

THÚLIO CORRÊA VIANNA

**Análise de desempenho de sistemas  
fotovoltaicos com sobrecarga na região da  
zona da mata mineira**

Viçosa, MG

2022

THÚLIO CORRÊA VIANNA

**Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos com  
sobrecarga na região da zona da mata mineira**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira

Viçosa, MG

2022

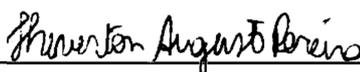
THÚLIO CORRÊA VIANNA

## **Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos com sobrecarga na região da zona da mata mineira**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em 09 de DEZEMBRO de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA



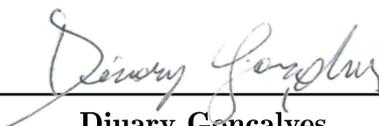
---

**Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira**  
Orientador



---

**Vitor Dimas Siqueira**  
Membro Avaliador



---

**Diuary Gonçalves**  
Membro Avaliador

Viçosa, MG  
2022

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,  
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo privilégio, força e determinação. Aos meus pais, pela mão invisível que me guiou e protegeu desde minha concepção, ao esforço que muitas vezes nos filhos nem percebemos, pois necessitamos de vida para compreender a grandeza desse Amor, incluindo aqui toda minha família. Meu irmão Thomas, que me inspirou e me recebeu em Viçosa, Bruno, meu padrinho, o qual me espelho desde criança, inclusive profissionalmente. Descendo da primeira prateleira agradeço aos que me acompanharam durante essa jornada, os que já conhecia das cidades que morei, principalmente Curvelo e Cordisburgo, Wylker, Tamara, Koreaia, Ana e tantos que conhecia e me aproximei em Viçosa. Aos que conheci em Viçosa, primeiramente Maria, meus novos irmãos Lucas e Vitor, Jennifer, Inter e aos amigos que fiz estudando, Lucas, Leticia, JR, Léo, Pablo, Uliana, Yan, Bota e tantos outros que estão em meu coração. Por fim agradeço aos professores que me guiaram até aqui, com alguns atritos, que significam a proximidade criada. Heverton, meu orientador, o qual é uma referência para mim. Obrigado UFV

*“Alguma coisa que alguém falou que te inspire.” (Fulano, Ano tal)*

# Resumo

Diversos fatores contribuem para a crescente implementação de sistemas fotovoltaicos no Brasil. Nota-se isso ao analisar os dados mais recentes fornecidos pela Associação Brasileira de Energia Solar, uma vez que essa fonte já é a terceira maior da matriz energética brasileira. Certamente o fator principal para essa grande implementação é a viabilidade financeira. Para que o sistema opere de forma segura e eficiente um dos fatores importantes de projetos fotovoltaicos é sua sobrecarga. A prática de sobrecarregar o sistema é caracterizada pela execução de uma usina com potência instalada de módulos maior que a capacidade de conversão do inversor, tal técnica permite que o sistema atinja a potência nominal do inversor com maior frequência. Dentre os fabricantes dos inversores existem uma gama de sobrecarga aceita, existem dispositivos que aceitam 30%, 50% e até mesmo 100% de sobrecarga acima da potência nominal. O sistema fotovoltaico sobrecarregado causa o efeito *clipping*, quando a potência de entrada ofertada pelos módulos é maior que a capacidade de conversão do inversor. Portanto o intuito desse trabalho é realizar uma análise crítica sobre a eficiência de sistemas com diferentes níveis de sobrecarga, avaliando assim a relação entre potência instalada e geração. O objeto desse estudo são dezenove usinas em funcionamento na região da Zona da Mata mineira, todas com funcionamento por um período maior que um ano, fato que permite a avaliação do sistema durante o ciclo solar completo.

**Palavras-chaves:** Usina fotovoltaica; inversor fotovoltaico; módulo fotovoltaico; sobrecarga; efeito *clipping*.

+

## Lista de figuras

Figura 1 – Matriz elétrica Brasileira 2021. . . . .	11
Figura 2 – Materiais empregados na construção dos módulos. . . . .	11
Figura 3 – Princípio básico da célula fotovoltaica. . . . .	12
Figura 4 – Gráfico produção de energia. . . . .	14
Figura 5 – Gráfico produção de energia. . . . .	15
Figura 6 – Gráfico produção de energia. . . . .	16
Figura 7 – Geração diária - dia com baixa irradiação solar. . . . .	16
Figura 8 – Geração diária - dia com elevadas taxas de irradiação solar. . . . .	17
Figura 9 – Foto da Usina 4. . . . .	21
Figura 10 – Gráfico Produção Anual de Energia. . . . .	21
Figura 11 – Distribuição dos Pontos de Análise. . . . .	24
Figura 12 – Interpolação Linear. . . . .	25
Figura 13 – Interpolações Exponencial e Polinomial. . . . .	26
Figura 14 – Gráfico Sobrecarga x Potência x Geração. . . . .	27
Figura 15 – Gráfico Sobrecarga x Potência x Geração. . . . .	28

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas. . . . .	20
Tabela 2 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas. . . . .	20
Tabela 3 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas. . . . .	23
Tabela 4 – Dados estatísticos. . . . .	25
Tabela 5 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas. . . . .	29

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Sistema fotovoltaico</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Projeto de um sistema fotovoltaico</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Curvas de geração</b>	<b>13</b>
<b>1.4</b>	<b>Sobrecarga e efeito clipping</b>	<b>15</b>
<b>1.5</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>31</b>

# 1 Introdução

Na natureza existem diversas fontes de energia, porém um dos grandes desafios atuais da humanidade, devido as mudanças climáticas que vem ocorrendo nos últimos anos, se trata de como aproveitar a energia disponível no planeta, sem degradar o mesmo. Portanto existe uma tendência mundial que é refletida nos grandes investimentos em pesquisa e implementação em sistemas de energias renováveis. Sendo líder em investimento em energia renováveis da América Latina, o Brasil vem crescendo cada vez mais o investimento a cada ano, de 2018 para 2019 houve uma crescente de 74% desse investimento segundo a (ABSOLAR, 2021).

O conceito de energia renovável de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética(EPE) do Governo do Brasil se trata das energias que são provenientes dos recursos naturais que possuem um ciclo de renovação, como sol, vento e chuva. Essas fontes de energia possuem a característica de causar um menor impacto ambiental quando comparado as fontes fósseis, portanto são as consideradas energias limpas. Por sua vez, as fontes fósseis não possuem um ciclo de renovação, pois são originadas do acumulo de materiais e organismos orgânicos no subsolo do planeta (EPE, 2021). Dentre as fontes de energia fósseis, as que possuem maior destaque são petróleo, gás natural e carvão natural. No balanço de 2020 da Agencia internacional de energia (AIE) os combustíveis fosseis ainda são responsáveis por mais de 80% do fornecimento da energia mundial (ENERGIA, 2021).

Cursando um caminho mais ecológico, a matriz brasileira de fontes energéticas utilizadas para geração de energia elétrica, é composta em sua maioria por fontes renováveis. Observa-se na Figura 1 que cerca de 80% da matriz é composta por fontes renováveis (ANEEL, 2021), apresentando um grande crescimento da utilização das fontes solares e eólicas nos últimos anos . O estado de Minas Gerais lidera o ranking de geração solar entre os estados, com uma capacidade instalada de 938MW, referente a 18,1% (ABSOLAR, 2021).

Fatores como incentivo governamental e retorno financeiro são peças chaves para entender o fato de porque o Brasil vem se destacando pela implementação de fontes renováveis em seu território. Se tratando de energia solar, a qual é o tema desse trabalho a Aneel adota um sistema de compensação, lei 14.300, na qual é possível que um cidadão brasileiro tenha uma geração de energia em sua casa conectada a rede elétrica pública, e que a quantidade de energia enviada de sua fonte para a rede da concessionária seja abatida em sua conta de luz.

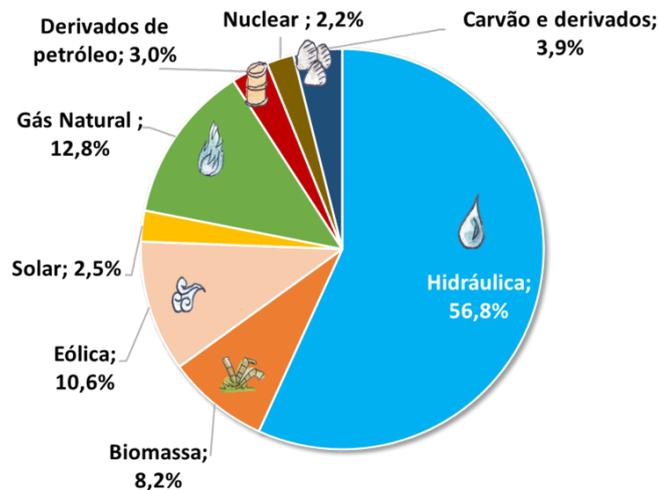


Figura 1 – Matriz elétrica Brasileira 2021.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2022 (ENERGIA, 2021).

## 1.1 Sistema fotovoltaico

O sistema fotovoltaico se trata de um conjunto de equipamentos que realizam o processo de captação da energia proveniente do sol, a conversão para energia elétrica e a proteção de todo o processo.

Os módulos fotovoltaicos evoluíram bastante desde sua criação e seguem avançando tecnologicamente. Avanços significativos são observados na eficiência e na potência dos módulos. A Figura 2 ilustra que a composição dos módulos se trata de camadas de vários materiais, a moldura de alumínio protege as extremidades, para proteger a parte frontal do módulo ele possui camadas de vidro e películas encapsulantes, após toda essa proteção se encontra a célula fotovoltaica, a qual é responsável pela geração de energia. Atrás da célula se encontra outra película encapsulante e o fundo protetor

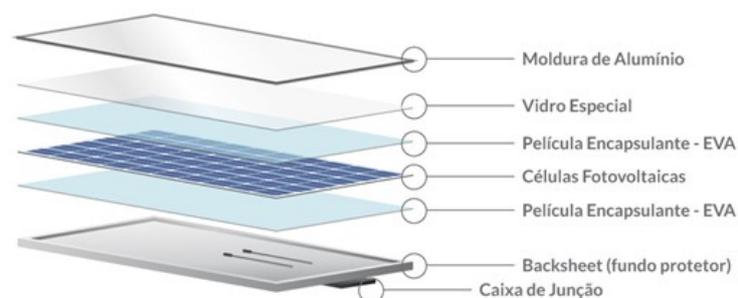


Figura 2 – Materiais empregados na construção dos módulos.

Fonte: Portal Solar.(SOLAR, 2021)

Como ilustrado na Figura 3, a célula fotovoltaica é composta por uma junção de materiais semicondutores, são utilizadas duas ou mais camadas, cada uma com diferentes níveis de dopagem de elétrons e lacunas. O material com excesso de elétrons é chamado de material Tipo N e o material com excesso de lacunas é chamado de material Tipo P. Esses materiais são sobrepostos e então surge uma reorganização elétrica nas extremidades, na qual os elétrons ocupam as lacunas, gerando assim uma camada neutra, camada de depleção. Se houver um circuito fechado entre as camadas e um incentivo, nesse caso a luz, para que os elétrons da camada N consigam vencer a resistência da junção e ocuparem as lacunas da camada P haverá um fluxo, logo uma corrente elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Devido a corrente que flui dos módulos ser contínua, se torna necessária uma conversão CC-CA para que a energia possa ser utilizada nos parâmetros que a concessionária de energia distribui. O sistema que é conectado na rede, conhecido pelo nome em inglês *on-grid*, funciona somente se houver uma referência de tensão para que ele ligue e trabalhe e realizando a conversão CC-CA utilizando os parâmetros da rede como base.

Existem também sistemas *off-grid*, não conectados a rede, que são sistemas isolados da rede de pública, geralmente ligados a bancos de baterias, porém não são objeto de estudo desse trabalho. Por fim o sistema híbrido é a mescla dos dois, funcionando conectado a rede e a bancos de bateria.

Os inversores fotovoltaicos possuem integrados a si uma lógica que otimiza a extração de energia dos módulos, MPPT (do inglês *Maximum Power Point Tracker*), regulando o sistema fotovoltaico no ponto ótimo de tensão e corrente, extraindo o máximo de potência disponível dos módulos dentro da máxima conversão do sistema. Nesse trabalho os dados avaliados são referentes a projetos com inversores da fabricante Fronius.

As proteções básicas e essenciais para o funcionamento do sistema são os dispositivos

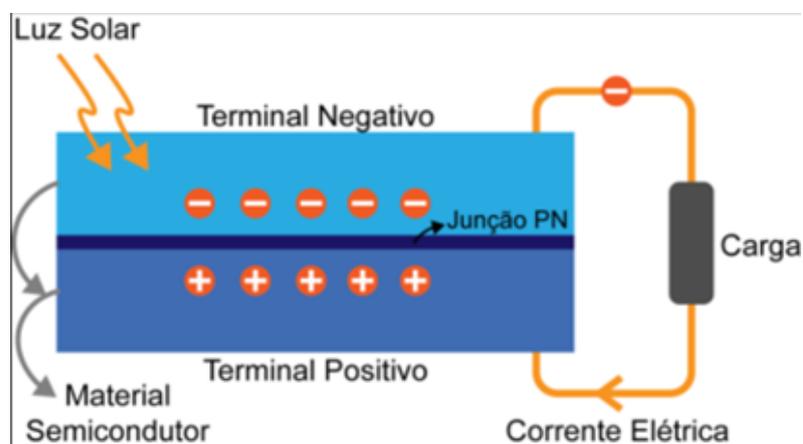


Figura 3 – Princípio básico da célula fotovoltaica.

Fonte: Baseado em (HERSCH; ZWEIBEL, 1982).

de proteção contra surtos e os disjuntores. Os dispositivos de proteção contra surtos são responsáveis por proteger o sistema de tensões elevadas que podem ocorrer em pequenos períodos de tempo. Já o disjuntor deve proteger o sistema contra curto-circuito e contra sobrecorrentes. Ambos os dispositivos são capazes de proteger as partes CC e CA do sistema, observando sempre as especificações do fabricante.

## 1.2 Projeto de um sistema fotovoltaico

Para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico é de suma importância compreender qual o interesse e as peculiaridades do investidor. Se seu interesse é cobrir os gastos energéticos de sua instalação, se é cobrir o gasto energético de diversas instalações ou até mesmo a comercialização da energia. Também é de suma importância realizar a avaliação dos locais disponíveis, até mesmo utilizando o espaço de forma funcional, como é o caso de usinas que são utilizadas de cobertura para estacionamentos ou até mesmo para animais.

De acordo com a geração de energia mensal necessária, é possível encontrar a potência instalada de módulos necessária para a geração de energia desejada. Considerando os índices de irradiação do local e a forma que os módulos irão receber os raios solares, avaliando também possíveis sombreamentos. Após definida o modelo e quantidade dos módulos é possível selecionar o inversor fotovoltaico para o sistema. Podendo esse operar ou não na sobrecarga, o que também influenciará na produção de energia, sempre se atentando a capacidade máxima de potência CC que o equipamento suporta.

Em consequência das dimensões do sistema é necessária confirmar se a instalação do padrão de entrada possui capacidade para receber o sistema ou deve ser alterado, fato que também é fator importante na escolha dos equipamentos, pois devido a tamanho do padrão, podem se mudar os níveis de tensão de atendimento. Ressaltando que esse trabalho tem como objeto usinas instaladas em clientes enquadrados no grupo B da concessionária, instalações atendidas em baixa tensão. Projetos para cliente grupo B caracterizam como microgeração, de modo que a potência de inversores seja menor ou igual a 75 kW.

## 1.3 Curvas de geração

O gráfico da energia disponibilizada por um conjunto de módulos em um dia ensolarado tem o formato de uma parábola. Na qual o gráfico seria potência em função do tempo, a curva começa a subir quando o sol nasce, por volta das 06:00 horas, segue ascendente aproximadamente até as 10:30 horas, se mantendo em potência máxima em média até as 13:30 horas, após esse horário a curva entra na fase descendente até tocar novamente no eixo quando o sol se põe. É possível observar essa curva na próxima imagem,

na qual está o gráfico da potência disponibilizada pelo sistema ao longo de um dia completo. As Figuras 4, 5 e 6 foram retiradas do monitoramento de usinas somente com fins ilustrativos, se trata de uma usina que não está no escopo de estudo desse trabalho, imagem retirado do aplicativo Shinephone. Certamente no dia que o gráfico ilustrado na Figura 4 foi registrado houveram poucas ou nenhuma nuvem sombreando esse sistema. O contorno da curva é a potência instantânea registrada ao longo do dia, já a área abaixo da curva se trata da energia gerada, nessa curva a energia gerada foi de 94,1 kWh.

Observa-se na Figura 5 um gráfico de um dia no qual houve a um sombreamento do sistema por nuvens, se tratando de certo de um dia nublado. É possível confirmar esse fato devido ao comportamento da curva, que abaixa e aumenta a potência quando o sistema está sombreado. A geração diária foi de 75 kWh nesse caso.

Ambas as gerações foram obtidas com a área abaixo da curva, basicamente de forma empírica. Entretanto existem diversos modelos matemáticos implementados em *softwares* que tem a capacidade de prever de forma bastante precisa a média das gerações com base nos bancos de dados de observatórios.

Outra curva bastante característica se trata de quando a potência CC ofertada pelos módulos do sistema é maior que a capacidade de conversão do mesmo, como se por exemplo em um inversor de 5 kW houvesse uma potência de entrada disponível de 6 kW. A potência convertida será constante em 5 kW em todo o momento que a potência oferecida for maior que a capacidade de conversão (MOUNETOU et al., 2014) Essa situação pode ser observada na Figura 6, na qual a capacidade máxima de conversão era de 10 kW.

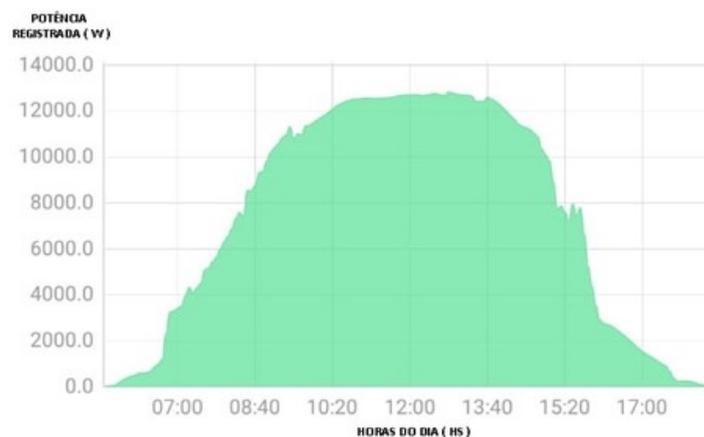


Figura 4 – Gráfico produção de energia.

Fonte: ShinePhone (Growatt New Energy Technology CO , 2022).

## 1.4 Sobrecarga e efeito clipping

Para se compreender o motivo de sobrecarregar o sistema é interessante que se tenha em mente o sistema solar composto de entrada e saída, sendo a entrada a energia proveniente dos módulos e a saída a energia alternada convertida pelo inversor. É caracterizado um sistema com sobrecarga aquele que possui uma potência CC de entrada maior que a capacidade de conversão da saída CA. O nível de sobrecarga (NS) pode ser definido por (1.1) (BOLINGER; WEAVER, 2014).

$$NS = \frac{P_{ccm\acute{a}x}}{Pn_{inv}}, \quad (1.1)$$

em que  $P_{ccm\acute{a}x}$  é a potência CC máxima do inversor dado em  $kWp$  e  $Pn_{inv}$  é a potência nominal CA do inversor dado em  $kW$ .

Haja vista as curvas de dois sistemas retratados nas Figuras 7 e 8, um com a potência de entrada 10% superior a sua potência de saída e o outro em sobrecarga de 40%. O sistema com menor sobrecarga irá acionar ou aproximar da potência máxima somente no horário de pico, já o sistema sobrecarregado acionará saída máxima antes, se mantendo nessa faixa por mais tempo. A área da curva de potência versus tempo durante o dia será maior no sistema com sobrecarga.

As informações presentes no *datasheet* dos módulos são obtidos em condições STC (de inglês *standart test conditions*), condições que não ocorrem sempre no dia a dia (CARR; PRYOR, 2004), junto a isso existem as perdas por temperatura e baixas irradiâncias em alguns períodos do ano e até mesmo do dia, portanto torna-se mais interessante ainda a prática de sobrecarregar o sistema.



Figura 5 – Gráfico produção de energia.

Fonte: ShinePhone (Growatt New Energy Technology CO, 2022).



Figura 6 – Gráfico produção de energia.

Fonte: ShinePhone (Growatt New Energy Technology CO , 2022).

Outro fator chave é a limitação de potência da usina fotovoltaica, que pode ser devido a carga disponibilizada pela concessionária, por exemplo, nas situações que é possível instalar uma determinada potência máxima de inversores, portanto a forma de se obter a máxima geração até mesmo com melhor custo benefício é efetuando a sobrecarga do sistema (KELLER; AFFOLTER, 1995).

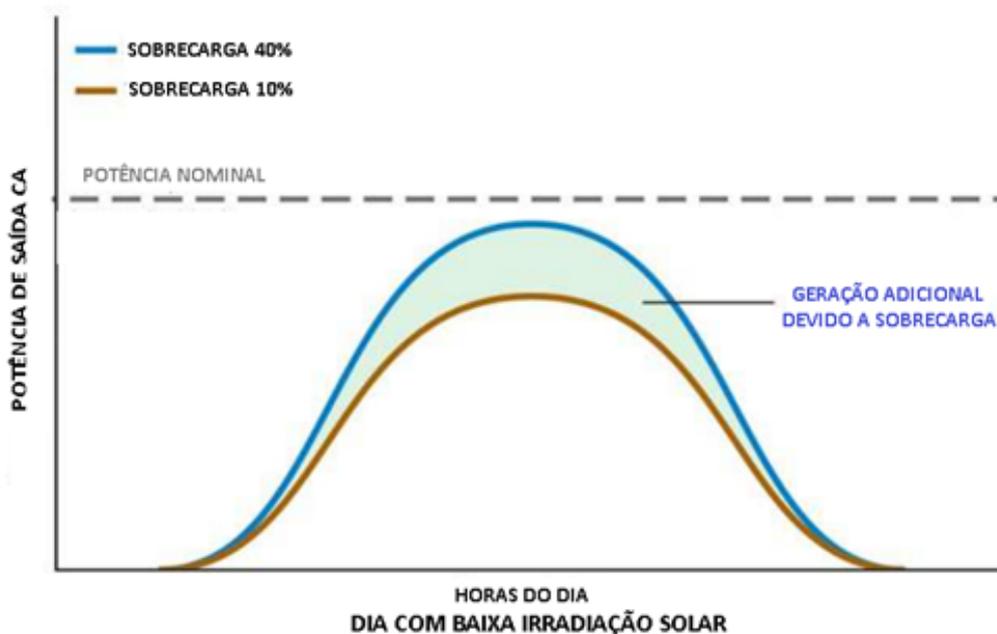


Figura 7 – Geração diária - dia com baixa irradiação solar.

Fonte: Retirado de (MOUNETOU et al., 2014).

A medida que se eleva a sobrecarga, se aumenta o tempo que o sistema permanece em potência máxima, porém também aumenta a perda por efeito *clipping* (GOOD; JOHNSON,

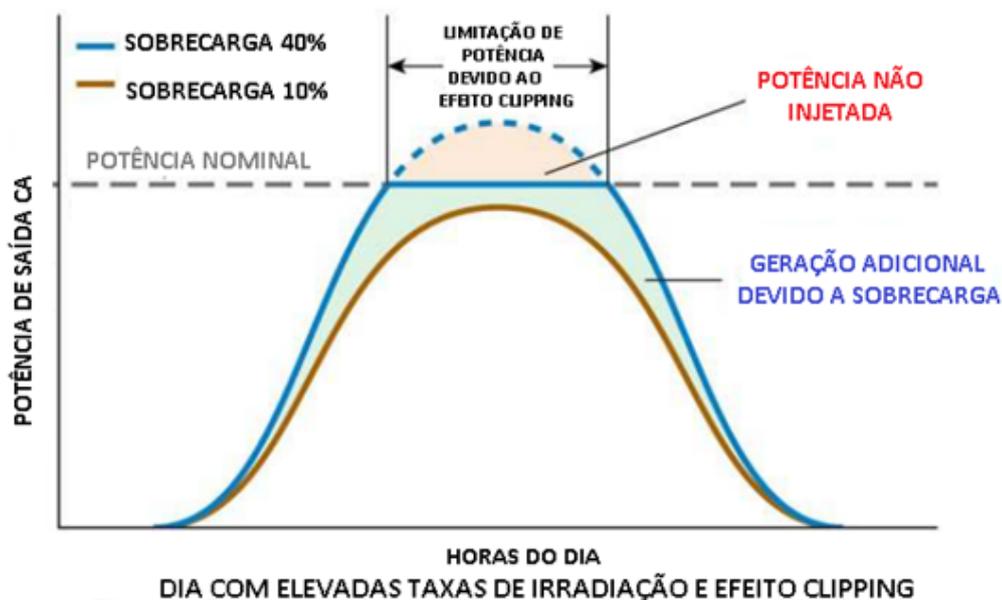


Figura 8 – Geração diária - dia com elevadas taxas de irradiação solar.

Fonte: Retirado de (MOUNETOU et al., 2014).

2016). Perda da potência que estaria disponível acima da potência máxima de conversão. Para regular essa potência e não permitir que o sistema exceda a saída, a *MPPT* do sistema ajusta os valores de tensão do sistema fotovoltaico, ceifando assim aquela área da curva acima da potência máxima. Quanto maior esse ceifamento, maiores serão as perdas, portanto deve-se procurar pelo ponto ótimo desse dimensionamento.

## 1.5 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o impacto que a sobrecarga tem na geração de energia sistema fotovoltaico, comparando usinas com diferentes níveis de sobrecarga e avaliando a relação de custo benefício dessa prática. Os objetivos específicos são:

- Seleção de dezenove projetos fotovoltaicos semelhantes na Zona Da Mata Mineira em funcionamento por mais de um ciclo solar que possuam monitoramento;
- Recolher dados referentes ao monitoramento de usinas em funcionamento na Zona da mata;
- Compilar os dados de geração das usinas e organiza-los eles de forma a comparar o impacto da sobrecarga; e
- Analisar a viabilidade técnica e avaliar os pontos extremos da curva.

- Realizar uma análise financeira acerca do aumento do sistema com diferentes sobrecargas.

## 2 Materiais e Métodos

A metodologia desse trabalho pode ser separada em 4 etapas. Primeiramente os dados foram organizados em tabelas, de forma que ficasse clara a potência de cada sistema, o nível de sobrecarga e a geração anual. Posteriormente os dados foram equalizados de forma que fosse possível avaliar a relação entre a sobrecarga e a geração, observando assim as características da curva da distribuição dos dados. Fez-se o estudo avaliando os melhores e piores resultados obtidos e por fim uma análise financeira.

Para esse trabalho foram selecionados dezenove (19) sistemas fotovoltaicos em funcionamento na zona da mata mineira, sendo que Tabela 1 apresenta os dados de cada uma das usinas. Os dados foram cedidos pelo Engenheiro Vitor Pio, o qual forneceu os projetos e os dados do monitoramento dos dispositivos. Os critérios básicos para a escolha das instalações foram do sistema estar em sobrecarga e que houvesse inclinação com ângulo próximo a latitude, norte entre  $20^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ . Após essa seleção inicial as variáveis consideradas para essa pesquisa foram somente nível de sobrecarga e geração. Dentre as usinas algumas apresentam dois ou mais inversores iguais, porém todos com o mesmo nível de sobrecarga, como é o caso da usina 9, que possui dois equipamentos de 8,2 kW ou da usina 4, que é constituída de 3 equipamentos de 25 kW. A capacidade de conversão do sistema se trata da potência nominal dos inversores, uma vez que esse valor é equivalente a potência de saída máxima dos inversores desse trabalho.

Como todos os inversores são da fabricante austríaca Fronius International GmbH, tais equipamentos podem ser observados na figura 9, a qual é referente a usina 4, os dados foram retirados da plataforma solar.web, na qual é possível acessar individualmente o monitoramento de cada inversor, visualizando a situação instantânea do equipamento, a sua geração de cada dia, mês e ano, além de ser possível alterar parâmetros do equipamento de forma remota. Na Figura 10 estão representados os dados dispostos na plataforma supracitada, essa em questão é referente a usina 11.

Com posse dos dados, esses também foram inseridos no excel, criadas tabelas que continham as seguintes informações, potência instalada de módulos, potência nominal dos inversores, geração anual do sistema, nível de sobrecarga e uma relação entre a geração e a potência instalada. Foram consideradas as gerações de 2020 e 2021 que possuíam um ciclo solar completo, porém para a análise foi considerada a maior geração registrada entre os dois anos, pois assim seria utilizado o melhor desempenho da usina, haja vista que em um ano o proprietário pode ter sido mais cuidadoso com a limpeza dos módulos, por exemplo. A Tabela 2 apresenta os dados obtidos. Nos anos que não se obteve a geração completa os dados não foram inseridos.

Tabela 1 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas.

USINA FV	POTÊNCIA MODULOS (W)	QUANTIDADE DE MÓDULOS	CAPACIDADE DE CONVERSÃO (kW)
1	335	21	5
2	330	104	25
3	335	100	25
4	330	300	(3*25) 75
5	330	100	25
6	330	100	25
7	335	97	25
8	335	95	25
9	340	60	(2*8,2) 16,4
10	335	90	(3*8,2) 24,6
11	325	30	8,2
12	390	76	25
13	390	72	25
14	330	50	15
15	330	50	15
16	330	50	15
17	330	40	(2*6) 12
18	370	25	8,2
19	345	120	(2*20) 40

Tabela 2 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas.

USINA FV	PRODUÇÃO 2020 (kWh)	PRODUÇÃO 2021 (kWh)
1	8230	7750
2	N/A	43640
3	N/A	42550
4	N/A	129310
5	N/A	43250
6	N/A	43470
7	N/A	42970
8	N/A	41750
9	27600	27430
10	39500	36390
11	13370	12830
12	N/A	42440
13	N/A	39260
14	22300	18810
15	22090	19590
16	N/A	22870
17	17710	17240
18	11760	11500
19	55220	54480



Figura 9 – Foto da Usina 4.

Fonte: Acervo Engenheiro Victor Pio.

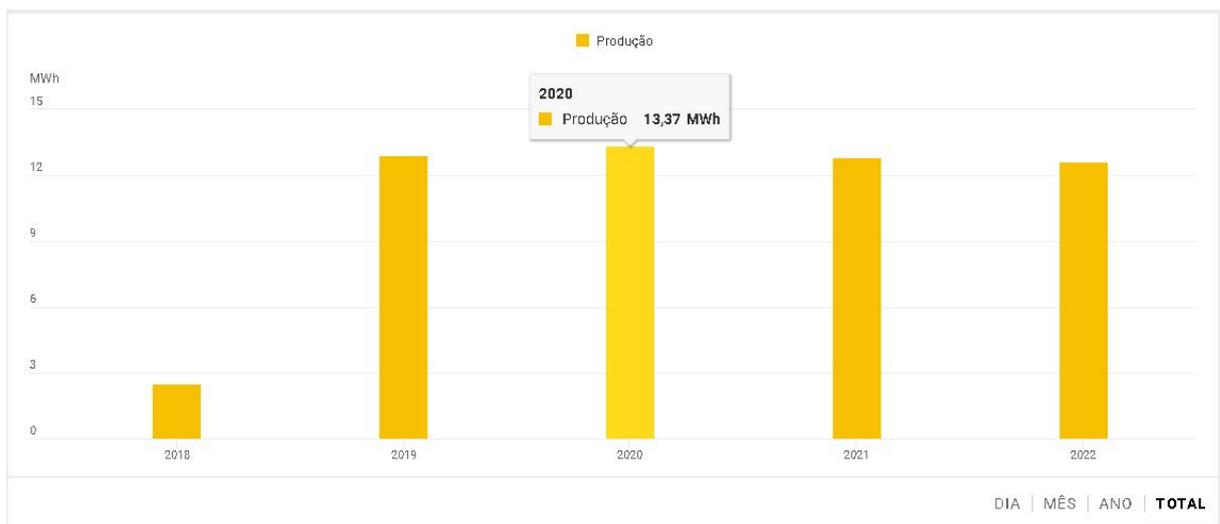


Figura 10 – Gráfico Produção Anual de Energia.

Fonte: Retirado de Solar Web.

Com intuito de realizar a análise os valores anuais de geração foram divididos pela potência instalada de módulos, a relação representa quanto cada kWp gerou de energia em kWh anualmente, (KHARAIT et al., 2020), sendo  $\frac{kWh}{kWp}$ , com o kWh sendo o maior registrado entre 2020 e 2021. Com esses dados foi possível traçar gráficos no qual era comparada a relação Geração/Potência com o nível de sobrecarga. Os pontos também foram interpolados com a utilização do *software* estatístico JMP 17, as curvas foram geradas utilizando o *software* *spyder*.

Além disso, juntamente das equações das interpolações dos dados fez-se também uma análise acerca da relação custo benefício da sobrecarga, uma vez que as equações regem a relação entre o quanto de potência adicionada ao sistema devolve de geração

anualmente. Para essa comparação foi obtida junto a distribuidora *SkySolar* o custo médio em  $kWp$  dos módulos mais estrutura para telhado metálico, pois seria o básico para realizar o aumento do sistema fotovoltaico. Haja vista que esse trabalho foi desenvolvido em dezembro de 2022, o custo médio por  $kWp$  adotado foi de R\$ 2.000,00. O custo médio do  $kWh$  para consumidores grupo B e o preço do  $kWh$  se encontram na faixa de R\$1.00, portanto esse será o valor adotado nesse trabalho.

### 3 Resultados e Discussão

Com propósito de realizar o estudo acerca da sobrecarga dos sistemas, será avaliada nessa etapa do trabalho a análise que mescla os dados da maior geração dos sistemas entre 2020 e 2021, o nível de sobrecarga na qual cada sistema foi projetado para funcionar, a relação traçada entre geração e sobrecarga.

Devido a base de dados possuir sistemas de proporções distintas, sendo o menor sistema com 5 kW e o maior com 75 kW os dados foram equalizados em geração por potência instalados de módulos, pela relação  $\frac{kWh}{kWp}$  já descrita nesse trabalho . Para fins de tornar a visualização mais simples a relação foi dividida por 1000.

Tabela 3 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas.

USINA	NÍVEL DE SOBECARGA (%)	RELAÇÃO [(kWh/kWp)/1000]
1	40,70	1,170
2	37,28	1,272
3	34,00	1,270
4	32,00	1,306
5	32,00	1,311
6	32,00	1,317
7	29,98	1,322
8	25,96	1,326
9	24,39	1,353
10	22,56	1,310
11	18,90	1,371
12	18,56	1,432
13	12,32	1,398
14	10,00	1,352
15	10,00	1,339
16	10,00	1,386
17	10,00	1,342
18	3,66	1,384
19	3,50	1,334

Na Tabela 3 é possível observar que as linhas foram organizadas de forma decrescente de acordo com o nível de sobrecarga. A média de sobrecarga dos dados em questão é de 21,46%, sendo a maior sobrecarga de 40,70% e a menor de 3,5%.

É possível observar na Figura 11 um gráfico que representa a distribuição dos pontos dispostos na Tabela 3, em que a sobrecarga está no eixo das abcissas e a relação Geração/Potência no eixo das ordenadas.

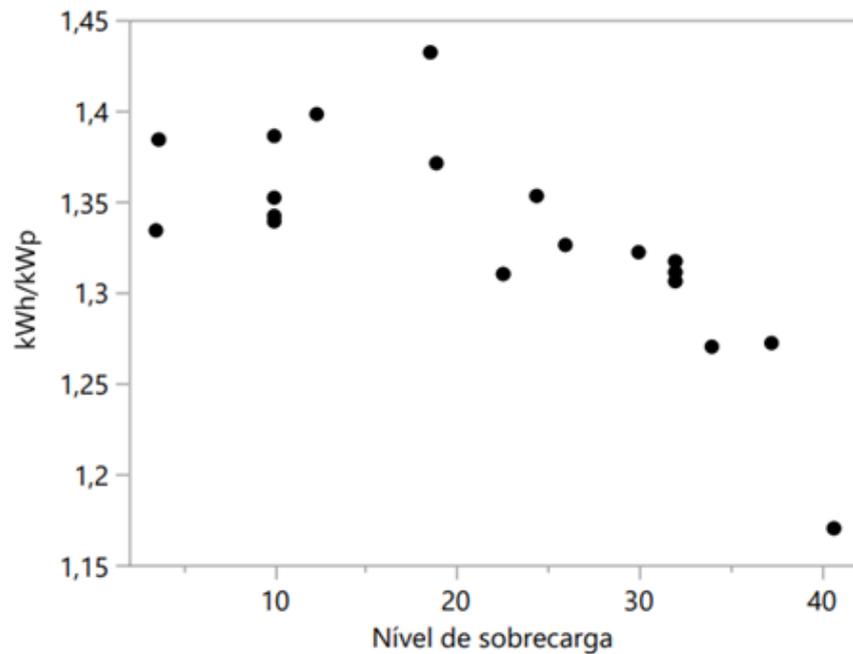


Figura 11 – Distribuição dos Pontos de Análise.

Com base na Figura 11 e na Tabela 3 é possível observar que a relação entre geração e potência tende a abaixar a medida que se aumenta o nível de sobrecarga.

Incrementando a análise, foi feita a interpolação dos pontos utilizando diferentes modelos matemáticos com a utilização do *software* JMP. A primeira interpolação foi para uma reta, uma equação de primeiro grau dada por (3.1). O resultado obtido é apresentado na Figura 12.

$$y = a(x) + b \quad (3.1)$$

Obteve-se  $a = -0,00346$  e  $b = 1,405$ . Nessa primeira observação fica claro que se trata de uma relação de tendência inversa, uma vez que se aumenta a sobrecarga se diminui a relação, claramente retratado pela reta com coeficiente angular negativo. Mesmo que essa aproximação indique a tendência da relação, ela sozinha não é suficiente para retratar o real comportamento da curva.

Outros dois modelos matemáticos de interpolação foram executados. Aproximação por polinômio de quinto grau (3.2) e por equação exponencial, ilustrados na Figura 13.

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5, \quad (3.2)$$

em que  $a = 1,537$ ,  $b = -0,08658$ ,  $c = 0,01247$ ,  $d = -0,00072$ ,  $e = 0,00001$  e  $f = -1,68e^{-7}$ .

$$y = a + be^{(c*x)}, \quad (3.3)$$

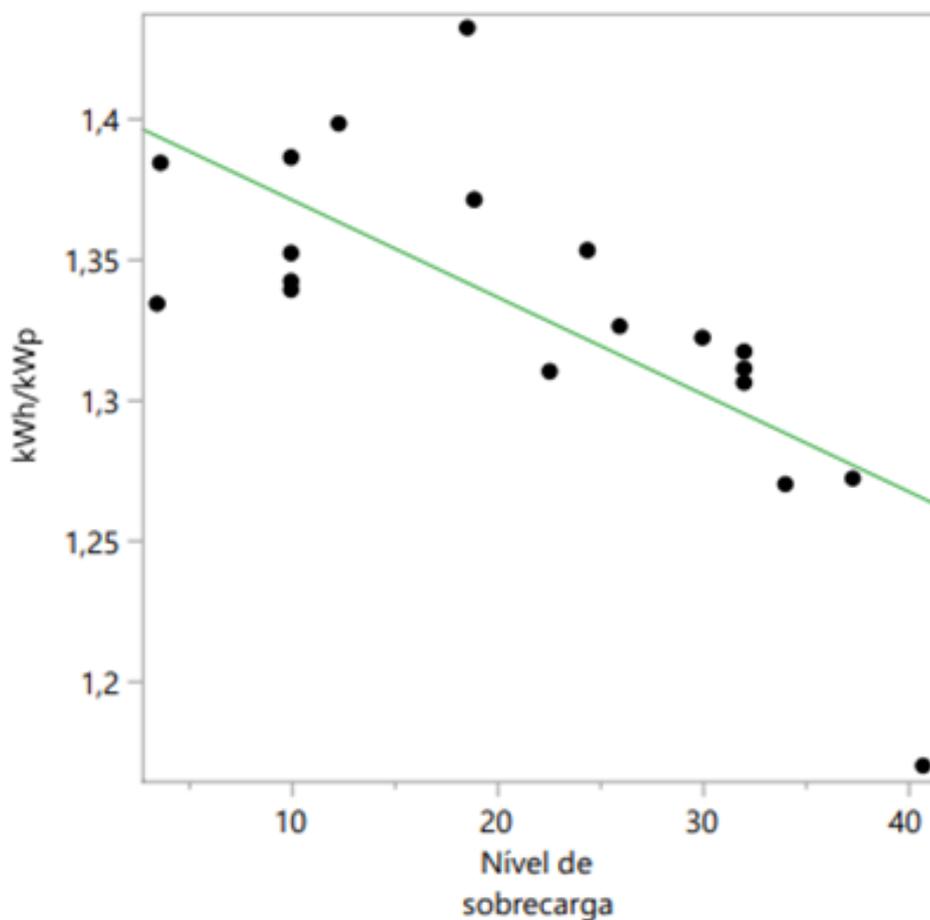


Figura 12 – Interpolação Linear.

Em que  $a = 1,36906$ ,  $b = -0,000781$  e  $c = 0,13532$ .

Para avaliar o quanto a aproximação é fidedigna aos pontos foi utilizado o erro quadrático médio (EQM) e o coeficiente de determinação (CD). EQM se trata da média quadrada dos erros entre os pontos e curva aproximada, já o CD é uma medida estatística que varia entre 0 e 1, que pode ser expressa em porcentagem, essa medida indica o quanto que um modelo matemático se ajusta a amostra de dados. Das interpolações realizadas obteve-se:

Tabela 4 – Dados estatísticos.

INTERPOLAÇÃO	EQM	CD
LINEAR	0,00167	0,51
EXPONENCIAL	0,00081	0,77
POLINIMIAL	0,00070	0,84

Os dados estatísticos apresentados na Tabela 4 expressam que para a distribuição dos dados desse trabalho a aproximação com maior erro e menor grau de fidelidade ao modelo foi o linear. Já a aproximação polinomial apresentou os maiores índices, porém com variações da concavidade da curva, fato que não é consistente. Com os índices relativamente

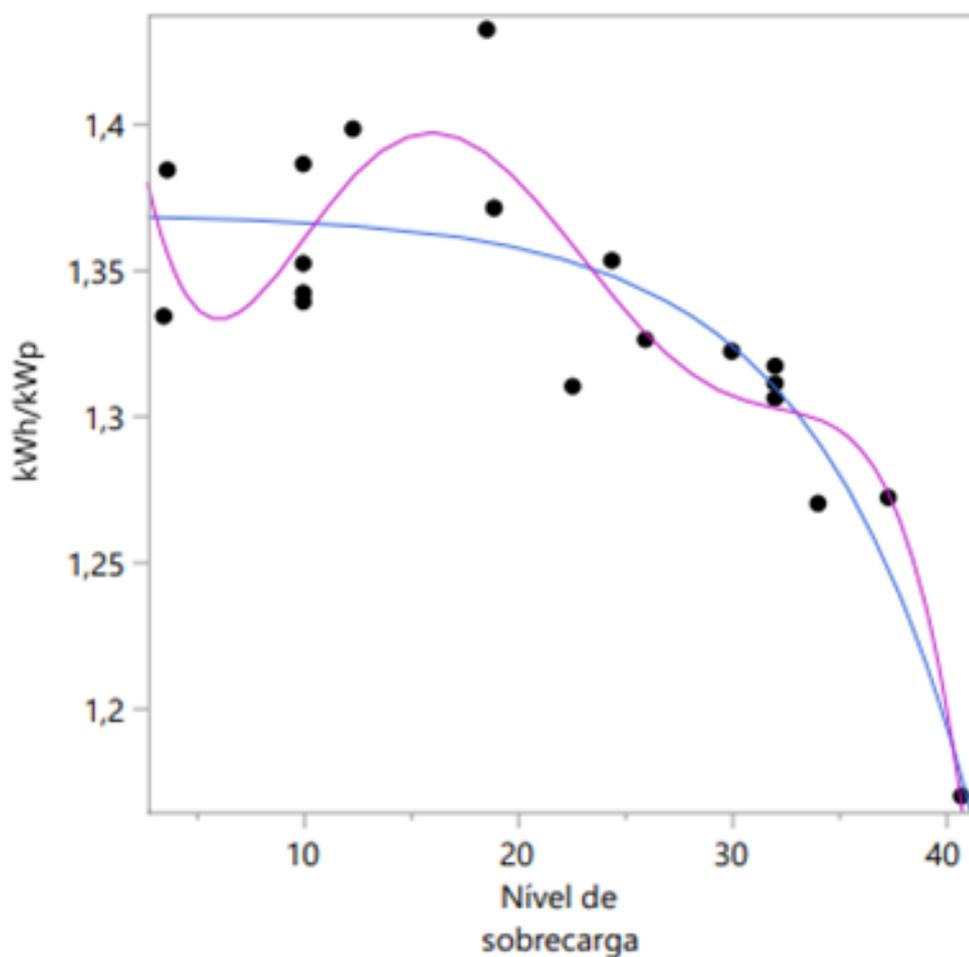


Figura 13 – Interpolações Exponencial e Polinomial.

próximos ao melhor resultado obtido, CD de 77%, a aproximação exponencial apresenta uma curva suave, portanto essa curva foi a escolhida para se obter os resultados desse trabalho.

Indubitavelmente o joelho da curva exponencial se encontra entre 25% e 35%, pois antes desse intervalo a curva tem um comportamento aproximadamente linear, o que é de se esperar pois quanto menor a sobrecarga menor as perdas por *clipping*. Após o intervalo do joelho a curva possui um comportamento de queda abrupta, pois as perdas por *clipping* aumentam diretamente com a sobrecarga.

Remodelando a equação exponencial (3.3) foi possível traçar uma relação entre sobrecarga, potência e geração, (3.5). Essa relação foi obtida com a substituição dos valores encontrados na interpolação exponencial, (3.4). Observa-se na Figura 14 o gráfico 3D obtido com essa análise, isso ocorre haja vista que se trata de uma função com duas variáveis dependentes.

Sendo  $y = (\text{kWh/kWp})/1000$ .

$$(kWh/kWp)/1000 = (1,369 - 781\mu e^{(135,3mX)}) \quad (3.4)$$

Seja a equação obtida de geração anual(GA)[MWh].

$$GA = (1,369 - 781\mu e^{(135,3mX)})Y, \quad (3.5)$$

em que X o nível de sobrecarga e Y a potência em kWp.

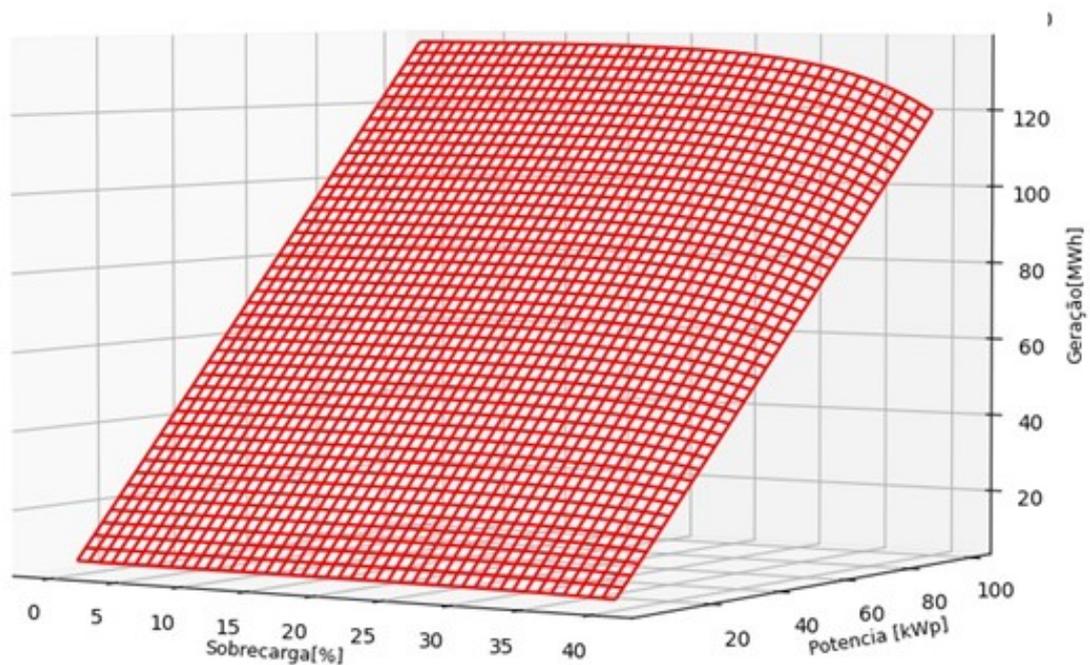


Figura 14 – Gráfico Sobrecarga x Potência x Geração.

Ao analisar a Figura 14 observar-se espacialmente as relações entre sobrecarga, potência e geração. Nota-se que sistemas com a mesma potência instalada terão uma geração maior, menor ou igual dependendo do nível de sobrecarga. Na Figura 14 fica claro que para a mesma potência a geração diminui assim que se aumenta a sobrecarga, pois as perdas por efeito *clipping* serão maiores. A queda na curva fica visível para as maiores potências, porém o impacto da sobrecarga atinge proporcionalmente sistemas de qualquer capacidade, como pode ser observado na Figura 15, traçada utilizando sistemas menores.

A melhor relação foi 1,432 encontrada na usina 12, com 18,56% de sobrecarga. Ao analisar as Figuras 12 e 13 é possível observar esse ponto bem acima da curva, esse fato se deve a esse nível de sobrecarga estar antes do joelho de queda da curva e ainda é prudente afirmar que esse sistema decerto possui uma regular limpeza dos módulos, o que permitiu performar acima da curva.

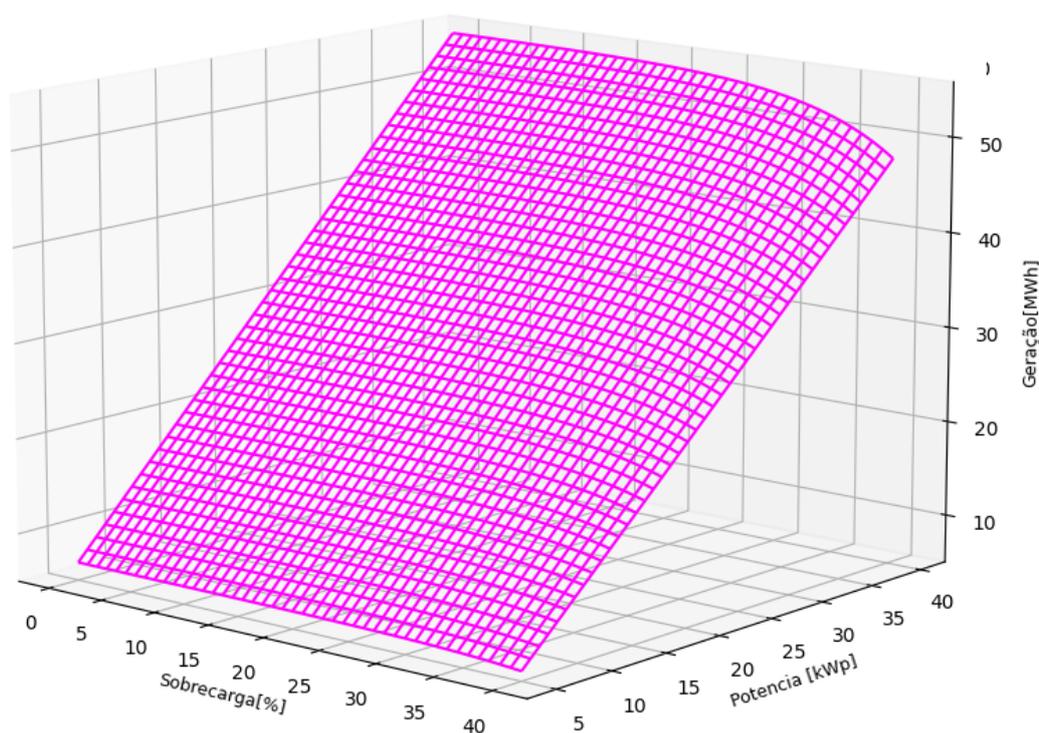


Figura 15 – Gráfico Sobrecarga x Potência x Geração.

Com uma diferença de 22,39% abaixo do melhor resultado, a pior relação, 1,170, encontrada na usina 1 é explicada por seu valor de sobrecarga já estar a frente do joelho da curva. Analisando a diferença entre o pior resultado e o penúltimo, em um aumento de 3,42% de sobrecarga houve uma queda de 8,71% na relação, fato que explicita o comportamento exponencial da curva, na qual os pontos depois do joelho estão sujeitos a uma queda abrupta.

Com intuito de realizar uma análise financeira sobre os dados desse trabalho que foram encontradas com base na interpolação exponencial as gerações de um sistema com capacidade de conversão de 60kW, com diferentes níveis de sobrecarga. Nesse sentido é possível observar na tabela 5 o impacto que 300 Wp de aumento no sistema entrega a mais em energia para cada nível de sobrecarga, como se fosse realizado o aumento de um módulo de 300W em cada nível de sobrecarga e avaliado quanto esse módulo entregaria de geração, pois 0,5% de sobrecarga em um sistema de 60 kW é igual a 300 Wp.

Logo definido os valores do  $kWp$  e do  $kWh$ , tem-se que o aumento de 300Wp teria um custo de R\$600.00. Portanto para os níveis de 5% e 10% há uma geração anual a mais de 0,4MWh, portanto nesse nível o retorno dessa sobrecarga viria com 1.5 anos. Para os níveis superiores essa sobrecarga tem um retorno maior, 1.57 anos para 15% e 1.76 anos para 20%. Para os próximos níveis estudados o retorno já passa a ser acima de 2 anos, sendo 2.14 anos para 25% e 4 anos para 30%. Conseqüentemente é possível

Tabela 5 – Dados das usinas fotovoltaicas estudadas.

SOBRECARGA (%)	GERAÇÃO (MWh ano)
5	86,15
5,5	86,55
10	90,15
10,5	90,55
15	94,05
15,5	94,43
20	97,73
20,5	98,07
25	100,96
25,5	101,24
30	103,28
30,5	103,43
33	103,83
33,5	103,89

observar que o aumento do sistema apresenta diferentes tempos de retorno, de acordo com a sobrecarga pré existente, para níveis acima de 30% o tempo de retorno aumenta de forma abrupta. Agora para o incremento de 300Wp em uma usina com nível de sobrecarga de 33% esse aumento apresenta um retorno em 10 anos, contudo para valores maiores não foram abordados uma vez que a modelagem utilizada indica que o sistema já se encontra em fase de saturação nos níveis acima desses apresentados.

## 4 Conclusão

Constata-se por meio deste trabalho que a medida que se aumenta o nível de sobrecarga existe uma maior potência ceifada nos momentos em que ocorre o efeito *clipping*, fato esse que foi comprovado pela curva exponencial encontrada no gráfico da Figura 13, a qual apresenta um comportamento linear, em seguida um joelho e sua queda. Além disso, tem-se que quanto maior a sobrecarga, maior é a área ceifada. Na Figura 14 foi traçada a área compreendida entre os eixos geração, potência e sobrecarga para a região da Zona Da Mata Mineira, na qual é possível observar que o joelho da curva se encontra na região da sobrecarga de 30%, isso significa que se trata de um nível de sobrecarga interessante no qual a relação  $(kWh/kWp)$  x *sobrecarga* ainda está próxima a zona linear dessa curva.

Ademais, observou-se pontos próximos, abaixo e acima da curva. Contudo, tem-se que todos os sistemas são relativamente novos, possuem um tempo de funcionamento menor que cinco anos e estão orientados ao norte com inclinações muito próximas. Dessa forma é prudente afirmar que um diferencial entre esses pontos se trata da limpeza dos módulos. Acredita-se que com a limpeza executada cuidadosamente, seria encontrada uma geração maior na média dos dados, o que elevaria o valor da relação, uma vez que a potência é fixa, podendo assim até mesmo encontrar o joelho da curva em um valor maior que 30%.

Para fins de investimento foi possível constatar que a sobrecarga é extremamente interessante até níveis próximos a 20%, uma vez que o *payback* encontrado é inferior a dois anos. Contudo, a sobrecarga do sistema entre 25% e 30% continua sendo viável, haja vista que para o investimento em 300Wp no nível de 30% é encontrado o retorno em 4 anos, valor esse que é uma média de retorno comumente praticada no mercado para um sistema fotovoltaico completo que inclui equipamento, projeto e execução. Porém para valores acima de 33% já se torna interessante alocar o valor em outros investimentos, pois o retorno começa a ser superior a dez anos.

Por fim, denota-se que a sobrecarga do sistema fotovoltaico é uma estratégia que possibilita extrair uma maior geração de energia do sistema. Entretanto por meio do estudo das usinas desse trabalho foi possível observar que não necessariamente toda sobrecarga é convertida em potência.

# Referências

- ABSOLAR, S. *Associação Brasileira de Energia Fotovoltaica*. 2021. Url <https://www.absolar.org.br/>. Citado na página 10.
- BOLINGER, M.; WEAVER, S. Utility-scale solar 2013: An empirical analysis of project cost, performance, and pricing trends in the united states. 2014. Citado na página 15.
- CARR, A.; PRYOR, T. A comparison of the performance of different pv module types in temperate climates. *Solar energy*, Elsevier, v. 76, n. 1-3, p. 285–294, 2004. Citado na página 15.
- ENERGIA, S. Ministério de Minas e. *Relatório Síntese 2022*. 2021. Disponível em: url [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2022\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf). Acesso em: 15 de novembro de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- EPE, S. *Fontes de Energia*. 2021. Disponível em: url <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: 10 de novembro de 2022. Citado na página 10.
- GOOD, J.; JOHNSON, J. X. Impact of inverter loading ratio on solar photovoltaic system performance. *Applied Energy*, Elsevier, v. 177, p. 475–486, 2016. Citado na página 17.
- Growatt New Energy Technology CO . *ShinePhone*. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 16.
- HERSCH, P.; ZWEIBEL, K. *Basic photovoltaic principles and methods*. [S.l.], 1982. Citado na página 12.
- KELLER, L.; AFFOLTER, P. Optimizing the panel area of a photovoltaic system in relation to the static inverter—practical results. *Solar Energy*, Elsevier, v. 55, n. 1, p. 1–7, 1995. Citado na página 16.
- KHARAIT, R. et al. Energy yield and clipping loss corrections for hourly inputs in climates with solar variability. In: IEEE. *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. [S.l.], 2020. p. 1330–1334. Citado na página 21.
- MOUNETOU, R. et al. Oversizing array-to-inverter (dc-ac) ratio: What are the criteria and how to define the optimum? In: *Proc. Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.* [S.l.: s.n.], 2014. p. 2813–2821. Citado 3 vezes nas páginas 14, 16 e 17.
- SOLAR, S. P. *Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar*. 2021. Disponível em: url <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 15 de novembro de 2022. Citado na página 11.
- VILLALVA, M.; GAZOLI, J. Conceitos básicos. *Energia Solar Fotovoltaica-Conceitos e Aplicações-Sistemas Isolados e Conectados à Rede. 1st edn. ERICA, São Paulo*, 2012. Citado na página 12.