |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|

Fonte: O autor.

Por fim, o FDI adotado para este projeto - observando que a potência de módulos é de 4,48kWp e a potência do inversor é de 5kW – é igual a 1,116.

3.1.1 Cálculo da PR – “planta 1”

Com estas informações, na Tabela 3 se encontra o cálculo da PR deste sistema mês a mês e também a PR média destes três meses.

Tabela 3 - PR - "planta 1"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| PR | 0,6427 | 0,7785 | 0,7855 | 0,7356 |

Fonte: O autor.

Com os dados de PR do sistema, pode-se comparar com os índices das outras plantas. Esta comparação será realizada ainda neste trabalho.

3.2 APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 2”

O sistema fotovoltaico conectado à rede denominado de “PLANTA 2” é composto por 18 módulos de silício policristalino de 330Wp da fabricante chinesa Build your dreams (BYD). Estes estão conectados em 2 strings com 9 módulos em série cada, resultando em uma potência total de 5,94kWp. O inversor utilizado é um Canadian de potência igual a 5kW, com 2 buscadores de máxima potência (MPPT).

Figura 16 - Sistema Fotovoltaico "planta 2"



Fonte: O autor.

As características físicas de instalação do sistema podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características físicas - "PLANTA 2"

| Características físicas – "PLANTA 2" | |
|--------------------------------------|---------------|
| Local | Curitiba – PR |
| Montagem | Telhado |
| Orientação (Azimute) | 147° Oeste |
| Inclinação | 17° |

Fonte: O autor.

A irradiação corrigida no plano dos módulos para este sistema pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Irradiação corrigida "PLANTA 2"

| MAIO | JUNHO | JULHO |
|------|-------|-------|
| 2,54 | 2,33 | 2,5 |

Fonte: Radiasol.

Ainda, na Tabela 5, apresenta-se a energia produzida pelo sistema nos meses de análise e também a média destes três meses.

Tabela 5 - Energia produzida pela "planta 2"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|
| Energia produzida (kWh) | 287 | 332 | 390 | 336 |

Fonte: O autor.

Por fim, o FDI adotado para este projeto - observando que a potência de módulos é de 5,94kWp e a potência do inversor é de 5kW – é igual a 0,842.

3.2.1 Cálculo da PR – “planta 2”

Com estas informações, na Tabela 6 se encontra o cálculo da PR deste sistema mês a mês e também a PR média destes três meses.

Tabela 6 - PR - "planta 2"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| PR | 0,6136 | 0,7996 | 0,8472 | 0,7534 |

Fonte: O autor.

Com os dados de PR do sistema, pode-se comparar com os índices das outras plantas. Esta comparação será realizada ainda neste trabalho.

3.3 APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 3”

O sistema fotovoltaico conectado à rede denominado de “PLANTA 3” é composto por 12 módulos de silício policristalino de 350Wp da fabricante canadense Canadian Solar. Estes estão conectados em 1 string com 12 módulos em série, resultando em uma potência total de 4,20kWp. O inversor utilizado é um Fronius de potência igual a 4kW, com 2 buscadores de máxima potência (MPPT).

Figura 18 - Sistema Fotovoltaico "planta 3"



Fonte: O autor.

As características físicas de instalação do sistema podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 7 - Características físicas - "PLANTA 3"

| Características físicas – "PLANTA 3" | |
|--------------------------------------|---------------|
| Local | Curitiba – PR |
| Montagem | Telhado |
| Orientação (Azimute) | 125° Oeste |
| Inclinação | 25° |

Fonte: O autor.

A irradiação corrigida no plano dos módulos para este sistema pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 - Irradiação corrigida "PLANTA 3"

| MAIO | JUNHO | JULHO |
|------|-------|-------|
| 2,5 | 2,41 | 2,55 |

Fonte: Radiasol.

Ainda, na Tabela 8, apresenta-se a energia produzida pelo sistema nos meses de análise e também a média destes três meses.

Tabela 8 - Energia produzida pela "planta 3"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|
| Energia produzida (kWh) | 241 | 225 | 255 | 240 |

Fonte: O autor.

Por fim, o FDI adotado para este projeto - observando que a potência de módulos é de 4,20kWp e a potência do inversor é de 4kW – é igual a 0,952.

3.3.1 Cálculo da PR – “planta 3”

Com estas informações, na Tabela 9 se encontra o cálculo da PR deste sistema mês a mês e também a PR média destes três meses.

Tabela 9 - PR - "planta 3"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| PR | 0,7404 | 0,7410 | 0,7681 | 0,7498 |

Fonte: O autor.

Com os dados de PR do sistema, pode-se comparar com os índices das outras plantas. Esta comparação será realizada ainda neste trabalho.

3.4 APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 4”

O sistema fotovoltaico conectado à rede denominado de “PLANTA 4” é composto por 12 módulos de silício monocristalino de 365Wp da fabricante alemã QCells. Estes estão conectados em 1 string com 12 módulos em série, resultando em uma potência total de 4,38kWp. O inversor utilizado é um Fronius de potência igual a 4kW, com 2 buscadores de máxima potência (MPPT).

Figura 20 - Sistema Fotovoltaico "planta 4"



Fonte: O autor.

As características físicas de instalação do sistema podem ser observadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características físicas - "PLANTA 4"

| Características físicas – "PLANTA 4" | |
|--------------------------------------|----------------|
| Local | Paranaguá – PR |
| Montagem | Telhado |
| Orientação (Azimute) | 43° Oeste |
| Inclinação | 17° |

Fonte: O autor.

A irradiação corrigida no plano dos módulos para este sistema pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 - Irradiação corrigida "PLANTA 4"

| MAIO | JUNHO | JULHO |
|------|-------|-------|
| 3,55 | 3,2 | 3,33 |

Fonte: Radiasol.

Ainda, na Tabela 11, apresenta-se a energia produzida pelo sistema nos meses de análise e também a média destes três meses.

Tabela 11 - Energia produzida pela "planta 4"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|
| Energia produzida (kWh) | 301 | 368 | 368 | 346 |

Fonte: O autor.

Por fim, o FDI adotado para este projeto - observando que a potência de módulos é de 4,38kWp e a potência do inversor é de 4kW – é igual a 0,913.

3.4.1 Cálculo da PR – “planta 4”

Com estas informações, na Tabela 12 se encontra o cálculo da PR deste sistema mês a mês e também a PR média destes três meses.

Tabela 12 - PR - "planta 4"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| PR | 0,6244 | 0,8752 | 0,8139 | 0,7712 |

Fonte: O autor.

Com os dados de PR do sistema, pode-se comparar com os índices das outras plantas. Esta comparação será realizada ainda neste trabalho.

3.5 APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 5”

O sistema fotovoltaico conectado à rede denominado de “PLANTA 5” é composto por 10 módulos de silício policristalino de 210Wp da fabricante Japonesa Kyocera. Estes estão conectados em 1 string com 10 módulos em série, resultando em uma potência total de 2,10kWp. O inversor utilizado é um PVPowered de potência igual a 2kW, com 1 buscador de máxima potência (MPPT).

Figura 22 - Sistema Fotovoltaico "planta 5"



Fonte: FUSANO, 2013.

As características físicas de instalação do sistema podem ser observadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Características físicas - "PLANTA 5"

| Características físicas – "PLANTA 5" | |
|--------------------------------------|---------------|
| Local | Curitiba – PR |
| Montagem | Telhado |
| Orientação (Azimute) | 22° Oeste |
| Inclinação | 15° |

Fonte: O autor.

A irradiação corrigida no plano dos módulos para este sistema pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 - Irradiação corrigida "PLANTA 5"

| MAIO | JUNHO | JULHO |
|------|-------|-------|
| 2,65 | 3,56 | 3,55 |

Fonte: Radiasol.

Ainda, na Tabela 14, apresenta-se a energia produzida pelo sistema nos meses de análise e também a média destes três meses.

Tabela 14 - Energia produzida pela "planta 5"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|
| Energia produzida (kWh) | 140 | 165 | 178 | 161 |

Fonte: O autor.

Por fim, o FDI adotado para este projeto - observando que a potência de módulos é de 2,10kWp e a potência do inversor é de 2kW – é igual a 0,952.

3.5.1 Cálculo da PR – “planta 5”

Com estas informações, na Tabela 15 se encontra o cálculo da PR deste sistema mês a mês e também a PR média destes três meses.

Tabela 15 - PR - "planta 5"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| PR | 0,8115 | 0,7357 | 0,7702 | 0,7725 |

Fonte: O autor.

Com os dados de PR do sistema, pode-se comparar com os índices das outras plantas. Esta comparação será realizada ainda neste trabalho.

3.6 APRESENTAÇÃO DA “PLANTA 6”

O sistema fotovoltaico conectado à rede denominado de “PLANTA 6” é composto por 13 módulos de silício policristalino de 330Wp da fabricante chinesa BYD (Build your Dreams). Estes estão conectados em 1 string com 9 módulos em série, resultando em uma potência total de 4,29kWp. O inversor utilizado é um Fronius de potência igual a 5kW, com 2 buscadores de máxima potência (MPPT).

As características físicas de instalação do sistema podem ser observadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Características físicas - "PLANTA 6"

| Características físicas – "PLANTA 6" | |
|--------------------------------------|---------------|
| Local | Curitiba – PR |
| Montagem | Telhado |
| Orientação (Azimute) | 27° Leste |
| Inclinação | 15° |

Fonte: O autor.

A irradiação corrigida no plano dos módulos para este sistema pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 - Irradiação corrigida "PLANTA 6"

| MAIO | JUNHO | JULHO |
|------|-------|-------|
| 2.64 | 3.54 | 3.55 |

Fonte: Radiasol.

Ainda, na Tabela 17, apresenta-se a energia produzida pelo sistema nos meses de análise e também a média destes três meses.

Tabela 17 - Energia produzida pela "planta 6"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|
| Energia produzida (kWh) | 261 | 301 | 322 | 294 |

Fonte: O autor.

Por fim, o FDI adotado para este projeto - observando que a potência de módulos é de 4,29kWp e a potência do inversor é de 5kW – é igual a 1,166.

3.6.1 Cálculo da PR – "planta 6"

Com estas informações, na Tabela 18 se encontra o cálculo da PR deste sistema mês a mês e também a PR média destes três meses.

Tabela 18 - PR - "planta 6"

| Índice | Maio | Junho | Julho | Média |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| PR | 0,7433 | 0,6607 | 0,6820 | 0,6953 |

Fonte: O autor.

Com os dados de PR do sistema, pode-se comparar com os índices das outras plantas. Esta comparação será realizada ainda neste trabalho.

3.7 COMPARAÇÃO ENTRE AS PERFORMANCES RATIOS (PRS)

Com os levantamentos dos dados dos seis sistemas realizados no capítulo 3, é possível a realização de uma comparação entre os sistemas e com isso, apontar como o FDI afeta na *Performance Ratio* dos sistemas.

Olhando para os FDIs dos sistemas propostos, adotando um intervalo de +- 10%, é possível perceber que se tem dois sistemas com o FDI maior do que 1, três sistemas com FDI praticamente igual a 1 e um sistema com FDI menor que 1. Dessa forma, separa-se os sistemas em três grupos de acordo com seus FDIs, sendo eles apresentados na Tabela 19.

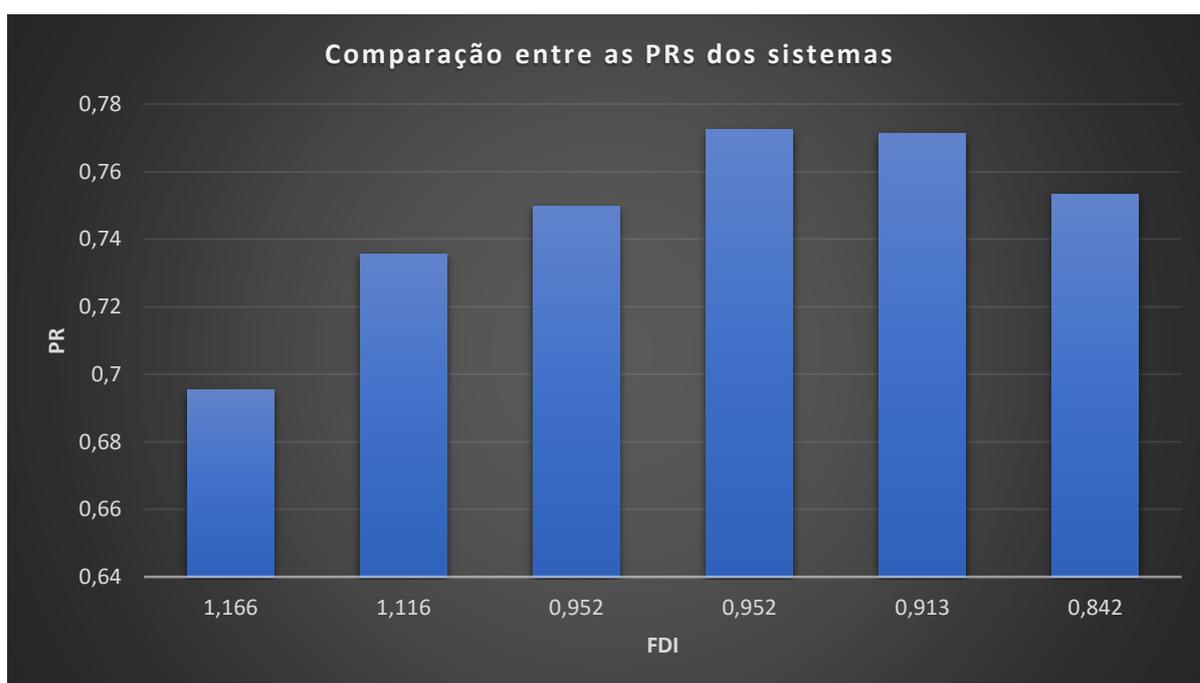
Tabela 19 - Separação dos sistemas em grupos

| Sistema | FDI |
|----------|-------|
| Planta 6 | 1,166 |
| Planta 1 | 1,116 |
| Planta 3 | 0,952 |
| Planta 5 | 0,952 |
| Planta 4 | 0,913 |
| Planta 2 | 0,842 |

Fonte: O autor.

Com isso, fez-se uma comparação entre as PRs dos sistemas para analisar o impacto do FDI neste índice de mérito. Esta comparação pode ser observada no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Comparação entre as PRs dos sistemas



Fonte: O autor.

Com a análise do Gráfico 1, pode-se observar que, apesar de outras variáveis como temperatura, sujidade e mismatch (descasamento entre módulos) não estarem sendo consideradas, o FDI impacta diretamente na PR dos sistemas analisados.

No caso dos sistemas com FDI maior do que 1 (1,166 e 1,116), nota-se que a PR dos sistemas é a pior se comparada com as dos outros sistemas, com valores entre 0,69 e 0,73. Isso se deve principalmente pois quando a potência de inversor é maior do que a potência de módulos, não há nenhum ganho de produção energética e por outro lado, quando menor o carregamento do inversor, menor a sua eficiência. Logo, quando o sistema tem um FDI maior do que 1, a tendência é que a PR deste seja inferior se comparado a outros FDIs.

Já no caso dos sistemas com FDI praticamente igual a 1 (0,952, 0,952 e 0,913), nota-se que as PRs dos sistemas são mais elevadas se comparadas às outras, com valores entre 0,74 e 0,77. Isso se deve principalmente pela curva de eficiência do inversor e pela minimização da perda de energia pelo fenômeno “clipping”. A eficiência do inversor é maximizada quando este trabalha em sua potência nominal ou próximo disto, basta analisar as curvas de eficiências que constam nas folhas de dados destes equipamentos. A outra vantagem se dá pelo

fato de que não há perda de energia nos picos de irradiância, pois o máximo que o sistema pode entregar de potência de módulos é igual à potência nominal do inversor, evitando o “clipping”.

No caso do sistema com FDI menor que 1 (0,842), nota-se uma PR de aproximadamente 0,75. A PR neste caso é maior se comparada com os sistemas de FDI maior que 1 e menor se comparada com os sistemas de FDI praticamente igual a 1. Isso se dá pelo fato de que quando comparado com sistemas com FDI maior que 1, o sistema em questão trabalha nas curvas de maior eficiência do inversor, resultando em uma PR mais elevada. Por outro lado, quando se tem potência de módulos consideravelmente maior que a potência nominal do inversor, em momentos de pico de irradiância, ocorre o fenômeno do “clipping”, quando o inversor corta a potência de saída para que não exceda sua potência nominal e danifique o equipamento. Quando este fenômeno ocorre, a energia que deveria estar sendo processada pelo inversor por completo, somente é processada até atingir a potência máxima de saída do inversor, sendo o restante desperdiçada. Logo, a PR do sistema é afetada e reduzida. Pelo fato dos ensaios terem sido realizados nos meses do ano de menor irradiância, o fenômeno de *Clipping* não se fez presente, logo, independente do FDI, a perda de energia devido a este fenômeno não foi observada.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

De acordo com os objetivos deste trabalho, foram levantados as principais vantagens e desvantagens da determinação do FDI em projeto, sendo que para isso, apresentam-se ganhos energéticos e também o fenômeno do “clipping” demonstrando as diminuições de performance dos sistemas. Foram selecionados 6 sistemas com FDIs diferentes e calculado a PR de cada um afim de se realizar uma comparação entre estas.

Após todos os levantamentos e comparações realizadas, é possível concluir que realmente o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) tem relação direta com a *Performance Ratio* (PR) dos sistemas analisados. Ressalta-se que outras variáveis que também impactam na PR dos sistemas como mismatch, sujeidade e temperatura não foram consideradas nas análises, porém tentou-se ao máximo selecionar sistemas que apresentassem condições semelhantes de instalação para que estas variáveis não impactassem de forma significativa nas análises propostas.

Com isso, percebe-se que sistemas fotovoltaicos que sejam dimensionados com FDI maior do que 1 terão suas performances reduzidas por este fato, conforme estão apresentadas no capítulo 3. Sistemas com FDI próximo a 1 tendem a ser os sistemas com maior performance, já que não apresenta limitação de energia processada e trabalha nas melhores curvas de eficiência dos inversores, conforme também apresentadas no capítulo 3. Já sistemas com FDI menor que 1 apresentam performances maiores se comparadas com os sistemas de FDI maior que 1 e menores se comparadas com os sistemas de FDI igual a 1, já que trabalha nas melhores curvas de eficiência dos inversores, porém nos picos de irradiância ocorre o fenômeno do “clipping”, desperdiçando energia que deveria ser processada. Mais uma vez, pelo fato destes ensaios terem sido realizados nos meses do ano de menor irradiância, não foi observada a perda de energia devido ao *Clipping*.

Para trabalhos futuros sugere-se por exemplo a ampliação desta análise para um número maior de sistemas e também pelo período de um ano de dados. Além disso, uma avaliação de custos no mercado e o ganho ou perda de aproveitamento de geração.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10899 – Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia**. Associação Brasileira de Norma Técnicas, Norma Brasileira, 2006.

ABNT. **NBR 11704 – Sistemas Fotovoltaicos – Classificação**. Associação Brasileira de Norma Técnicas, Norma Brasileira, 2008.

ANEEL, Resolução Normativa Nº 482, 17 de Abril de 2012.

AYRÃO, V. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Conceitos, Aplicações e Estudos de Caso. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Procobre, 2019.

BENEDITO, R. S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2009.

COSTA, H. J. Serafim. **Avaliação do Fator de Dimensionamento do Inversor em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

FIORELLI, J. et al. **How oversizing your array-to-inverter ratio can improve solar power system performance**. Solar Power World. 7. Ed. Pg 42-46. 2013.

FUSANO, Renato Hideo. **Análise dos índices de mérito do sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde da UTFPR**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LUOMA, J. et al. **Optimal Inverter Sizing considering cloud enhancement**. Solar Energy 86. Pg. 421-429. 2011.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. Ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro, 2014.

SAUAIA, R. L. Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios. In: WORKSHOP DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2018, Rio de Janeiro.

SGANZERLA, L. M. B. **Análise dos Índices de Mérito de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede em Curitiba**. Monografia de Especialização – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

URBANETZ JUNIOR, Jair; CASAGRANDE JUNIOR, Eloy; TIEPOLO, Gerson M. **Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2014.

VILLALVA, M. G.; **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

ZILLES, R.; et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede elétrica**. 1. ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2012.