



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

MARVIN GABRIEL ANTONINO VERÍSSIMO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE CONVERSOR SUBDIMENSIONADO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Recife

2022

MARVIN GABRIEL ANTONINO VERÍSSIMO

**ANALISE DE VIABILIDADE DO USO DE CONVERSOR SUBDIMENSIONADO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau em bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: MSc. Artur Muniz Szpak Furtado

Recife
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Veríssimo, Marvin Gabriel Antonino.

Análise de viabilidade do uso de conversor subdimensionado em sistemas fotovoltaicos / Marvin Gabriel Antonino Veríssimo. - Recife, 2022.
35 : il., tab.

Orientador(a): Artur Muniz Szpak Furtado

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2022.

1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. FDI. 3. Recife. I. Furtado, Artur Muniz Szpak. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MARVIN GABRIEL ANTONINO VERÍSSIMO

**ANALISE DE VIABILIDADE DO USO DE CONVERSOR SUBDIMENSIONADO EM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau em bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 28/10/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Artur Muniz Szpak Furtado (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. MSc. Eduardo José Barbosa
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Dentre as possibilidades para as energias renováveis, uma das que mais se destaca é a energia solar fotovoltaica. Uma das etapas para implementação dessa fonte de geração é a determinação do fator de dimensionamento do inversor (FDI), sendo o conversor que transforma a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Nesse contexto, o presente trabalho é baseado na seguinte pergunta: Qual a viabilidade econômica da instalação de um sistema fotovoltaico com um inversor subdimensionado? O objetivo geral determinado para esta pesquisa foi analisar a viabilidade de um sistema fotovoltaico com um conversor subdimensionado e um normal para a cidade de Recife. Foi possível concluir que quanto menor o FDI, maior o clipping e conseqüentemente, o prejuízo do sistema cresce. Assim, para uma análise anual de um sistema com inversor subdimensionado, foi observado prejuízo. Enquanto para o FDI de 100% não houve clipping, portanto, não há prejuízos, porém a diferença de preços entre conversores foi considerável. Com isso, o presente trabalho cumpriu com seu objetivo, demonstrando que para cada sistema analisado mediante o consumo do local, sendo que o sistema subdimensionado pode ser considerado viável economicamente.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; FDI; Recife.

ABSTRACT

Among the possibilities for renewable energy, one that stands out the most is photovoltaic solar energy. One of the steps for implementing this generation source is the determination of the inverter sizing factor (FDI), with the converter transforming direct current (DC) into alternating current (AC). In this context, the present work is based on the following question: What is the economic feasibility of installing a photovoltaic system with an undersized inverter? The general objective determined for this research was to analyze the feasibility of a photovoltaic system with an undersized and a nominal converter for the city of Recife. It was possible to conclude that the lower the FDI, the greater the clipping and, consequently, the loss of the system grows. Thus, for an annual analysis of the system with an undersized inverter, the greatest loss was observed. While for the 100% FDI there was no clipping, so there are no losses. With this, the present work fulfilled its objective, demonstrating that for each system analyzed through the consumption of the place, and the undersized system can be considered economically feasible.

Keywords: photovoltaic solar energy; FDI; Recife.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curvas de radiação solar de dia ensolarado (a) e dia nublado (b) para a cidade de Buraydah em dezembro de 2014.....	15
Figura 2 – Célula fotovoltaica.....	17
Figura 3 – Perdas de potência de um sistema fotovoltaico.....	20
Figura 4 - Curva de potência de dois sistemas fotovoltaicos.....	21
Figura 6 - Gráfico da Curva normal sobre a malha quadriculada.....	27
Figura 7 - Gráfico da Curva normal para os meses entre Outubro e Março.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo e irradiação média da cidade	26.
Tabela 2 – Potência de Pico.....	27.
Tabela 3 – Porcentagem da Potência de Pico	28.
Tabela 4 – Energia Perdida por Clipping.....	29.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

L_{ca}	Energia consumida diariamente em corrente alternada no mês;
Red_1	fator de redução da potência dos módulos fotovoltaicos;
Red_2	fator de redução da potência devido a perdas do sistema.
η_{inv}	Eficiência do inversor;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	em corrente alternada
CC	corrente contínua
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DHI	diffuse horizontal irradiance
DNI	direct normal irradiance
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FDI	fator de dimensionamento do inversor
G	Irradiância solar
GHI	global horizontal irradiance
H	Irradiação Solar
HSP	Horas de Sol Pleno
I-V	tensão de corrente
PCA	Potência nominal CA do inversor
P_m	Potência do módulo fotovoltaico
PS	Potência dos módulos em condições padrão
SPPM	seguimento do ponto de potência máxima

LISTA DE SÍMBOLOS

GWh	Giga Watt Hora
kW	kilo-Watt
kWh/m ² .dia	kilo-Watt-hora por metro quadrado ao dia
kWh/mês	kilo-Watt-hora por mês
Li-ion	íon de Lítio
m	metro
NiCd	Níquel-Cádmio
NiMH	Níquel-hidreto metálico
Pb-ácido	Chumbo-ácido
W	Watt
W/m ²	watt por metro quadrado
Wh/ m ²	watt hora por metro quadrado
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Geral.....	12
1.1.2	Específicos	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	RADIAÇÃO SOLAR.....	13
2.1.1	Irradiância e irradiação	14
2.2	MÓDULO FOTOVOLTAICO	16
2.3	INVERSOR.....	18
2.3.1	Subdimensionamento do inversor	19
2.4	CONTROLADOR DE CARGA	22
2.5	BATERIAS.....	22
2.6	CONFIGURAÇÕES DE SISTEMA SOLARES FOTOVOLTAICOS	23
2.6.1	Sistemas autônomos	23
2.6.2	Sistemas conectados à rede	24
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	25
3.1	LOCAIS DEFINIDOS.....	25
3.2	DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS	26
3.3	PREJUÍZOS DOS SISTEMAS POR CLIPPING	28
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	32
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, tem havido uma preocupação crescente com os impactos causados pela intensa atividade industrial, comercial e agrícola da humanidade. A partir disso, esforços foram realizados no sentido de descobrir novas formas de manter a qualidade de vida da população a partir do uso de menos recursos ambientais. Além disso, há uma constante busca para diminuir os impactos ambientais de muitas atividades humanas.

Dentre as possibilidades, um dos campos que mais se destaca na busca por alternativas de menor impacto ao meio ambiente é a produção de energia elétrica. Isso porque muitos estudos feitos ao longo dos anos mostraram que os combustíveis mais comumente utilizados pela humanidade na geração de eletricidade, como carvão e derivados do petróleo, são altamente emissores de gases de efeito estufa para a atmosfera. Nesse sentido, alternativas para geração de energia elétrica foram propostas e incentivadas. Isso porque as fontes renováveis pertencem a ciclos que se renovam em um período que permite que o meio ambiente sofra menos impactos negativos, com isso, esse tipo de fonte é considerado como ambientalmente adequada. Algumas dessas fontes são a energia eólica, hidráulica, solar, geotérmica, entre outras.

No panorama das energias renováveis, uma das mais relevantes na atualidade é a energia solar fotovoltaica. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2019), no Brasil, o crescimento da energia solar fotovoltaica foi de cerca de 316% entre 2017 e 2018, indo de cerca de 832 GWh para 3.461 GWh. Nota-se, que no Brasil essa fonte de energia elétrica está se tornando cada vez mais importante.

Nesse sentido, cabe destacar que uma das etapas da análise realizada para implementação de um sistema solar fotovoltaico é a escolha do fator de dimensionamento do inversor (FDI), em que o inversor é o conversor necessário para transformação de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) para uso do referido sistema adequadamente.

Assim, uma das escolhas mais importantes do projeto de um sistema solar fotovoltaico é definir se o FDI indicará um conversor subdimensionado ou não. Em vista disso, o presente trabalho é baseado na seguinte pergunta: Qual a viabilidade

econômica da instalação de um sistema fotovoltaico com um inversor subdimensionado?

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

De modo a responder à pergunta base, o objetivo geral determinado para esta pesquisa foi comparar a viabilidade de um sistema fotovoltaico com um conversor subdimensionado e um normal na cidade de Recife.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar a geração solar fotovoltaica;
- Analisar os parâmetros para a cidade de Recife;
- Analisar a viabilidade econômica dos sistemas de geração fotovoltaicos com conversor subdimensionado e normal.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado sendo iniciado pela introdução, que é o presente capítulo. A seguir, foi construída a fundamentação teórica. Após isso, o desenvolvimento do trabalho foi elaborado. E por fim, as considerações finais foram realizadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energia solar fotovoltaica baseia-se na conversão direta da radiação solar em eletricidade. Poucas fontes de energia renovável tem um potencial para uso em pequena escala tão evidente quanto a energia solar fotovoltaica, sendo essa uma das principais razões pelas quais a tecnologia está se expandindo globalmente. No entanto, seu custo permanece alto, tornando-o indisponível para grande parte da população. (LANA et al., 2015).

2.1 Radiação solar

A radiação solar é a energia radiante emitida pelo sol, sendo por isso, a base da energia solar fotovoltaica. O uso da energia solar fotovoltaica vem crescendo globalmente já há algum tempo. Nesse sentido, pesquisas também têm sido realizadas nessa área para desenvolver cada vez mais esse campo (CAMPOS; ALCÂNTARA, 2016).

No que diz respeito à radiação em si, ela é formada por fótons com diferentes comprimentos de onda. A distribuição de tais comprimentos de onda segue uma ordem específica e seu conjunto é denominado como espectro da radiação solar. A radiação emitida pelo sol é dependente tanto da frequência como da velocidade associadas a cada comprimento de onda que forma o espectro. (ALMEIDA, 2012).

O espectro da radiação emitida pelo sol fundamenta dois tipos de incidência de onda são determinados, a luz visível e a invisível. Essa classificação é baseada no comprimento de onda e em sua faixa de frequência. No caso da luz visível, ela é dividida nas sete cores básicas, visíveis em um arco-íris: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e o violeta. A luz visível é composta por ondas de 10^{-6} m. Já a luz invisível engloba as ondas de rádio, as micro-ondas, os raios ultravioletas, raios -X e os infravermelhos. (MACHADO; CORREA, 2015).

Mais de uma componente forma a radiação observada na superfície terrestre, sendo uma delas a componente direta e outra a componente difusa ou de feixe. A radiação direta advém da mesma direção do sol, logo, produz sombras nítidas e corresponde a cerca de 80% da energia radiante que toca a crosta da Terra em dias sem nuvens. A radiação difusa provém de todas as direções e somente depois de

sofrer espalhamento por meio da atmosfera terrestre que essa radiação alcança a face da Terra. Em vista de sua principal característica, a radiação difusa corresponde ao restante dos 20% da radiação em dias sem nuvens, mas para dias nublados, somente a radiação difusa acerta a litosfera e a hidrosfera. (PINHO; GALDINO, 2014).

Existe ainda a situação em que energia radiante do sol incide em uma superfície inclinada em relação à horizontal, com isso, mais uma componente é observada. Tal componente frequentemente é refletida pelo ambiente do entorno, como o próprio solo, sua vegetação e demais obstáculos. O coeficiente de reflexão dessas superfícies possui o nome de albedo. (MACHADO; CORREA, 2015).

2.1.1 Irradiância e irradiação

Conforme determinado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua NBR 10899 de 2013, a irradiação e a irradiância são termos distintos, possuindo as seguintes definições:

- Irradiância solar (G) – Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado (W/m^2).
- Irradiação Solar (H) – Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente em uma hora ou um dia, medida em watt hora por metro quadrado (Wh/ m^2).

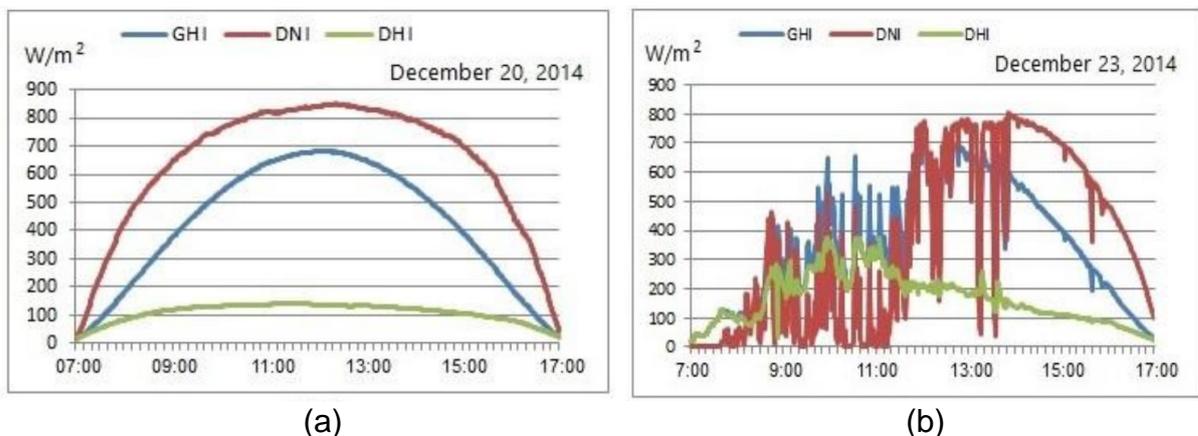
Portanto, mesmo sendo vistos como sinônimos em várias obras, tais termos possuem significados diferentes. No entanto é preciso de ambas para a quantificação da energia radiante solar que chega em uma dada superfície, já que para descobrir a irradiação solar é preciso da informação sobre a irradiância solar. (MACHADO; CORREA, 2015).

Os cálculos e medições relacionados à radiação solar, como a irradiância e a irradiação, são essenciais em empreendimentos de fontes fotovoltaicas. Em tais projetos, medições de irradiação são necessárias para obtenção do valor instantâneo do fluxo energético solar (H) ou integrado (G) ao longo de tempo (minuto, hora, dia ou ano) de maneira experimental. (PINHO; GALDINO, 2014).

Portanto, uma importante ferramenta para os projetos solares fotovoltaicos é a medição da radiação solar local. Isso porque essa informação é utilizada na determinação da potência real dos módulos fotovoltaicos. (CANDELO-BECERRA et al., 2015). Geralmente, a abordagem desse tipo de parâmetro depende de medições precisas de radiação solar com resolução de no máximo cinco minutos. Com isso, tem-se valores instantâneos da irradiância horizontal global diária ou global horizontal irradiance (GHI) em (W/m^2). Além disso, outras medições que também são realizadas são da irradiância normal direta ou direct normal irradiance (DNI) e da irradiância horizontal difusa ou diffuse horizontal irradiance (DHI). (ALMARSHOUD, 2016).

A geração real tem uma variação durante o dia que obedece a padrões. Por isso, um sistema solar fotovoltaico pode ter sua geração modelada a partir de uma curva de radiação solar. Em geral, para a criação desse tipo de curva são utilizados dados de um dia com condições frequentemente observadas na região. (CANDELO-BECERRA et al., 2015). Caso haja necessidade de maior precisão sobre a potência que irão gerar, as medições geralmente são realizadas no dia mais curto ano, que deve também ser ensolarado. Caso se use um dia nublado como base, haverá uma superestimação do sistema fotovoltaico. (ALMARSHOUD, 2016). A figura 1 mostra a diferença da radiação solar entre dias ensolarados (a) e nublados (b) em uma cidade da Índia.

Figura 1 - Curvas de radiação solar de dia ensolarado (a) e dia nublado (b) para a cidade de Buraydah em dezembro de 2014



Fonte: Almarshoud (2016).

Como mostra a figura 1, foram medidas as duas componentes principais da irradiação solar, DNI e DHI, assim como a GHI para ambos os tipos de dias. É importante notar que em dias nublados, praticamente todos os componentes estarão baixos na maior parte do tempo, o que levará à superestimação acima mencionada. A partir desses dados, pode-se modelar a potência obtida dos painéis solares fotovoltaicos após a instalação. Com base na produção de um painel típico com recursos energéticos disponíveis, esse tipo de modelagem pode ser realizado considerando a potência constante no fluxo de potência. (CANDELO-BECERRA et al., 2015).

Para utilizar a energia solar, é necessário um sistema solar fotovoltaico, que consiste em importantes componentes principais: módulos fotovoltaicos; inversor; controlador e bateria. Para criar este tipo de sistema, apenas módulos e inversores podem ser usados, dependendo do tipo de configuração necessária, outros elementos são também exigidos. (LANA et al., 2015). A seguir, serão caracterizados tais componentes do sistema fotovoltaico.

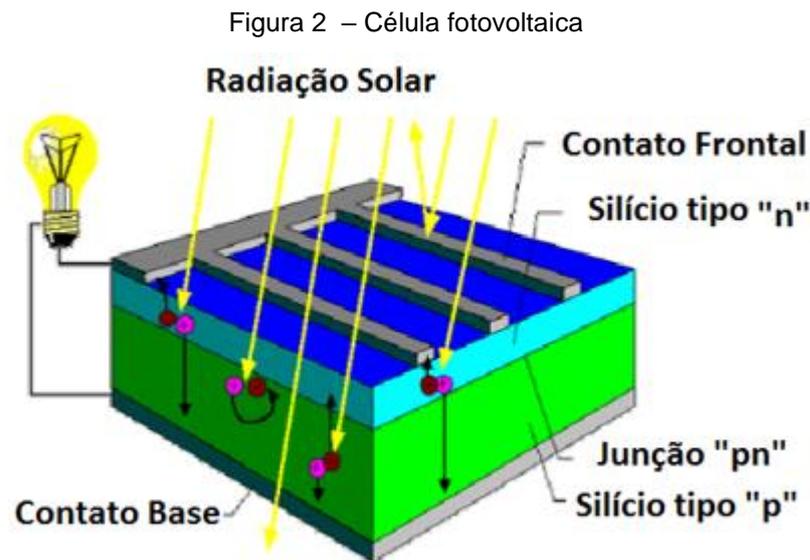
2.2 Módulo fotovoltaico

A conversão direta de radiação solar em energia elétrica é denominada como efeito fotovoltaico ou efeito fotoelétrico. (CORREIA, 2019). Os semicondutores são os responsáveis por este fenômeno, isso porque possuem quatro elétrons na camada de valência e que se combinam formando uma estrutura cristalina, praticamente isenta de elétrons livres. (MACHADO; CORREA, 2015).

Para que haja elétrons livres nesse tipo de elemento, o material deve passar por um processo chamado de dopagem. Na dopagem com fósforo ou o arsênio, elementos pentavalentes e portadores de cargas negativas, o resultado é um material com um elétron em excesso denominado como cristal do tipo N. Já no caso da dopagem com elementos como índio e boro, portadores de cargas positivas, também chamadas de lacunas, o cristal formado é do tipo P. Com base em ambos os tipos de dopagem, é possível criar as estruturas conhecidas como células fotovoltaicas. (SILVA, 2016).

As células fotovoltaicas são a base dos sistemas fotovoltaicos, elas são formadas por junções PN, de cristais P com cristais N. Geralmente, tais cristais são

baseados em silício dopado por meio de fosforo e boro, conforme o seu tipo resultado. Nas junções PN as cargas negativas se concentram de um lado, enquanto as positivas de outro, o que cria um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de elétrons entre estes lados. (SILVA, 2016). A figura 2 mostra uma célula fotovoltaica esquematizada.



Para formar um módulo fotovoltaico, várias células são agrupadas em série e/ou em paralelo de acordo com a tensão e a saída de corrente desejadas. Sistemas de geração de energia fotovoltaica são formados com base na conexão de módulos, tanto em paralelo como em série. (ALMEIDA, 2012). Ao ser criado, cada módulo é caracterizado pela tensão de corrente ($I-V$), assim como pela potência obtida na saída (KUMAR; KUMAR, 2017).

Certos parâmetros são decisivos, uma vez que são utilizados para definir se um módulo fotovoltaico terá uma vida útil curta ou extensa. Alguns dos principais parâmetros desse tipo são a magnitude e a duração da pressão e a temperatura durante a sua construção. (KUMAR; KUMAR, 2017). No caso do Brasil, são três os principais tipos de módulos: silício monocristalino, silício policristalino e o módulo de filme fino. No contexto brasileiro, os módulos possuem eficiência em torno dos 22%. No entanto, módulos experimentais podem alcançar valores muito maiores, mas ainda

não há previsão de produção em larga escala desse tipo de tecnologia. (CORREIA, 2019).

2.3 Inversor

Conversores eletrônicos de potência são essenciais para sistemas de conversão direta de radiação solar em eletricidade, isso porque são utilizados para converter a energia elétrica CC, produzida nos módulos fotovoltaicos, em energia elétrica CA. A conversão para CA pode ser de dois tipos, monofásica ou trifásica e para isso, mais de um conversor pode ser empregado, mas geralmente, se usa apenas um conversor trifásico para este fim. Os conversores CC-CA são também designados como inversores, a denominação mais comum nesta área. (FREITAS, 2008).

O conversor desse tipo deve operar nos estados de frequência e tensão adequados para a sua ligação à rede ou em modo isolado. Isso é necessário porque tal classe de dispositivo deve não só realizar a conversão CC-CA, mas também ajustar esse sinal elétrico conforme a frequência e o estado de tensão da rede à qual está conectado. (FREITAS, 2008). Além disso, outros parâmetros importantes são a flexibilidade de instalação, a eficiência de conversão, a segurança e durabilidade. (COELHO, 2019).

Para geradores fotovoltaicos conectados à rede, é exigido que seus inversores sejam capazes de só realizar a conversão entre CC e CA se o sistema estiver efetivamente conectado. Assim, quando há uma interrupção na rede, o inversor é também automaticamente desligado. (COELHO, 2019).

O principal papel dos inversores tanto em sistemas de geração distribuída, como nos sistemas em que são empregados acumuladores de energia, deve ser fornecer eletricidade ao local e/ou à rede em corrente alternada, dentro de padrões de qualidade adequados. Isso requer, principalmente, que a forma de onda da corrente resultante na rede tenha mínima distorção, ou seja, que se aproxime da forma senoidal. (POMILIO; PAREDES; DECKMANN, 2013). Já os inversores trifásicos são para potências acima 5kW e existe ainda a opção de agrupar inversores monofásicos para funcionarem como um trifásico. (SILVA, 2018).

2.3.1 Subdimensionamento do inversor

Um inversor é um dos componentes mais importantes do sistema fotovoltaico, tanto que é comumente utilizado tanto para sistemas isolados como para sistemas conectados à rede. Esse componente é dimensionado conforme dois parâmetros principais, a sua potência nominal e as propriedades elétricas do sistema em si. (NOWACZYKI; MELLO; SILVA, 2020).

Independentemente do tipo de inversor escolhido para um sistema fotovoltaico, todos os modelos de um mesmo fabricante são baseados em um intervalo de operação específico para as suas tensões e outra para suas potências. (NOWACZYKI; MELLO; SILVA, 2020).

A definição da potência total de um inversor só pode ser realizada por meio da potência previamente dimensionada para o sistema a que este inversor fará parte. Isso porque as potências do inversor e do sistema devem ser compatíveis para que esse dispositivo possa realizar adequadamente a conversão entre corrente e tensão CC para corrente e tensão CA. (NOWACZYKI; MELLO; SILVA, 2020).

Nesse sentido, pode-se falar do fator de dimensionamento de inversores (FDI), que é definido como a relação entre a potência nominal do inversor e a potência de pico do gerador fotovoltaico. Essa grandeza é adimensional, sendo calculada por meio da equação 1 (NOWACZYKI; MELLO; SILVA, 2020).

$$FDI = P_{CA}/P_S \quad (1)$$

Onde:

P_{CA} = Potência nominal CA do inversor [W];

P_S = Potência dos módulos em condições padrão [Wp].

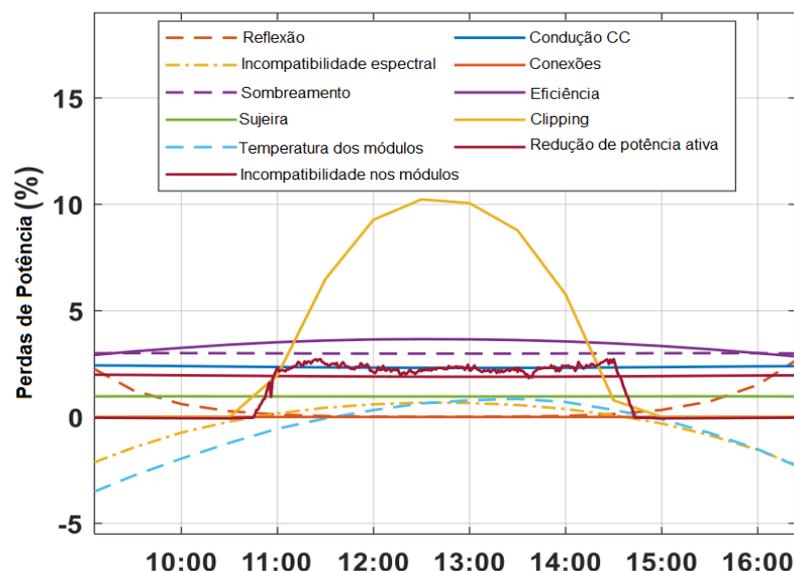
Com base na equação 1 é possível ajustar o inversor em uma configuração de ponto ótimo, quando o sistema é capaz da utilização máxima da energia gerada. (NOWACZYKI; MELLO; SILVA, 2020). Além disso, a partir de simulação numérica, baseada em dados horários de irradiância e de temperatura local é possível avaliar a FDI, uma variável de projeto capaz de influenciar a relação custo benefício de um sistema fotovoltaico. (PINHO; GALDINO, 2014).

O FDI é uma das variáveis de um projeto de sistema fotovoltaico mais importantes, isso porque com o subdimensionamento do inversor, isto é, quando seu FDI é menor do que 1, há a possibilidade de redução do custo da energia produzida. Com isso, é possível tornar a viabilidade de implantação desse tipo de projeto ainda maior. (ROVERSI; RAMPINELLI, 2020).

Entretanto, um inversor subdimensionado, mesmo que seja vantajoso também para obtenção de mais de uma opção de projeto, deve ter sua faixa de subdimensionamento estipulada de maneira ponderada, de modo a minimizar as perdas do sistema com esse tipo de configuração. (NOWACZYKI; MELLO; SILVA, 2020). Além disso, um FDI muito pequeno submete o inversor a exposição prolongada a altas temperaturas, o que diminui sua vida útil. (ROVERSI; RAMPINELLI, 2020).

Além de clipping, há uma variedade de outros mecanismos de perda operacional presentes em sistemas fotovoltaicos. Essas perdas são frequentemente categorizadas como perdas ópticas (por exemplo, reflexão, sujeira e sombreamento), perdas do sistema CC (por exemplo, incompatibilidade de módulo, efeitos de temperatura e conexões) e perdas de sistemas CA (por exemplo, eficiência do inversor, clipping e fiação). Muitos desses tipos de perda variam com as circunstâncias atmosféricas, mas muitos também são interdependentes. (AZZOLINI; RENO, 2021). A figura 3 mostra um gráfico com essas perdas.

Figura 3 – Perdas de potência de um sistema fotovoltaico

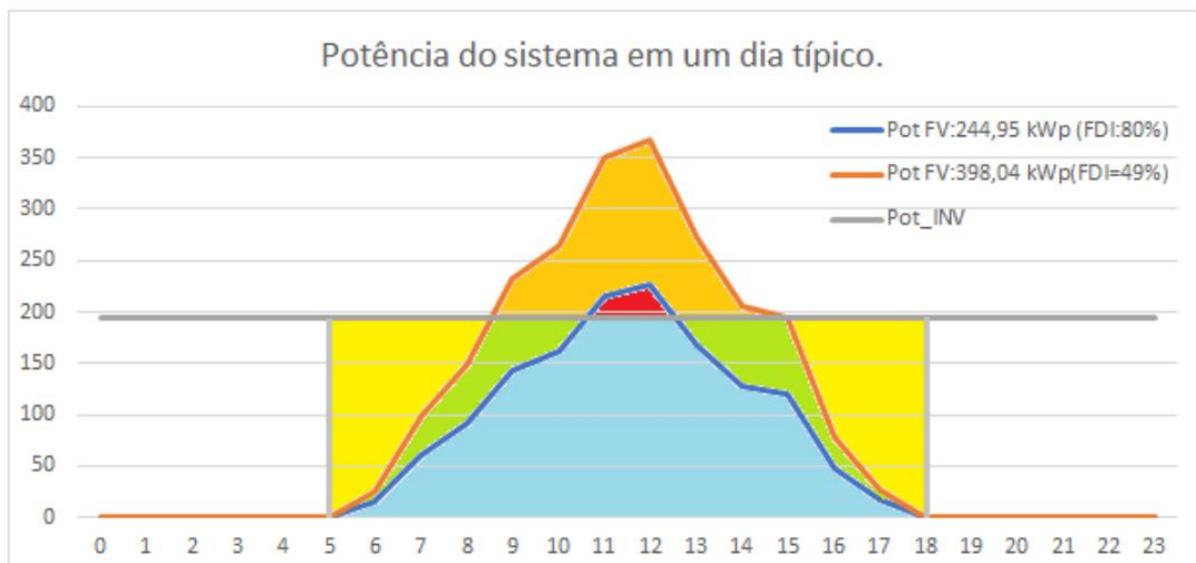


Fonte: Adaptado de Azzolini e Reno (2021).

Para um inversor operando em capacidade total é provável que sua potência ativa seja reduzida e sua potência reativa seja elevada, mas na prática, isso não é considerado como uma perda, mas no gráfico da figura 3 foi referido entre as perdas. (AZZOLINI; RENO, 2021). Nota-se que as perdas por clipping se destacam durante o intervalo de tempo em que há maior possibilidade de geração.

Embora o incremento de potência de um sistema fotovoltaico, a partir de um FDI menor do que 1, traga uma alta perda de energia por clipping, como demonstrado pela figura 3, esse tipo de situação também se mostra vantajosa, como mostra a curva de potência da figura 4.

Figura 4 - Curva de potência de dois sistemas fotovoltaicos



Fonte: Portela (2020).

Na figura 4 são comparados dois sistemas fotovoltaicos, um com FDI de 0,8 e outro com FDI de 0,49, o primeiro com sua potência gerada representada pela linha azul e outro pela linha laranja. A linha reta em cinza demonstra a potência máxima do inversor, logo, tudo acima dessa reta é clipping. Portanto, mesmo que o clipping do sistema com FDI de 0,49 seja maior, também é notável que essa curva de potência é mais larga, o que significa uma geração durante mais tempo. No entanto, o sistema com menores perdas e que também gera energia por mais tempo se mostra mais vantajoso, por isso, a tendência é um intervalo de FDI entre 0,75 e 0,85. Na figura 4

também é representada uma área em amarelo, evidenciando o quanto um FDI abaixo de 1 é vantajoso ao aumentar o período diário de produção de eletricidade. (PORTELA, 2020).

2.4 Controlador de carga

Os controladores de carga são dispositivos que devem ser utilizados quando há baterias no sistema. Isso porque os controladores têm o papel de proteger as baterias de cargas e/ou descargas excessivas. Quando as baterias atingem a carga plena, os controladores de carga são necessários para desconectar elas dos módulos fotovoltaicos. Assim, os controladores devem ser sempre dimensionados adequadamente conforme o tipo de bateria a ser utilizado. (SILVA, 2018).

Além disso, existem controladores de carga capazes de tornar o processo de carga das baterias mais eficiente por meio do seguimento do ponto de potência máxima (SPPM). A eficiência dos controladores com SPPM chega a cerca de 97%, com um mínimo de 92%. Esse tipo de controlador conta ainda com outras facilidades, como alarmes que acionam quando há algum problema com o sistema das baterias. (PINHO; GALDINO, 2014).

2.5 Baterias

As baterias são necessárias em sistemas em que não há ligação com a rede elétrica. Esse tipo de bateria é utilizado para armazenar a energia elétrica, para que essa energia seja usada em momentos em que não há geração pelos módulos fotovoltaicos ou quando essa geração é insuficiente. (PINHO; GALDINO, 2014). Em vista de suas características, o sistema de armazenamento deve ser escolhido conforme o dimensionamento da carga a ser atendida. Mas, em geral, é preciso decidir entre duas opções, um sistema de armazenamento com maior vida útil e mais eficiente ou um sistema de armazenamento de menor custo econômico. (SILVA, 2018).

Uma bateria é formada a partir de células eletroquímicas conectadas em série e/ou paralelo. Tais células realizam um processo de redox, ou seja, um processo eletroquímico de oxidação e redução. O processo redox é o que permite o armazenamento da energia elétrica em forma de energia química. Assim, quando é

necessário energizar uma carga, a bateria transforma a energia química em elétrica. (PINHO; GALDINO, 2014).

As baterias mais utilizadas em sistemas de geração fotovoltaica são as de Chumbo-ácido (Pb-ácido), no entanto, as baterias de Níquel-Cádmio (NiCd), de Níquel-hidreto metálico (NiMH) e de íon de Lítio (Li-ion) são baseadas em tecnologias mais eficientes e também podem ser utilizadas em sistemas em que os custos não são uma limitação. (SILVA, 2018).

2.6 Configurações de sistema solares fotovoltaicos

Sistemas fotovoltaicos podem ser configurados a partir de três maneiras básicas, uma delas é a conexão do sistema com a rede elétrica, que é chamado de sistema *on-grid*. Outra situação é o sistema que funciona de maneira isolada, chamado de sistema isolado ou sistema *off-grid*. (APOLONIO, 2014). A terceira maneira é o sistema híbrido, onde são combinados dois tipos de geradores, a fonte fotovoltaica e outra fonte que pode ser um gerador eólico, ou gerador a diesel, a gás, a gasolina, etc. (SILVA, 2014).

Considerando os componentes principais de um sistema fotovoltaico, os módulos fotovoltaicos, os inversores, as baterias e os controladores de carga, um sistema autônomo vai utilizar todos esses, mas um sistema conectado à rede vai utilizar somente os painéis e os inversores. (SILVA, 2014). Uma vez que este trabalho terá como foco somente sistemas com geração exclusivamente fotovoltaica, os sistemas híbridos estão fora de seu escopo, e por isso não serão tratados.

2.6.1 Sistemas autônomos

Nos sistemas autônomos a energia elétrica gerada nos períodos de radiação solar é armazenada nas baterias, momento em que as baterias são carregadas. Quando é necessário eletricidade e não há insolação, as baterias fornecem a energia para a carga, ou seja, são descarregadas. (SILVA, 2014). Nesse tipo de sistema, o controlador de carga coordena os ciclos de carga e descarga das baterias, otimizando esse sistema de armazenamento. Já o inversor é necessário como conversor de CC para CA, pois as cargas geralmente são baseadas em CA. (APOLONIO, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos autônomos são vantajosos por dispensarem o pagamento de impostos sobre a energia utilizada, já que a energia gerada é consumida no próprio local de geração e não exige a conexão à rede elétrica. Sua mobilidade também é outra característica que faz desse tipo de sistema muito popular, com isso, pode ser instalada em locais remotos onde não há rede elétrica, como por exemplo, em aldeias indígenas remotas. (RIBEIRO, 2020).

2.6.2 Sistemas conectados à rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são os mais comuns na maioria dos países. Esse tipo de configuração é utilizado tanto em situações em que a carga é apenas uma residência, na chamada geração distribuída, assim como em usinas fotovoltaicas de grande porte, na geração centralizada. (COELHO, 2019).

No caso brasileiro, a geração distribuída é mais difundida, uma vez que tanto o pequeno consumidor residencial como o grande consumidor industrial podem instalar sistemas desse tipo e obterem total fornecimento de sua energia ou ainda, parte desse fornecimento pelo sistema fotovoltaico. Uma grande vantagem dessa modalidade de geração é que por estar junto ao local onde será consumida, as perdas na rede local são altamente reduzidas, o que aumenta a eficiência e a estabilidade do serviço de fornecimento de energia local. (COELHO, 2019).

No caso brasileiro, outra grande vantagem da instalação de sistemas fotovoltaicos como geração distribuída é a possibilidade de conciliar o pico de geração fotovoltaica com o pico de demanda elétrica. Isso ocorre porque durante o verão, na maior parte das cidades brasileiras há um pico de demanda elétrica para alimentar os sistemas de refrigeração durante as horas mais quentes do dia, o que corresponde também ao pico de geração dos módulos fotovoltaicos expostos à maior radiação solar. (COELHO, 2019).

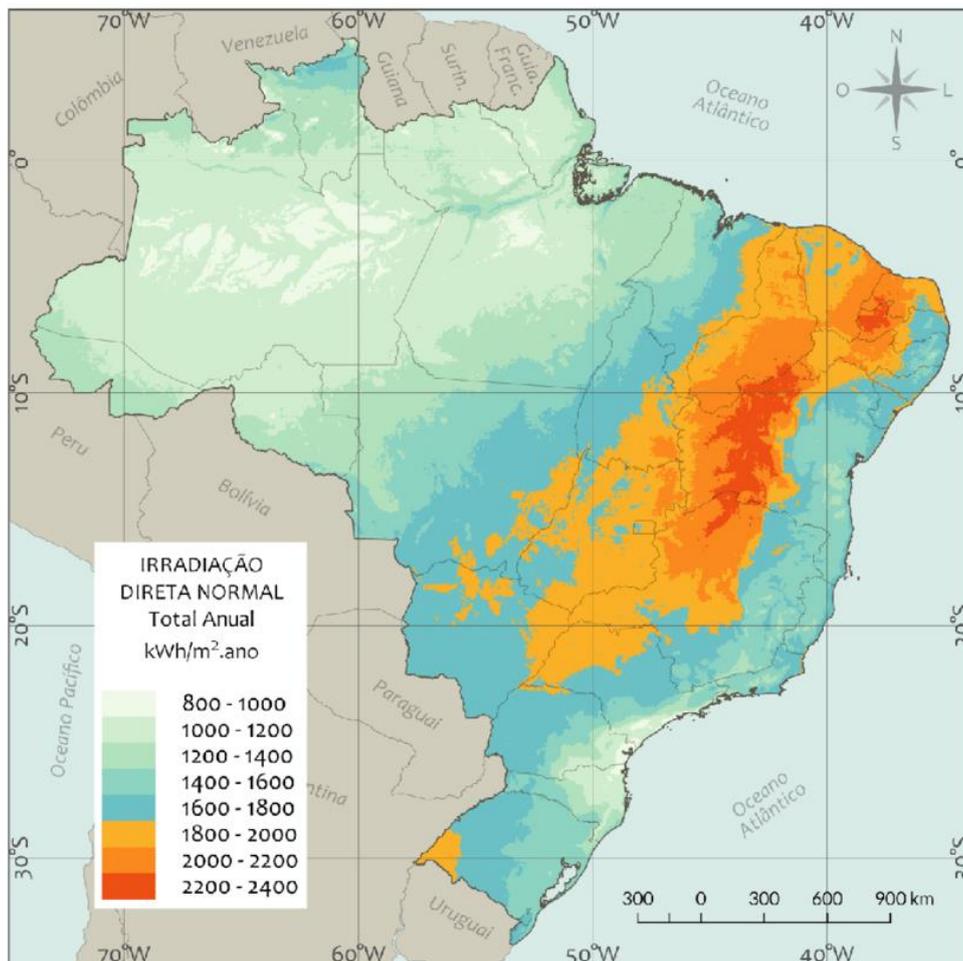
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo serão desenvolvidos os cálculos de dimensionamento dos sistemas que serão analisados em relação à viabilidade econômica, ao serem implantados com inversores subdimensionados.

3.1 Local definido

Para a realização do presente trabalho foi determinado que seriam analisadas situações de sistemas fotovoltaicos com inversores subdimensionados e normais para a cidade de Recife. O mapa da figura 5 mostra a irradiação direta normal total anual, onde é possível observar que o estado de Pernambuco está entre os territórios com alta incidência de irradiação.

Figura 5: Mapa do total anual de irradiação solar direta normal com destaque para regiões com maior potencial de aproveitamento da energia solar concentrada



Fonte: Pereira, et al., 2017.

A cidade escolhida para este estudo (Recife), tem latitude $8,101^\circ$ S e longitude $34,949^\circ$ O. A Tabela 1 mostra a irradiação solar diária média mensal ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) da cidade de Recife.

Tabela 1: Irradiação solar média mensal

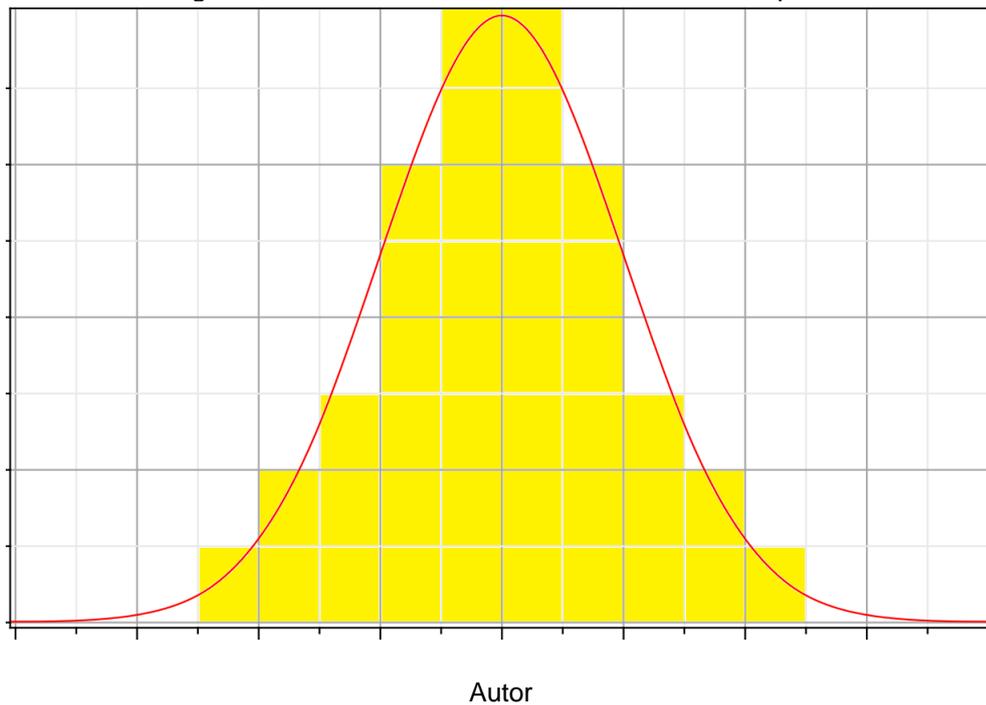
Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [$\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$]													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Plano Horizontal	0° N	5,84	5,94	5,88	5,15	4,47	4,18	4,30	5,03	5,45	5,78	6,05	6,06	5,34	1,87
Ângulo igual a latitude	8° N	5,56	5,78	5,88	5,31	4,72	4,47	4,57	5,24	5,51	5,68	5,79	5,73	5,35	1,41
Maior média anual	5° N	5,68	5,85	5,89	5,26	4,63	4,37	4,48	5,17	5,50	5,73	5,89	5,86	5,36	1,52
Maior mínimo mensal	23° N	4,88	5,27	5,65	5,39	5,00	4,83	4,90	5,43	5,42	5,27	5,11	4,95	5,18	,82

Fonte: Cresesb, 2022.

3.2 Dimensionamento dos sistemas

Para o cálculo do valor de pico da curva da irradiância foi estimado seu comportamento ao longo do dia como semelhante ao gráfico da curva normal, e posta sobre uma malha quadriculada de tamanho oito por dezesseis, a representação gráfica pode ser vista na Figura 6. Observando que os valores de irradiação média diária de Recife respeitam a equação (2), multiplicando-se as horas de sol pleno por mil e que a área sob a curva representada possui aproximadamente 40 quadrados, chegamos a conclusão de que cada quadrado representado possui uma energia equivalente ao valor resultante da equação (2) dividido por 40. Considerando também que cada aresta de tempo representa 1h, é deduzido que a potência representada por cada bloco é exatamente ao valor obtido no cálculo anterior; para se calcular o pico multiplicamos este valor por 8, que é a quantidade de quadrados observados no gráfico para se chegar ao pico da curva, o cálculo referente a cada mês pode ser visto pela tabela 2.

Figura 6 - Gráfico da Curva normal sobre a malha quadriculada



$$1 \left[\frac{kW}{m^2} \right] * HSP = Irradiação [kWh/m^2.dia] \quad (2)$$

Tabela 2 – Potência de Pico

Mês	Potência de Pico (W/m ²)
Janeiro	$1000 * 5,56 * 8 / 40 = 1.112$
Fevereiro	$1000 * 5,78 * 8 / 40 = 1.156$
Março	$1000 * 5,88 * 8 / 40 = 1.176$
Abril	$1000 * 5,31 * 8 / 40 = 1.062$
Maio	$1000 * 4,72 * 8 / 40 = 944$
Junho	$1000 * 4,47 * 8 / 40 = 894$
Julho	$1000 * 4,57 * 8 / 40 = 914$
Agosto	$1000 * 5,24 * 8 / 40 = 1.048$
Setembro	$1000 * 5,51 * 8 / 40 = 1.102$
Outubro	$1000 * 5,68 * 8 / 40 = 1.136$
Novembro	$1000 * 5,79 * 8 / 40 = 1.158$
Dezembro	$1000 * 5,73 * 8 / 40 = 1.146$

Fonte: Autor

Com base nos valores da tabela e nas opções do mercado escolhemos os inversores, sendo o subdimensionado, de 1000 Wp da Ecosolys, que custa cerca de

R\$ 1969,00 e sendo o dimensionado sem clipping o inversor de 2000 Ecosolys, com custo de R\$ 1680,00.

3.3 Prejuízos dos sistemas por clipping

O inversor subdimensionado possui uma potência de 1000 Wp, isso quer dizer que a porcentagem dessa potência de corte em relação a potência de pico, em outras palavras, o fator de dimensionamento do inversor (FDI) respeitará a tabela 3.

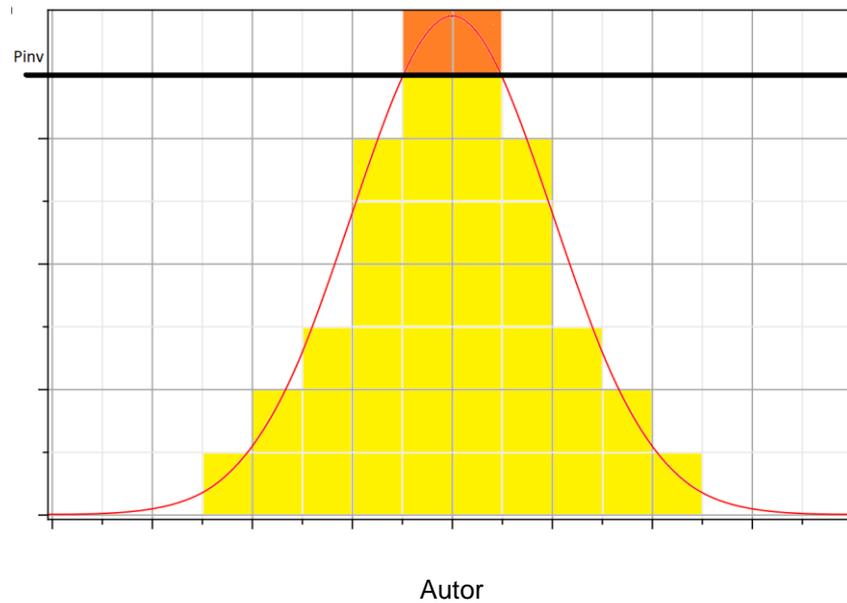
Tabela 3 – Porcentagem da Potência de Pico

Mês	Porcentagem
Janeiro	$1.000 / 1.112 = 89,93\%$
Fevereiro	$1.000 / 1.156 = 86,50\%$
Março	$1.000 / 1.176 = 85,03\%$
Abril	$1.000 / 1.062 = 94,16\%$
Maio	$1.000 / 944 = 100,06\%$
Junho	$1.000 / 894 = 111,86\%$
Julho	$1.000 / 914 = 109,41\%$
Agosto	$1.000 / 1.048 = 95,42\%$
Setembro	$1.000 / 1.102 = 90,74\%$
Outubro	$1.000 / 1.136 = 88,02\%$
Novembro	$1.000 / 1.158 = 86,35\%$
Dezembro	$1.000 / 1.146 = 87,26\%$

Fonte: Autor

Através da tabela 3 podemos ver que nos meses de Maio, Junho e Julho não houve clipping e nos meses de Agosto e Abril, houve em valores ínfimos, sendo ambos aproximados para o caso de não incidência; nos meses de Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro, Março, Abril e Setembro houve a presença de clipping, por esse motivo estes foram aproximados conforme a figura 7.

Figura 7 - Gráfico da Curva normal de Setembro e Abril



A partir das quantidades de quadrados vemos que 5% da energia consumida entre setembro e março foi perdida pelo efeito do clipping enquanto que nos demais não houve perdas. Multiplicando a geração diária pela porcentagem da geração perdida no clipping, e pela quantidade de dias no mês obtemos a tabela 4 representando as perdas por mês e no total.

Tabela 4 – Energia perdida por Clipping

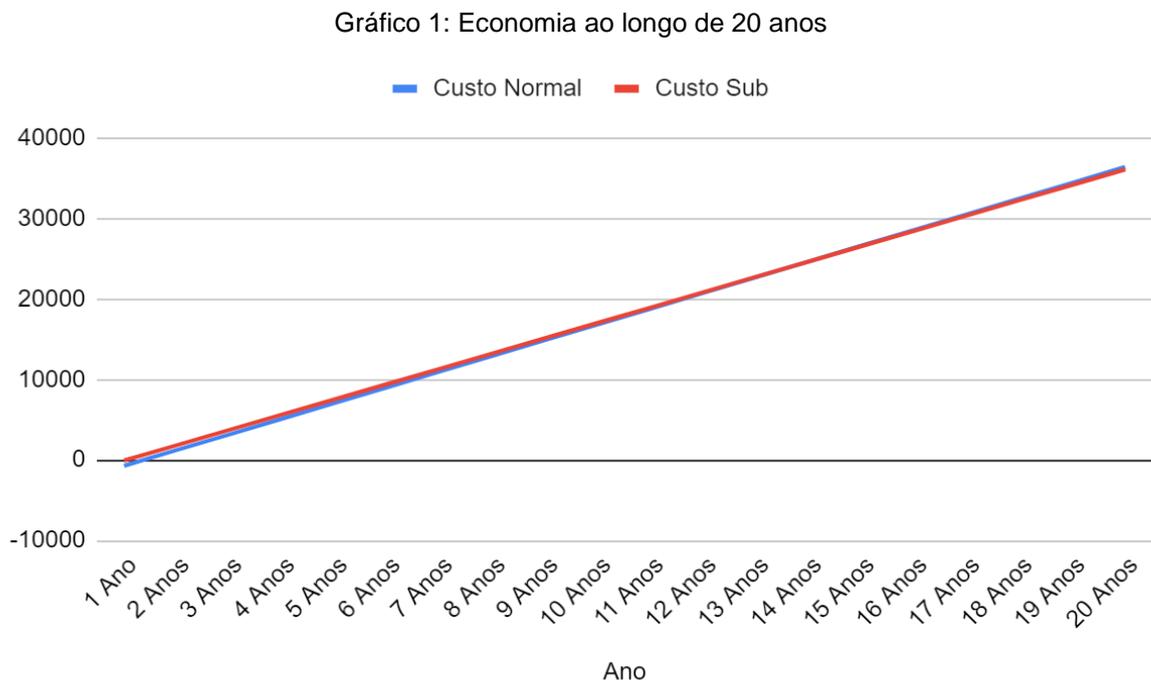
Mês	Potência Perdida
Janeiro	$0,05 * 31 * 5,56 = 8,62$
Fevereiro	$0,05 * 28 * 5,78 = 8,09$
Março	$0,05 * 31 * 5,88 = 9,11$
Abril	0
Maio	0
Junho	0
Julho	0
Agosto	0
Setembro	$0,05 * 30 * 5,51 = 8,26$
Outubro	$0,05 * 31 * 5,68 = 8,80$
Novembro	$0,05 * 30 * 5,79 = 8,68$
Dezembro	$0,05 * 31 * 5,73 = 8,88$
Total	69,06 Kwh/Ano

Fonte: Autor

Para realizar o cálculo dos prejuízos dos sistemas analisados em vista do clipping é preciso dos dados de tarifas da cidade. A partir de informações das concessionárias NeoEnergia de Pernambuco, foram definidas as tarifas de cada cidade, onde a tarifa por quilowatt/hora é equivalente a R\$0,73.

Sendo assim, multiplica-se a porcentagem do clipping pela quantidade de horas e pela quantidade de dias para se ter o clipping anual, onde o resultado é de 69,06 KWh/ano. Multiplicando o clipping anual pelo valor das tarifas (R\$0,73), tem-se um prejuízo anual de R\$50,41, o que corresponde a 7% da economia por comprar o inversor subdimensionado já que o inversor de 1000 Wp, tem um custo de R\$1.969,00 enquanto o inversor de 2000 Wp da tem um custo médio de R\$2.680,00, resultando numa economia de R\$ 711,00.

O gráfico a seguir apresenta a economia por cada sistema para os próximos 20 anos, ele foi montado se descontando no primeiro ano o valor dos inversores dos rendimentos aferidos pela geração de energia, nos anos seguintes os rendimentos foram incrementados sendo o custo subdimensionado sem o valor descontado no clipping.



Fonte: Autor

Ao somar o valor economizado durante o período, o sistema com inversor dimensionado sem clipping tem uma diferença de R\$317,20 ao ser favor. Pode-se observar então que o sistema com inversor subdimensionado por ser um investimento inicial de menor custo, é viável e pode ser tomado como uma possibilidade haja vista o valor ínfimo de diferença em relação ao inversor não subdimensionado.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A partir do que foi analisado em relação ao desenvolvimento do presente trabalho, nota-se que quanto menor o FDI, maior o clipping e conseqüentemente, o prejuízo do sistema cresce. Porém, para uma análise de sistema com inversor subdimensionado mais próximo ao limite de 100% o valor economizado pode ser considerado irrisório frente a economia gerada pela compra do inversor mais barato. Com isso, o presente trabalho cumpriu com seu objetivo, demonstrando que para cada sistema analisado mediante o consumo do local o sistema subdimensionado pode ser considerado viável economicamente.

Todavia é preciso considerar que foram feitas simplificações neste estudo de caso. Haja visto que foi realizado a partir de uma estimação baseada em médias de consumo na cidade, que podem não estar condizentes com a realidade, além de termos desprezado a questão da eficiência dos inversores, esta que varia negativamente quando em funcionamento perto de seus valores nominais.

Portanto, como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a análise de sistemas fotovoltaicos considerando os consumos diários da cidade, devido às diferenças de irradiação solar e considerando tais variações referentes aos inversores.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10899** - Energia solar fotovoltaica-Terminologia. ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2006.
- ALMARSHOUD, A. F. Sizing of PV array for water pumping application. In: **Conference: 32nd European photovoltaic solar energy conference and exhibition, at Munich, Germany**. 2016.
- ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados á rede**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2012.
- APOLONIO, D. M. **Energia solar fotovoltaica conectada à rede elétrica em Cuiabá**. 2014. 148p. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética) UFMT – FAET – PPGEEA/MT. Cuiabá. 2014.
- AZZOLINI, J. A.; RENO, M. J. The Effects of Inverter Clipping and Curtailment-Inducing Grid Support Functions on PV Planning Decisions. In: **2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. IEEE, 2021. p. 0706-0712.
- CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. DS. Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 570-579, 2016.
- CANDELO-BECERRA, J. E.; HERNÁNDEZ-RIAÑO, H. E.; SANTANDER-MERCADO, A. R. Comparison of multiobjective harmony search, cuckoo search and bat-inspired algorithms for renewable distributed generation placement. **Tecnológicas**, v. 18, n. 35, p. 105-116, 2015.
- CELESC. **Tarifas**. 2022. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia> Acesso em: 20 ago. 2022.
- COELHO, A. B. **Análise técnica e econômica de um dispositivo experimental de geração de energia fotovoltaica em um sistema on-grid**. 2019. 95 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- CORREIA, F. M. **Convertendo a radiação solar em energia elétrica**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CRESESB. **Solar**. 2022. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data> Acesso em: 29 ago. 2022.
- CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. Brito. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. 2022. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 05 out. 2022.
- ENEL. **Tarifas**. 2022. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Para_Voce/tarifa-energia-eletrica.html Acesso em: 20 ago. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2022** – ano base 2021. 2022.

FREITAS, S.S. A. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. 2008. Tese de Doutorado. Instituto Politecnico de Braganca (Portugal).

GÓMEZ, J. M. et al. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, 2018.

KUMAR, M.; KUMAR, A. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 554-587, 2017.

LANA, L. T. C. et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias Online**, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

MACHADO, K. S. Van-Dall; CORREA, N. **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015.

MARTINS, F. R. et al. **Atlas brasileiro de energia solar 2**. 2017.

NEOENERGIA. **Tarifas**. 2022. Disponível em: <https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/Baixa%20Tens%C3%A3o/tarifas-grupo-b.aspx> Acesso em: 20 ago. 2022.

NEOSOLAR. **Inversor Senoidal Epever IPower Plus IP1500-12 - 1500W 12/220V**. 2022. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-senoidal-epever-ipower-plus-ip1500-12-1500w-12-220v.html> Acesso em: 29 ago. 2022b.

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico 340W - Resun RS6S-340P**. 2022. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-340w-resun-rs6s-340p.html> Acesso em: 29 ago. 2022a.

NOWACZYKI, A. P. P.; MELLO, A. P. C.; SILVA, G. S. Metodologia de Projeto para SFVCR Considerando a Saturação de Inversores. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.

PEREIRA, E. MARTINS, F.; COSTA, R.; GONÇALVES, A.; LIMA, F.; RÜTHER, R.; ABREU, S.; TIEPOLO, G.; PEREIRA, S.; SOUZA, J.. (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª Edição Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Universidade Federal de São Paulo ISBN: 978-85-17-00089-8. DOI: 10.34024/978851700089.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cresesb Cepel, v. 1. 2014.

POMILIO, J. A.; PAREDES, H. K. M.; DECKMANN, S. M. Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. **São Paulo**, v. 23, p. 1-3, 2013.

PORTELA, J. P. G. **Análise financeira e de desempenho de planta solar fotovoltaica de 244, 95 kWp conectada à rede**. 2020.

RIBEIRO, L. G. **Análise do consumo sistema fotovoltaico isolado: levantamento e dimensionamento.** Engenharia Elétrica-Tubarão, 2020.

ROVERSI, K.; RAMPINELLI, G. A. Análise do fator de dimensionamento do inversor em um sistema fotovoltaico conectado à rede. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018.** 2020.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital.** 2009.

SILVA, F. R. R. M. **Estudo técnico-econômico comparativo entre um sistema fotovoltaico isolado e um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para uma mesma unidade consumidora de energia.** 2018.

SILVA, J. J. B. **Análise técnica e economica de um sistema fotovoltaico como fonte de energia para agricultura familiar.** 2014. 59 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Formas Alternativas de Energia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SILVA, M. F. **Panorama da Energia Solar Fotovoltaica Centralizada no Sistema Elétrico Brasileiro:** Evolução, Desafios e Tendências. Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, 2016.