

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Caio Vinícius Penna Regis

Análise de desempenho energético e econômico de um sistema fotovoltaico em diferentes regiões climáticas brasileiras, considerando sistemas fixos e com rastreadores solares.

Araranguá
2022

Caio Vinícius Penna Regis

Análise de desempenho energético e econômico de um sistema fotovoltaico em diferentes regiões climáticas brasileiras, considerando sistemas fixos e com rastreadores solares.

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Energia.
Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Araranguá

2022

Caio Vinícius Penna Regis

Análise de desempenho energético e econômico de um sistema fotovoltaico em diferentes regiões climáticas brasileiras, considerando sistemas fixos e com rastreadores solares.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (Orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Leonardo Elizeire Bremermann
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof. Dr. Katia Cilene Rodrigues Madruga
Coordenador do Curso

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli
Orientador

Caio Vinícius Penna Regis

Autor

Araranguá, 12 de dezembro de 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Regis, Caio Vinícius Penna

Análise de desempenho energético e econômico de um sistema fotovoltaico em diferentes regiões climáticas brasileiras, considerando sistemas fixos e com rastreadores solares / Caio Vinícius Penna Regis ; orientador, Giuliano Arns Rampinelli, 2022.

47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Sistema solar fotovoltaico. 3. Rastreador solar. 4. Irradiação solar. 5. Análise econômica. I. Arns Rampinelli, Giuliano. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

RESUMO

Em um contexto de aumento da demanda energética e a busca por fontes sustentáveis, a energia solar fotovoltaica aparece como um expoente na geração de energia elétrica, principalmente pelo baixo custo e rapidez na construção. Além disso, é constante a busca para tornar as usinas fotovoltaicas mais eficientes, capazes de produzir mais energia com o mesmo recurso natural, que é o Sol. O objetivo do presente trabalho é analisar a produtividade de um sistema solar fotovoltaico de referência com estrutura fixa, e comparar a performance deste sistema de referência incluindo a tecnologia de rastreador solar de 1 e 2 eixos. Com o auxílio da ferramenta computacional *System Advisor Model* (SAM), para diferentes regiões e condições climáticas do Brasil, a fim de correlacionar o aumento de produtividade com a componente direta da radiação solar. Foram analisados os aumentos de produtividade entre a utilização de um sistema de 1 eixo em relação ao fixo, 2 eixos em relação a 1 eixo, e por último 2 eixos em relação ao fixo. Nas análises, abordaram-se comparações referentes as quatro estações do ano, primavera, verão, outono e inverno, e também uma análise anual. Ademais, foi feita uma análise econômica comparando o sistema fixo com o de 1 eixo, a fim de apresentar os principais parâmetros econômicos, como o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR), o tempo de retorno de investimento e o custo nivelado de energia (LCOE), para ambos os investimentos. Os resultados obtidos indicam que há uma correlação entre o aumento de produtividade e a radiação direta, ademais os locais onde foram obtidos os maiores aumentos de produtividade do sistema foram os locais com maiores componentes direta da radiação solar. Comparando financeiramente os dois sistemas já citados, foi concluído que o sistema fixo produz menos energia para uma mesma potência instalada, porém com um custo inicial menor, manutenção mais simples e barata, e um custo de energia também menor, porém, o retorno financeiro líquido total da usina fotovoltaica em 25 anos foi mais vantajoso para o sistema com rastreador de 1 eixo.

Palavras-chave: Eficiência energética, energia solar fotovoltaica, irradiação solar, rastreador solar, produtividade do sistema, viabilidade econômica.

ABSTRACT

In a context of increasing energy demand and the search for sustainable sources, photovoltaic solar energy appears as an exponent in the generation of electricity, mainly due to its low cost and speed of construction. Furthermore, there is a constant search to make photovoltaic plants more efficient, capable of producing more energy with the same natural resource, which is the Sun. The objective of the present work is to analyze the productivity of a reference photovoltaic solar system with fixed structure, and to compare the performance of this reference system including the 1 and 2 axis solar tracker technology. Using the SAM computational tool, for different regions and climatic conditions in Brazil, in order to correlate the increase in productivity with the direct component of solar radiation. Productivity increases were analyzed between the use of a system with 1 axis in relation to the fixed, 2 axes in relation to 1 axis, and finally 2 axes in relation to the fixed. In the analyses, comparisons were made with reference to the four seasons of the year, spring, summer, autumn and winter, and also an annual analysis. In addition, an economic analysis was performed comparing the fixed with the 1 axis system, in order to get the main economic parameters, such as NPV, IRR, financial return and LCOE, for both investments. The results obtained indicate that there is a correlation between the increase in productivity and direct radiation, moreover, the places where the greatest increases in productivity of the system were obtained were the places with the highest direct components of solar radiation. Financially comparing the two systems previously mentioned, it was concluded that the fixed system produces less energy for the same power system, but with a lower initial cost, simpler and cheaper maintenance, and a lower cost of energy, however, the net financial return total photovoltaic plant in 25 years was more advantageous for the 1 axis tracker system.

Keywords: energy efficiency; photovoltaic solar energy; solar irradiation, solar tracker, system productivity, economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Infográfico ABSOLAR 2022.	10
Figura 2 - Componentes da irradiância global.....	12
Figura 3 - Perdas da radiação solar incidente atmosfera.	13
Figura 4 - Soma da irradiação global horizontal diária.	14
Figura 5 - Soma da irradiação direta normal diária.	15
Figura 6 - Ângulos da posição do Sol em relação à superfície do gerador.	16
Figura 7 - Sistema de grande porte.....	17
Figura 8 - Ângulo de incidência solar.	18
Figura 9 – Desenho de um sistema fixo.	19
Figura 10 – Desenho de um SFV com rastreador solar de 1 eixo horizontal.	19
Figura 11 - Desenho de um SFV com rastreador solar de 1 eixo azimutal.	20
Figura 12 - Desenho de um SFV com rastreador solar de 2 eixos.....	20
Figura 13 - Diagrama unifilar do sistema solar fotovoltaico de referência	26
Figura 14 – Aumento de produtividade entre 1 eixo e fixo nas estações do ano.	30
Figura 15 - Aumento de produtividade entre 1 eixo e fixo anual.	30
Figura 16 – Aumento de produtividade entre 1 e 2 eixos nas estações do ano.	32
Figura 17 - Aumento de produtividade entre 1 e 2 eixos anual.	32
Figura 18 - Aumento de produtividade entre 1 e 2 eixos nas estações do ano com a latitude.....	34
Figura 19 - Aumento de produtividade entre 2 eixos e fixo anual com a latitude.	34
Figura 20 - Aumento de produtividade entre 2 eixos e fixo nas estações do ano.	36
Figura 21 - Aumento de produtividade entre 2 eixos e fixo anual.....	36
Figura 22 - Fluxo de caixa para a usina em Belo Horizonte.....	42
Figura 23 - Fluxo de caixa para a usina em Curitiba.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Listagem das cidades brasileiras simuladas.	22
Tabela 2 - Dados técnicos do módulo fotovoltaico.	24
Tabela 3 - Dados técnicos do inversor fotovoltaico.	24
Tabela 4 - Características do sistema fixo.	24
Tabela 5 - Características do sistema de 1 eixo horizontal.	25
Tabela 6 - Características do sistema de 2 eixos.	25
Tabela 7 - Perdas do sistema solar fotovoltaico.	25
Tabela 8 – Comparação anual de produtividade entre rastreador fixo e de 1 eixo. ...	31
Tabela 9 - Comparação anual de produtividade entre rastreador de 1 e 2 eixos.	33
Tabela 10 - Comparação anual de produtividade entre rastreador de 1 e 2 eixos com a latitude.	35
Tabela 11 - Comparação anual de produtividade entre rastreador fixo e de 2 eixos.	37
Tabela 12 – Médias anuais de crescimento de produtividade.	37
Tabela 13 - Valor presente líquido das usinas fotovoltaicas.	38
Tabela 14 - Taxa interna de retorno das usinas fotovoltaicas.	39
Tabela 15 - Tempo de retorno do investimento das usinas fotovoltaicas.	40
Tabela 16 - LCOE das usinas fotovoltaicas.	41

SUMÁRIO

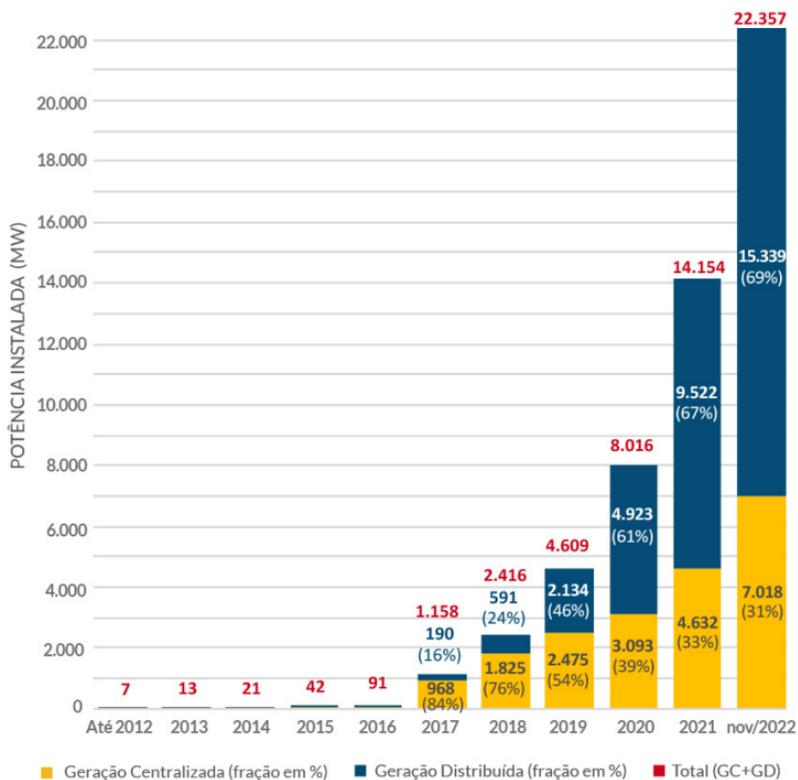
1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO GERAL	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	RADIAÇÃO SOLAR	12
2.2	ÂNGULOS SOLARES.....	15
2.3	USINAS FOTOVOLTAICAS (UFV)	16
2.4	RASTREAMENTO SOLAR	17
2.4.1	Sistema Fixo	18
2.4.2	Sistema de 1 eixo horizontal	19
2.4.3	Sistema de 1 eixo azimutal	20
2.4.4	Sistema de 2 eixos	20
2.5	ESTADO DA ARTE.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	<i>SOFTWARE SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL)</i>	22
3.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO DE REFERÊNCIA	23
3.3	DADOS DOS RASTREADORES SOLARES	24
3.4	PERDAS	25
3.5	DADOS FINANCEIROS.....	26
3.6	ÍNDICES DE MÉRITO.....	28
3.6.1	Energético	28
3.6.2	Econômico	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	DESEMPENHO ENERGÉTICO	29
4.2	ANÁLISE ECONÔMICA.....	38
5	CONCLUSÕES	44
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da economia brasileira exige uma maior demanda de energia elétrica e, atrelado a um desenvolvimento sustentável, a busca por fontes de energias renováveis só aumenta. A utilização da energia solar para contribuir com possíveis complementariedades na matriz energética é relevante, pelo motivo de que a principal fonte de energia renovável no Brasil é a hidrelétrica, principalmente em períodos de seca e por serem distantes dos consumidores, nessa perspectiva, possibilitando uma maior complementação e diversificação do setor elétrico brasileiro (Atlas Brasileiro, 2017).

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), a energia solar do final de 2020 para o final de 2021 cresceu 65%, ultrapassando 13 GW de potência instalada. Dados atualizados de outubro de 2022, indica que já foram alcançados mais de 21 GW instalados, conforme infográfico da Figura 1.

Figura 1 - Infográfico ABSOLAR 2022.



Fonte: ABSOLAR, 2022.

Além disso, a modernização do setor exige cada vez mais o aumento da eficiência energética. Atualmente existem inúmeras estratégias para isso, e uma delas é a utilização de um sistema de rastreamento solar.

Silva e Rampinelli a partir de modelagens e de simulações via software SAM, obtiveram conclusões que um aumento de geração de energia elétrica está correlacionado com a componente direta da radiação solar, quando se compara um sistema de rastreador solar de 2 eixos com o fixo (SILVA; RAMPINELLI, 2016).

1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como um objetivo geral analisar o desempenho energético e econômico de um sistema fotovoltaico de referência com diferentes tipos de rastreadores e sem rastreador solar, considerando diferentes locais do Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Seguindo o objetivo geral descrito anteriormente, segue os objetivos específicos do trabalho:

- Quantificar o aumento de produtividade do sistema solar em relação à disponibilidade do recurso solar. Dessa forma, correlacionando o acréscimo de produtividade com a componente direta da radiação solar, sendo possível então verificar em quais locais o rastreador solar desempenha melhor geração de energia elétrica e qual a produtividade de cada tipo de rastreador solar;
- Analisar o VPL, retorno financeiro, TIR e LCOE dos sistemas com e sem rastreador solar, para identificar o risco, rentabilidade e viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos.

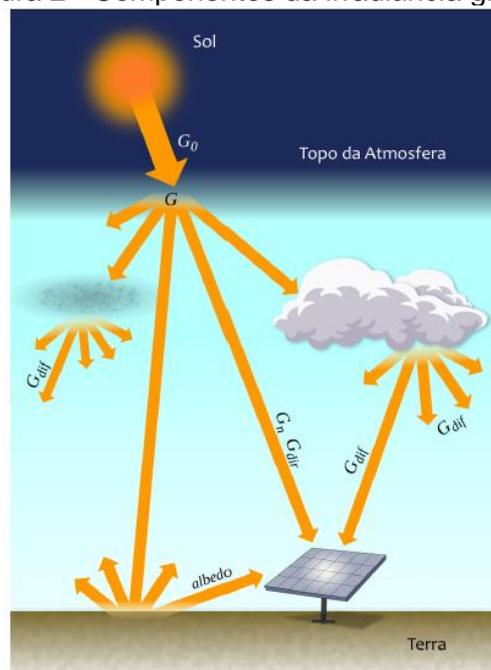
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentadas as referências bibliográficas do trabalho, bem como conceitos importantes para entendimento do trabalho e conclusão.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar, ou irradiância solar, é a taxa de energia que é proveniente do sol e é medida pela seção perpendicular ao sentido dos raios solares em W/m^2 . Os raios que atingem o topo da atmosfera transmitem uma taxa de energia chamada irradiância terrestre (G_0). Uma parcela dessa energia, passa através da atmosfera terrestre e atinge perpendicularmente uma superfície, chamada de Irradiância direta normal (G_n). Tem-se a irradiância difusa horizontal (G_{dif}), que é a taxa de energia que é espalhada pela atmosfera e alcança uma superfície horizontal. A taxa refere-se a irradiância direta horizontal (G_{dir}) na qual atinge uma superfície horizontal, é calculada pelo produto entre a (G_n) e o cosseno do ângulo zenital (INPE, 2017). O albedo é uma característica de determinada superfície e é calculado pela razão dos raios refletidos pelo incidente. A nomenclatura foi elaborada por Duffie e Beckman (2013). A Figura 2 mostra as componentes solar.

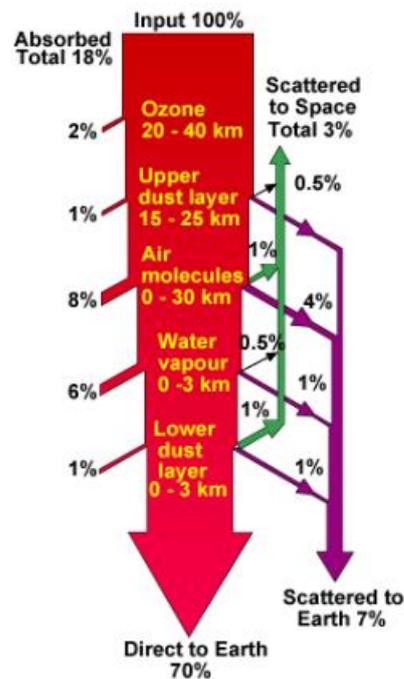
Figura 2 - Componentes da irradiância global.



Fonte: INPE, 2017.

A energia incidente que atinge a superfície terrestre depende de diversos fatores, entre eles os efeitos da atmosfera relacionado à absorção e reflexão, a latitude da região, dia e hora da medição, e por último, fatores locais, como poluição, nuvens e níveis de vapor de água. A Figura 3, apresenta a participação de cada fator mencionado no espalhamento da radiação até a superfície (CORTEZ, 2013).

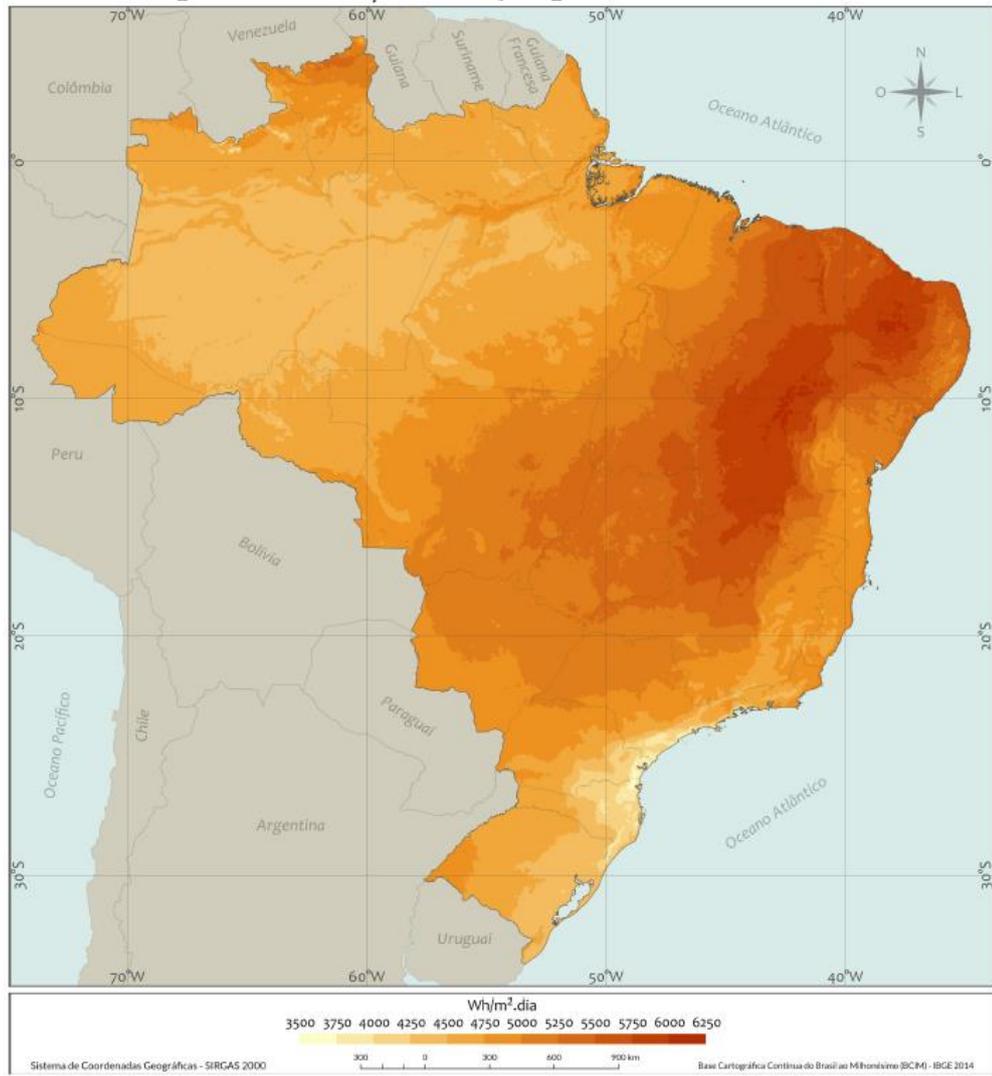
Figura 3 - Perdas da radiação solar incidente atmosfera.



Fonte: CORTEZ, 2013.

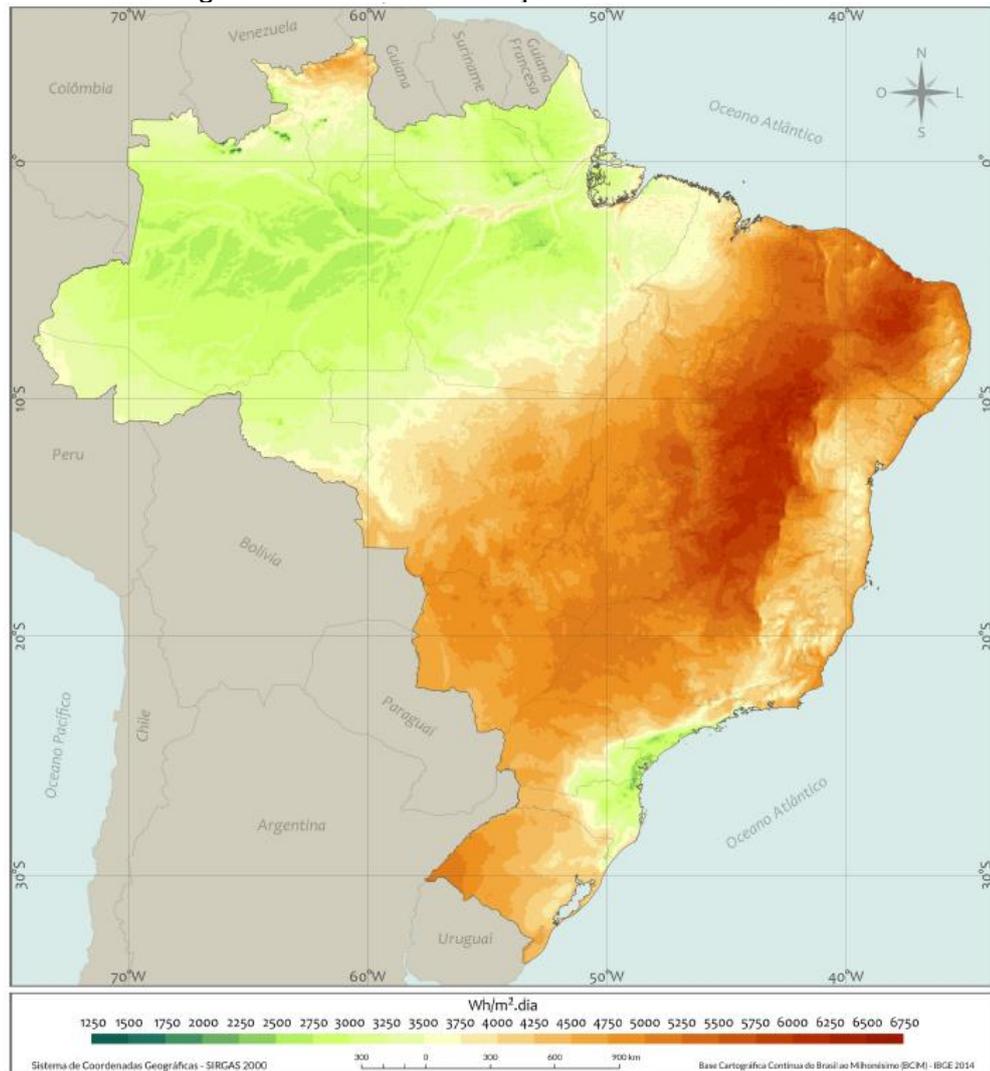
A integralização da irradiância no tempo é dada como irradiação solar em Wh/m^2 . Por meio do modelo BRASIL-SR, o Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu os mapas de irradiação das componentes da irradiação global. Além disso, os mapas possuem uma mesma escala de cor para facilitar análises comparativas, contudo cada mapa apresenta sua escala referente aos valores máximos e mínimos encontrados no mapa. A Figura 4 apresenta o total diário da irradiação global horizontal e a Figura 5 apresenta o total diário da irradiação direta normal (INPE, 2017).

Figura 4 - Soma da irradiação global horizontal diária.



Fonte: INPE, 2017.

Figura 5 - Soma da irradiação direta normal diária.

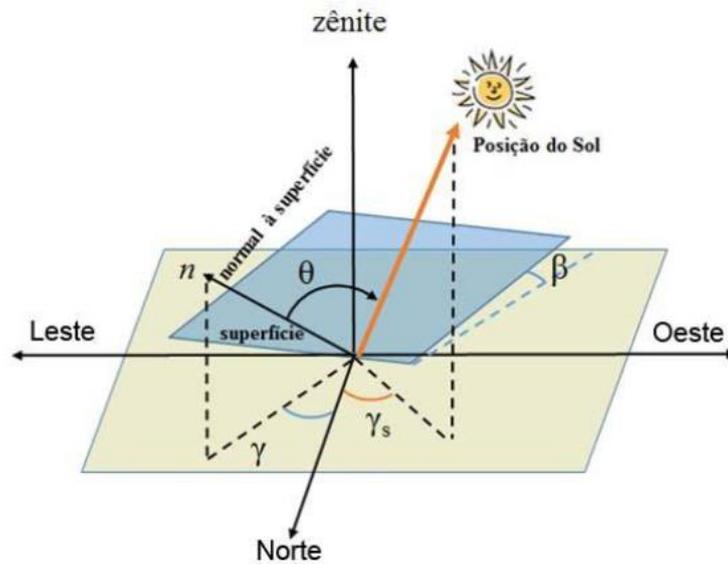


Fonte: INPE, 2017.

2.2 ÂNGULOS SOLARES

Para analisar a posição do sol, existem relações geométricas de uma superfície de referência com a posição do sol, que variam ao longo do dia, e podem ser observadas na Figura 6 (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 6 - Ângulos da posição do Sol em relação à superfície do gerador.



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

O ângulo azimutal da superfície (γ) relaciona projeção no plano horizontal da normal à superfície do plano do gerador com a direção Norte-Sul. Já o ângulo azimutal do sol (γ_s) se refere ao ângulo entre a projeção do sol no plano horizontal com a direção Norte-Sul. Ambos os ângulos azimutais variam de -180° a 180° .

O ângulo de incidência (θ) é medido entre a normal da superfície do gerador com o Sol, e o ângulo de inclinação do gerador (β) é o ângulo de plano do gerador com o plano horizontal, e varia de 0° a 90° (PINHO; GALDINO, 2014).

2.3 USINAS FOTOVOLTAICAS (UFV)

Conforme a NBR 10899 o sistema fotovoltaico é uma união de equipamentos que geram energia elétrica através da conversão da energia solar. Além disso, a norma em questão definiu e padronizou alguns termos técnicos seguintes (ABNT p.3-9, 2020):

condições-padrão de ensaio

STC

condições de ensaio especificadas na IEC 60904-3 para células e módulos fotovoltaicos

Gerador fotovoltaico gerador que utiliza o efeito fotovoltaico para converter a luz do Sol em eletricidade

Inversor equipamento que converte a corrente contínua do gerador fotovoltaico em corrente alternada

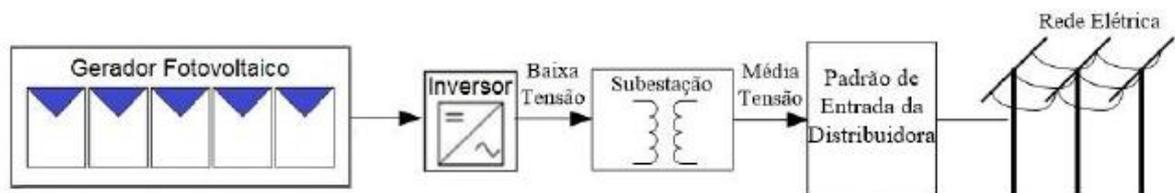
Módulo fotovoltaico unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas eletricamente e encapsuladas com o objetivo de gerar energia elétrica

Potência nominal potência de um módulo fotovoltaico sob as condições-padrão de ensaio

Em geral, existem dois tipos de sistema: o isolado e o conectado à rede (SFCR). O sistema isolado se refere à usina fotovoltaica que não possui nenhum ponto de conexão com a rede de energia da concessionária local. Já os sistemas fotovoltaicos conectados à rede, enquadram as usinas que possuem conexão com a rede da concessionária local e podem ser enquadradas como micro ou minigeração distribuída, conforme Lei nº 14.300/2022 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e participarem no sistema de compensação de créditos, podendo ser beneficiadas com a energia injetada na rede elétrica, seguindo critérios de conexão com o sistema de distribuição do PRODIST 3 (ANEEL, 2021).

As usinas fotovoltaicas são caracterizadas por possuir grande potência de geração, em torno 1 MWp, ou até maiores. A Figura 7 apresenta uma usina fotovoltaica conectada à rede de distribuição da distribuidora, e geralmente essa conexão é realizada em média tensão (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 7 - Sistema de grande porte.



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

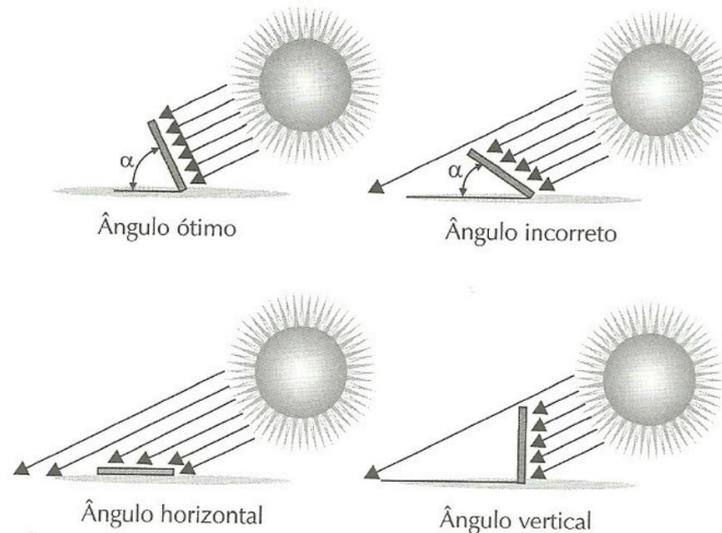
2.4 RASTREAMENTO SOLAR

Para um sistema solar fotovoltaico instalado no solo, é necessária uma estrutura de fixação desse gerador, para garantir estabilidade e segurança dos equipamentos.

Essa estrutura pode ser fixa ou possuir um sistema móvel, conhecido como rastreador solar ou tracker. Esse equipamento é responsável por rotacionar o eixo do suporte fazendo com que a superfície do gerador faça um ângulo de 90° com os raios

solares, aumentando a área de captação da radiação direta, e maximizando a produção de energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014), conforme Figura 8.

Figura 8 - Ângulo de incidência solar.



Fonte: adaptado (STROSKI, 2017).

O sistema de rastreamento é visto como um dos métodos mais utilizados para aumentar a eficiência do sistema. Entretanto, esse requer alto investimento, além de uma manutenção e consumo para operar. Logo, se faz necessário uma análise de viabilidade para implementar a tecnologia no projeto (HOFFMANN *et al*, 2018).

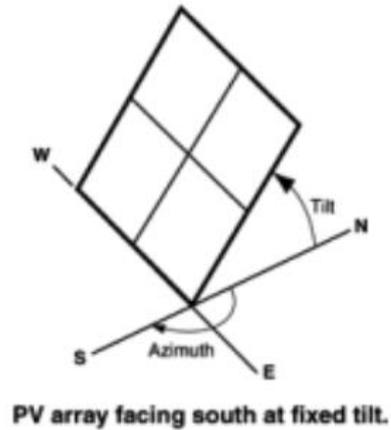
Os rastreadores podem ser classificados quanto ao tipo de estrutura, número de eixos, tipo de controle e estratégia de rastreamento. Os rastreadores de 1 eixo possuem menor custo comparado ao de 2 eixos. (LIRA, 2014).

Na seção 2.4.1 ao 2.4.4, abordará 4 tipos distintos de estrutura de fixação, o sistema fixo, rastreador de 1 eixo horizontal ou azimutal, e rastreador de 2 eixos.

2.4.1 Sistema Fixo

O sistema fixo é caracterizado pela ausência de partes móveis, logo o gerado possui valores fixos para os ângulos de inclinação e azimute. Com isso, aproveitam apenas uma parte da irradiação direta disponível.

Figura 9 – Desenho de um sistema fixo.

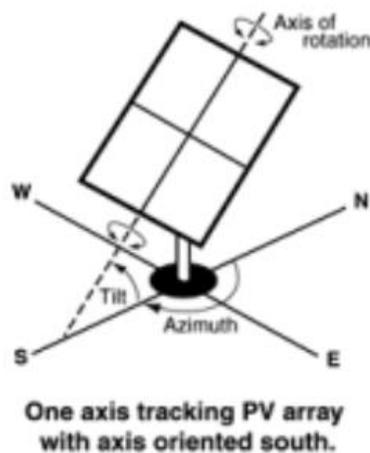


Fonte: SAM.

2.4.2 Sistema de 1 eixo horizontal

O rastreador monoaxial ou de 1 eixo horizontal possui apenas um eixo variável norte-sul e apresenta uma inclinação que acompanha a trajetória do sol, iniciando o dia com o gerador orientado para leste, e no final do dia para oeste. Já o ângulo de inclinação é fixo e igual a zero.

Figura 10 – Desenho de um SFV com rastreador solar de 1 eixo horizontal.

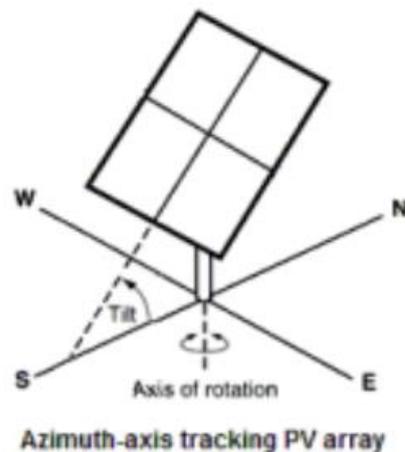


Fonte: SAM.

2.4.3 Sistema de 1 eixo azimutal

O sistema de 1 eixo azimutal apresenta o ângulo de inclinação fixo, entretanto, o ângulo de azimute varia. Igualmente ao rastreador de 1 eixo horizontal, o ângulo azimutal irá acompanhar o sentido do sol, amanhecendo orientado a leste, e no final do dia a oeste.

Figura 11 - Desenho de um SFV com rastreador solar de 1 eixo azimutal.

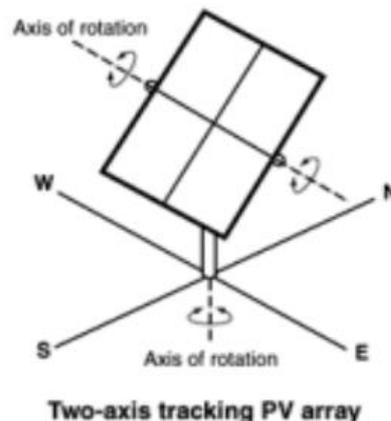


Fonte: SAM.

2.4.4 Sistema de 2 eixos

O rastreador solar biaxial ou de 2 eixos busca corrigir o ângulo azimutal e o ângulo de inclinação, para que o erro angular seja próximo a zero, e a componente direta seja absorvida por completo (SILVA *et al*, 2019).

Figura 12 - Desenho de um SFV com rastreador solar de 2 eixos.



Fonte: SAM.

2.5 ESTADO DA ARTE

Lima e Sarrade (2016) desenvolveram um estudo com a aplicação de uso de rastreador dólár de 1 eixo horizontal, analisando orientações e Razão de Cobertura do Solo (CGR) distintos, no estado de Pernambuco. A partir de simulações via software, obteve-se um aumento de eficiência quando comparado a um sistema fixo de pelo menos 29,5% anualmente.

SILVA e RAMPINELLI (2016) analisaram a influência da correlação do aumento de geração de energia elétrica com a componente direta da radiação, em sistemas com rastreador de 2 eixos e fixo. Foi possível concluir que há uma correlação entre esses dois fatores, e apresentaram aumentos no fator de capacidade (FC) de 3,5% a 7,2% e na produtividade do sistema de 305 kWh/kW a 627 kWh/kW.

Silva e Urbanetz Junior (2020) avaliaram a produtividade de dois módulos fotovoltaicos. O primeiro com uma estrutura de fixação fixa, o segundo com um rastreador de 1 eixo azimutal. Utilizou-se um programa de mapeamento solar em 3D para identificar o percurso do sol com mais precisão. Dessa forma, obteve-se um ganho energético de 18% a 35% nas estações do ano.

Abinee (2012) salienta que usualmente em usinas de grande porte, utiliza-se um sistema acoplado à estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos, que é o rastreador solar, na qual direciona o gerador para o sol ao longo de sua trajetória. Assim, tornando possível obter um ganho na produção de energia de 23% e 28%, utilizando rastreador de 1 e 2 eixos respectivamente.

Um dos meios para tornar a usina fotovoltaica mais eficiente, e por consequência fazer com que o tempo de retorno de investimento diminua, é a utilização do rastreador solar, sendo possível gerar a mesma quantidade de energia elétrica com menor quantidade de módulos fotovoltaicos, dessa forma, reduzindo o preço global investido. Tal melhoria se resume pelo melhor aproveitamento do recurso solar desde o início do dia até o pôr do sol (SILVA *et al*, 2019).

Frosi (2018) avaliou um sistema fotovoltaico fixo e outro com um rastreador de 2 eixos, ambos localizados em Farroupilha, no Rio Grande do Sul, com o objetivo de analisar o incremento real na utilização do rastreador de 2 eixos substituindo um sistema fixo ao longo de 21 dias, entre os meses de setembro e outubro de 017. Em média, o sistema com rastreador de 2 eixos se sobressai em relação ao fixo em 25%, atingindo cerca de 36% durante um dia com poucas nuvens.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão apresentados os procedimentos e parâmetros adotados para a elaboração do trabalho.

3.1 SOFTWARE SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL)

Para a simulação dos dados de geração de energia solar, foi utilizado o programa *System Advisor Model* (SAM), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) localizado nos Estados Unidos.

Foram realizadas simulações em 20 cidades brasileiras de diferentes regiões climáticas do país. Com 6 cidades na região Norte, 5 na região Nordeste, 3 na região Centro-Oeste, 3 na região Sudeste e 3 na região Sul. Na Tabela 1 são apresentadas as cidades do estudo.

Tabela 1 - Listagem das cidades brasileiras simuladas.

(continua)

Cidade brasileira	Estado Brasileiro	Região Brasileira	Coordenadas Geográficas
Belo Horizonte	MG	Sudeste	19° 48' 57" Sul 43° 57' 15" Oeste
Belém	PA	Norte	1° 27' 18" Sul 48° 30' 9" Oeste
Boa Vista	RR	Norte	2° 49' 12" N 60° 40' 19" O
Bom Jesus da Lapa	BA	Nordeste	13° 14' 52" Sul 43° 24' 53" Oeste
Brasília	DF	Centro-Oeste	15° 46' 48" Sul 47° 55' 45" Oeste
Campo Grande	MS	Centro-Oeste	20° 26' 37" Sul 54° 38' 52" Oeste
Cuiabá	MT	Centro-Oeste	15° 35' 56" Sul 56° 5' 42" Oeste
Curitiba	PR	Sul	25° 25' 42" Sul 49° 16' 24" Oeste
Florianópolis	SC	Sul	27° 35' 49" Sul 48° 32' 58" Oeste
Fortaleza	CE	Nordeste	3° 43' 6" Sul 38° 32' 36" Oeste

Tabela 1 – Listagem das cidades brasileiras simuladas.

(conclusão)

Jacareacanga	PA	Norte	6° 12' 24" Sul 57° 49' 28" Oeste
Manaus	AM	Norte	3° 6' 26" Sul 60° 1' 34" Oeste
Petrolina	PE	Nordeste	9° 23' 39" Sul 40° 30' 35" Oeste
Porto Nacional	TO	Norte	10° 42' 27" Sul 48° 24' 51" Oeste
Porto Velho	RO	Norte	8° 45' 43" Sul 8° 45' 43" Sul
Recife	PE	Nordeste	8° 3' 15" Sul 34° 52' 53" Oeste
Rio de Janeiro	RJ	Sudeste	22° 54' 13" Sul 43° 12' 35" Oeste
Salvador	BA	Nordeste	12° 58' 13" Sul 38° 30' 45" Oeste
Santa Maria	RS	Sul	29° 41' 29" Sul 53° 48' 3" Oeste
São Paulo	SP	Sudeste	46° 38' 20" Oeste 46° 38' 20" Oeste

Fonte: elaborado pelo autor.

Foi utilizada a base de dados da *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) para as simulações. Além dos dados de irradiação diária, também são fornecidos os dados da componente direta, ambos calculados com um passo de 60min.

3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO DE REFERÊNCIA

O sistema de referência foi utilizado para os três tipos de rastreamento, sendo apresenta 8 inversores fotovoltaicos da marca Sungrow modelo SG125HV, cada um com potência nominal de 125 kW, totalizando 1 MW, além de 3.014 módulos fotovoltaicos da marca Jinko Solar, modelo JKM400M-72L-V, cada um com potência de 400 Wp, totalizando 1,2056 MWp. Tem-se os dados técnicos do inversor e dos módulos fotovoltaicos, nas Tabelas 2 e 3 respectivamente.

Tabela 2 - Dados técnicos do módulo fotovoltaico.

Módulo Fotovoltaico JKM400M-72L-V	
Potência Máxima Nominal	400 Wp
Tensão de Circuito Aberto Voc	49,8 V
Eficiência	19,88%
Máxima Tensão do Sistema	1.500 V

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Dados técnicos do inversor fotovoltaico.

Inversor Fotovoltaico SG125HV	
Lado Corrente Contínua CC	
Intervalo de tensão de operação	860 - 1450
Máxima corrente de entrada	148 A
Máxima Tensão do Sistema	1.500 V
Lado Corrente Alternada CA	
Tipo de conexão	Trifásico
Potência Nominal	125 kW
Tensão Nominal de conexão	600 V
Eficiência Máxima	98,9%

Fonte: elaborado pelo autor.

3.3 DADOS DOS RASTREADORES SOLARES

As características e considerações dos sistemas de rastreamento serão abordadas nessa seção. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam as características dos sistemas de rastreador fixo, de 1 e 2 eixos respectivamente. O sistema fixo levou em conta o local de instalação e foi adotado a inclinação dos módulos foi igual à latitude do local, a fim de otimizar a produção de energia. Para o sistema de 1 eixo, não foram consideradas sombras parciais entre os módulos, além dos módulos orientados para o norte, quando localizados no hemisfério sul, e orientados para o sul, caso localizados no hemisfério norte. Para o sistema de 2 eixos, o SAM considera que o rastreador acompanha a trajetória solar diária, logo não apresenta mínimos e máximos de ângulos de rotação nos eixos. Foi considerado o mesmo valor de Razão de cobertura de solo, que é a razão entre a área do gerador e a área total do solo, de 30%.

Tabela 4 - Características do sistema fixo.

Sistema Fixo	
Orientação	Otimizada (0° ou 180°)
Inclinação	Igual à latitude
Razão de Cobertura do Solo (CGR)	30%

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Características do sistema de 1 eixo horizontal.

Sistema Monoaxial	
Orientação	0°
Inclinação	0°
Razão de Cobertura do Solo (CGR)	30%
Rotação em relação a horizontal	± 45°

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Características do sistema de 2 eixos.

Sistema Biaxial	
Orientação	0°
Inclinação	0°
Razão de Cobertura do Solo (CGR)	30%
Rotação em relação a horizontal	-

Fonte: elaborado pelo autor.

3.4 PERDAS

Para a simulação da energia elétrica gerada pela usina fotovoltaica, foram consideradas algumas perdas de geração de energia padronizadas pelo programa SAM. Além disso, considerou-se o consumo de energia do motor do rastreador solar, como perda de 0,2% da geração de energia, de acordo com Lima e Sarrade (2016). Além disso, foi considerada a degradação média anual dos módulos fotovoltaicos a partir da ficha de dados técnicos do equipamento utilizado.

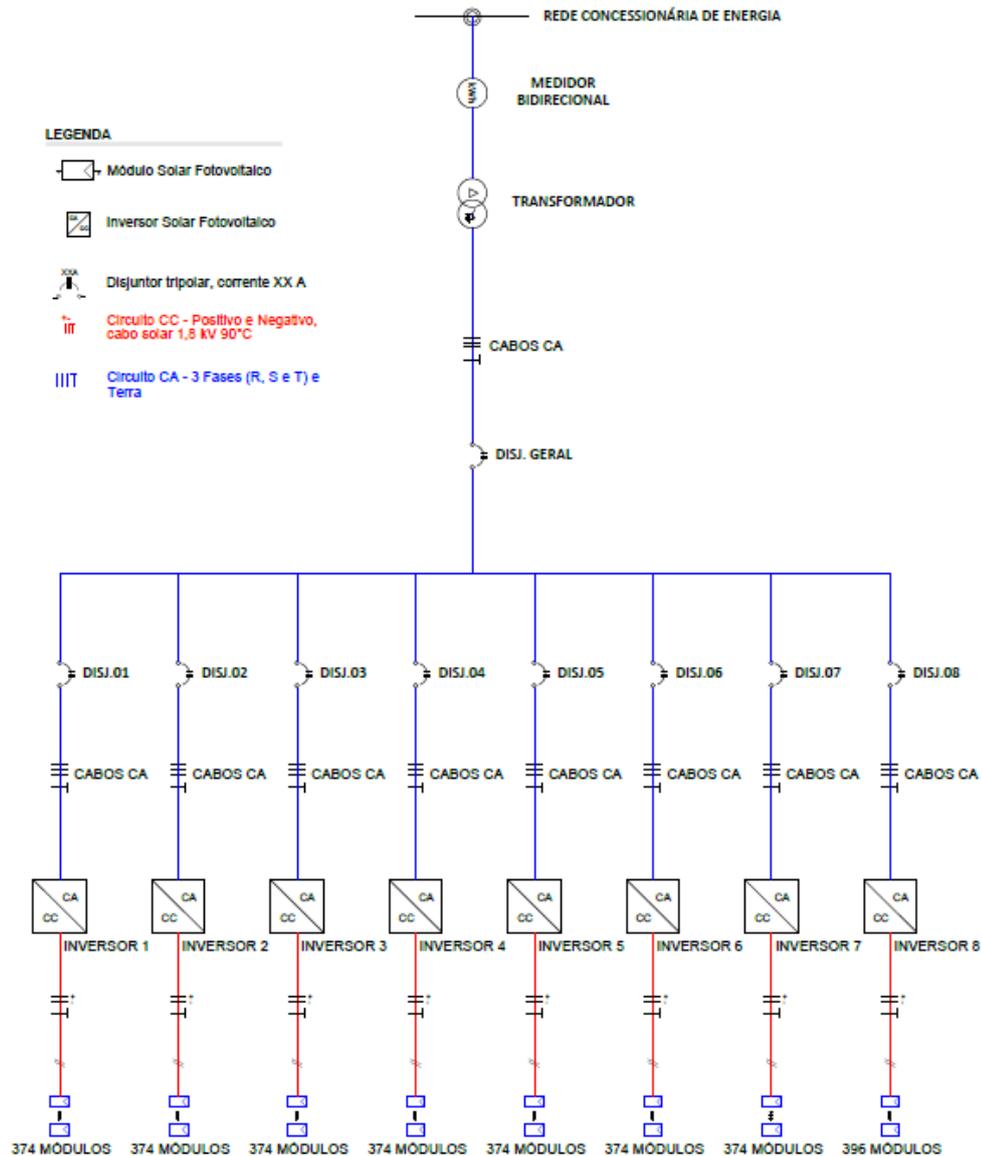
Tabela 7 - Perdas do sistema solar fotovoltaico.

Perdas consideradas	
Radiação	
Perda média anual por sujeira	5%
Corrente Contínua (CC)	
Incompatibilidade dos módulos	2%
Diodos e conexões	0,5%
Cabeamento CC	2%
Degradação média anual dos módulos	0,67%
Corrente Alternada (CA)	
Cabeamento CA	1%
Rastreador	
Motorização dos rastreadores de 1 eixo	0,2%
Motorização dos rastreadores de 2 eixos	0,4%

Fonte: elaborado pelo autor.

Os principais componentes da usina fotovoltaica de referência desenvolvida são apresentados no diagrama unifilar da Figura 13, contendo o sistema de conexão, medição, transformação, proteção, cabamentos e geração solar fotovoltaica.

Figura 13 - Diagrama unifilar do sistema solar fotovoltaico de referência



Fonte: elaborado pelo autor

3.5 DADOS FINANCEIROS

Nessa seção serão abordadas as premissas financeiras para as análises financeiras. Dessa forma, será levantado apenas os custos para implementação das usinas com rastreador de 1 eixo e fixo. Foram utilizados a base de dados da Greener

conforme Estudo Estratégico Geração Distribuída - Mercado Fotovoltaico - 1º Semestre 2022 | Brasil de junho de 2022, temos o preço médio Sistema fotovoltaico, também conhecido como CAPEX, de 4,27 R\$/Wp para sistemas fixos e 4,60 R\$/Wp para sistemas com rastreador de 1 eixo na escala de 1MWp, referência que mais se assemelha ao Sistema de referência.

As equações 1 e 2 apresentam os cálculos dos custos de implantação das usinas com e sem rastreador.

$$CAPEX_{FIXO} = 4,27 \frac{R\$}{kWp} \times 1,2056 \text{ MWp} = R\$5.147.912,00 \quad (1)$$

$$CAPEX_{1EIXO} = 4,60 \frac{R\$}{kWp} \times 1,2056 \text{ MWp} = R\$5.545.760,00 \quad (2)$$

São estimados os custos fixos com manutenção e operação anual das usinas, chamados de OPEX. Considerou-se um valor de 1% em relação ao investimento inicial para o Sistema fixo e 2% para o Sistema de 1 eixo, vistos nas equações 3 e 4. Ademais, foi projetado um aumento médio anual de 6% para ambos os custos.

$$OPEX_{FIXO} = CAPEX_{FIXO} \times 1\% = R\$5.147.912,00 \times 1\% = R\$51.479,12 \quad (3)$$

$$OPEX_{1EIXO} = CAPEX_{1EIXO} \times 2\% = R\$5.545.760,00 \times 2\% = R\$110.915,20 \quad (4)$$

Além disso, foi considerado o custo anual com a contratação de demanda do sistema fotovoltaico ainda considerado dentro do OPEX, conforme equação 5, apresentando correção monetária estimada em 4% ao ano.

$$CUSTO DEMANDA = 6,00 \frac{R\$}{kW} \times 1,2056 \text{ MWp} \times 12 \text{ meses} = R\$86.803,20 \quad (5)$$

A equação 6 indica o ganho financeiro anual foi calculado a partir da tarifa de energia do Grupo B, igual a 0,69 R\$/kWh, multiplicado pela energia gerada. Conforme INSTITUTO ACENDE BRASIL (2020), houve um aumento médio anual da tarifa de energia para o consumidor residencial de 5,36% nos últimos 10 anos, percentual utilizado para projetar o aumento médio da energia elétrica por ano.

$$ECONOMIA (R\$) = 0,69 \frac{R\$}{kWh} \times \text{Energia Gerada kWh} \quad (6)$$

3.6 ÍNDICES DE MÉRITO

Esta seção abordará índices capazes de tangenciar os valores obtidos nas simulações para que seja possível realizar comparações e conclusões do estudo.

3.6.1 Energético

A produtividade anual de um sistema fotovoltaico pode ser dado pela razão entre a energia gerada em corrente alternada ao longo de um ano, em kWh, pela potência nominal do sistema, em kWp, conforme Equação 7. (Kroth, 2021). Dessa forma, é possível fazer uma análise comparativa do desempenho do sistema para diferentes regiões e rastreadores.

$$Produtividade = \frac{Energia (CA)}{P_{nom}} \left[\frac{kWh}{kWp} \right] \quad (7)$$

3.6.2 Econômico

O valor presente líquido (VPL) representa o fluxo de caixa do projeto trazendo os valores para o presente, e pode ser calculado pela equação 8. Para isso, foi considerado um horizonte de investimento de 25 anos. A taxa mínima de atratividade (TMA) foi estimada em 8% ao ano, valor um pouco inferior à Taxa Selic de acordo com o Nubank (2022).

$$VPL = -CAPEX + \sum \frac{ECONOMIA (R\$)}{(1+TMA)^i}, \text{ onde } i = 1,2,3 \dots, 25 \quad (8)$$

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa que retorna o VPL de um fluxo de caixa quando esse é igual à zero, ou seja, sem ganhos ou perdas. Considerando apenas investimentos rentáveis na qual a TIR é maior que a TMA, na medida em que o TIR se afasta da TMA, menor será o risco do projeto. Pode ser calculado pela equação 9.

$$TIR(\%) \rightarrow -CAPEX + \sum \frac{ECONOMIA (R\$)_i}{(1+TIR)^i} = 0, \text{ onde } i = 1,2,3 \dots, 25 \quad (9)$$

O tempo de retorno do investimento, chamado de *payback*, é o tempo que leva para que o fluxo de caixa começa a tornar positivo, sendo esse com o valor recuperado para o presente, considerando a taxa igual à TMA.

De acordo com Canal Solar (2020), o custo nivelado de energia (LCOE) é um parâmetro para calcular o valor investido em reais para cada kWh de energia elétrica gerada, utilizado para comparar diferentes fontes de energia ou analisar incrementos em um projeto base. A fórmula é apresentada na equação 10.

$$LCOE = \frac{CAPEX+OPEX-Residual}{Energia\ total\ gerada\ (kWh)} \quad (10)$$

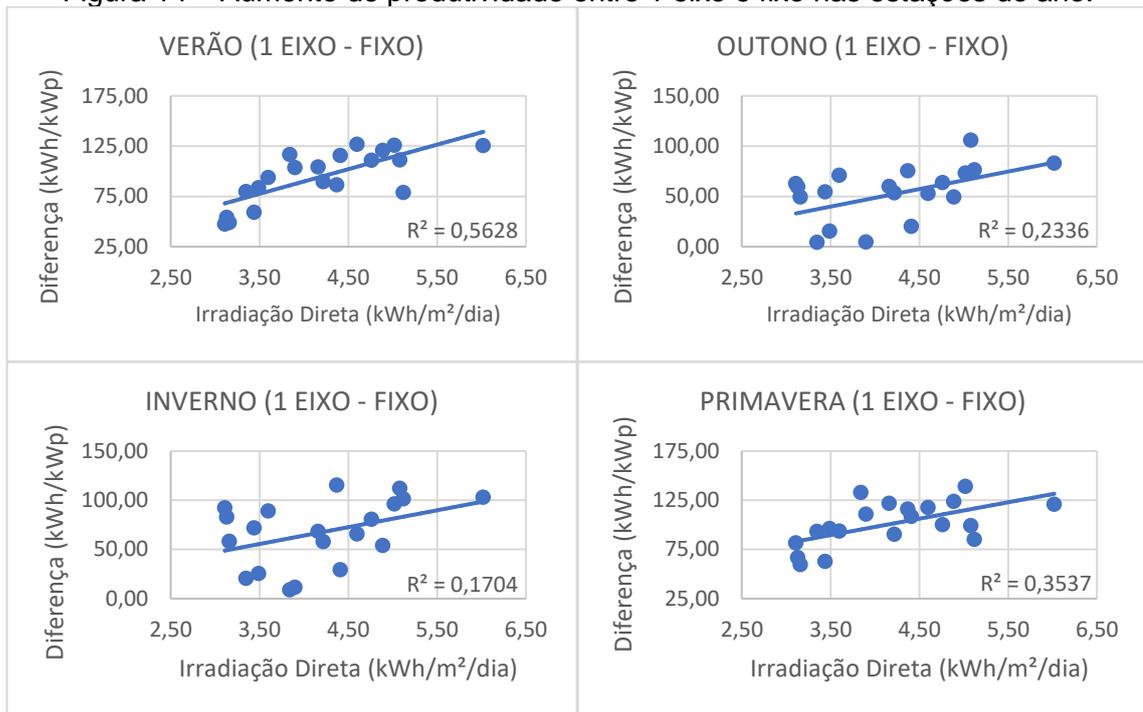
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão analisados os resultados tanto energéticos, como financeiros em cada um dos tópicos seguintes.

4.1 DESEMPENHO ENERGÉTICO

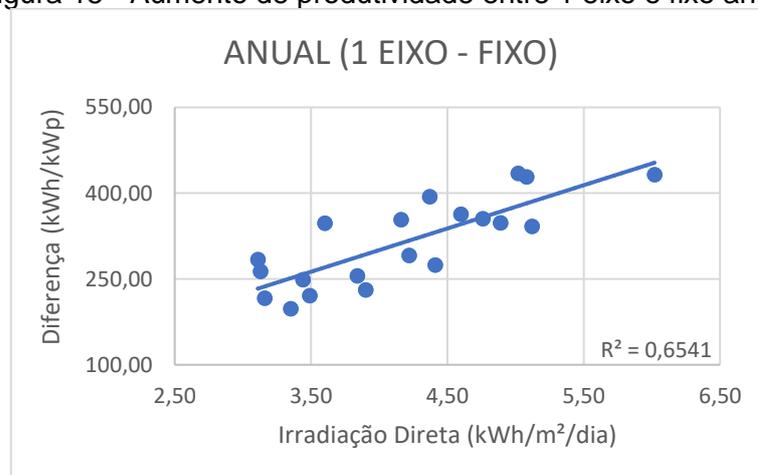
A Figura 14 apresenta quatro gráficos relacionando a componente direta da irradiação diária com o acréscimo de produtividade pela utilização do sistema de rastreador de 1 eixo em detrimento do fixo em diferentes estações do ano. A Figura 15 apresenta as mesmas variáveis, analisando o período anual.

Figura 14 – Aumento de produtividade entre 1 eixo e fixo nas estações do ano.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 15 - Aumento de produtividade entre 1 eixo e fixo anual.



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível analisar que em todas as estações do ano, há uma tendência de aumento do acréscimo de produtividade com o aumento da irradiação direta. O coeficiente de determinação (R^2) nada mais é do que a proporção da variabilidade de uma variável a partir da variabilidade de uma outra variável, e esse valor varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, maior a previsibilidade dos dados pela curva ajustada.

Como o valor de irradiação direta está referente à uma média anual, e a produtividade se refere aos três meses da estação do ano, foram obtidos valores distantes de R^2 igual à 1. A estação do verão apresentou resultados mais próximos à

linha de tendência, já no inverno, os mais distantes. Na Figura 7 são apresentadas com ambas as variáveis anuais, dessa forma obteve-se valores mais previsíveis, com o coeficiente de determinação de aproximadamente 0,65, logo apresenta uma maior correção direta das variáveis.

Na Tabela 8, é possível analisar e comparar a diferença de produtividade anual para o sistema de rastreamento de 1 eixo e fixo e seu aumento de produtividade.

Tabela 8 – Comparação anual de produtividade entre rastreador fixo e de 1 eixo.

Cidades brasileiras	Irradiação Direta kWh/m ² /dia	Produtividade Anual (kWh/kWp)			
		Fixo	1 Eixo	Aumento	
Belo Horizonte	5,08	1.610	2.039	429	27%
Belém	3,11	1.454	1.739	284	20%
Boa Vista	3,60	1.506	1.854	348	23%
Bom Jesus da Lapa	6,02	1.673	2.106	433	26%
Brasília	4,76	1.650	2.005	356	22%
Campo Grande	4,89	1.635	1.984	348	21%
Cuiabá	4,22	1.517	1.809	292	19%
Curitiba	3,35	1.335	1.533	198	15%
Florianópolis	3,90	1.472	1.703	231	16%
Fortaleza	4,37	1.619	2.013	394	24%
Jacareacanga	3,16	1.336	1.553	217	16%
Manaus	3,13	1.323	1.586	264	20%
Petrolina	5,02	1.671	2.105	435	26%
Porto Nacional	5,12	1.578	1.921	342	22%
Porto Velho	3,44	1.404	1.653	249	18%
Recife	4,16	1.580	1.934	354	22%
Rio de Janeiro	4,41	1.581	1.856	275	17%
Salvador	4,60	1.548	1.912	363	23%
Santa Maria	3,84	1.426	1.682	256	18%
São Paulo	3,49	1.438	1.659	221	15%

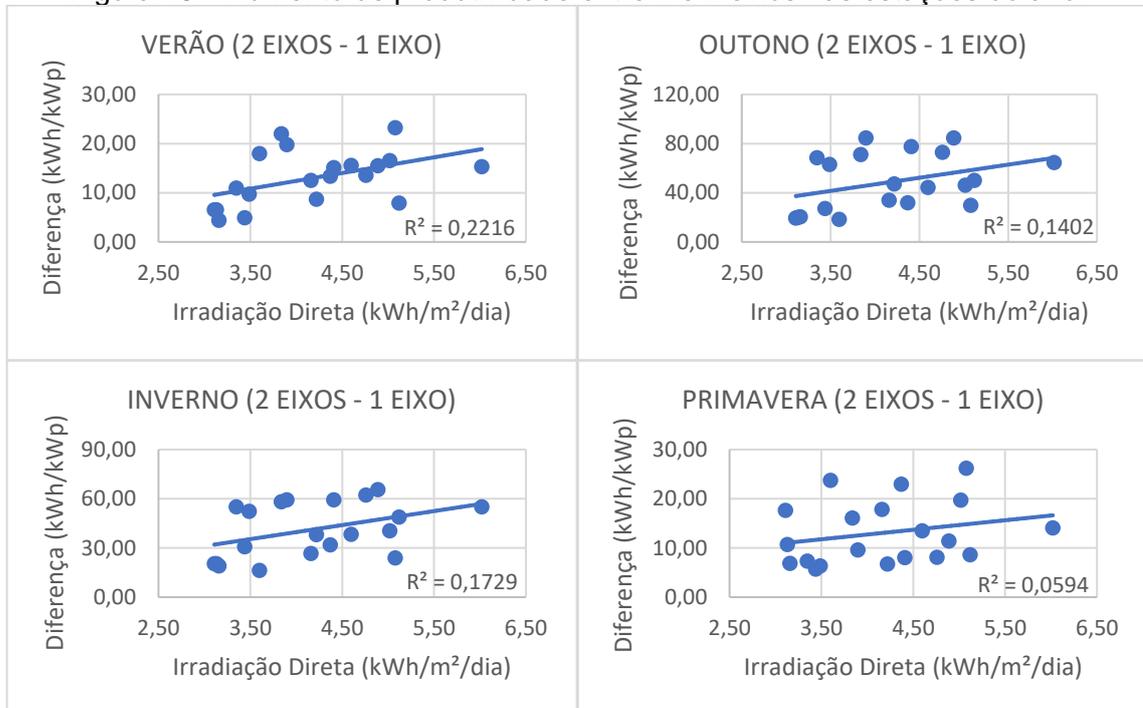
Fonte: elaborado pelo autor.

As cidades de Belo Horizonte, Bom Jesus da Lapa e Petrolina apresentaram resultados com a utilização do sistema de 1 eixo em relação ao fixo. Por sua vez, as cidades de Florianópolis, Curitiba e São Paulo apresentaram resultados piores, com um aumento de 15% a 16% apenas.

As Figuras 16 e 17 mostram os valores referentes a utilização do rastreador de 2 eixos e 1 eixo, onde é plotado apenas a diferença de produtividade de ambas as tecnologias. Os cinco gráficos apresentados indicam que os valores são difundidos, e estão distantes da linha de tendência, tornando inconclusiva qualquer análise do

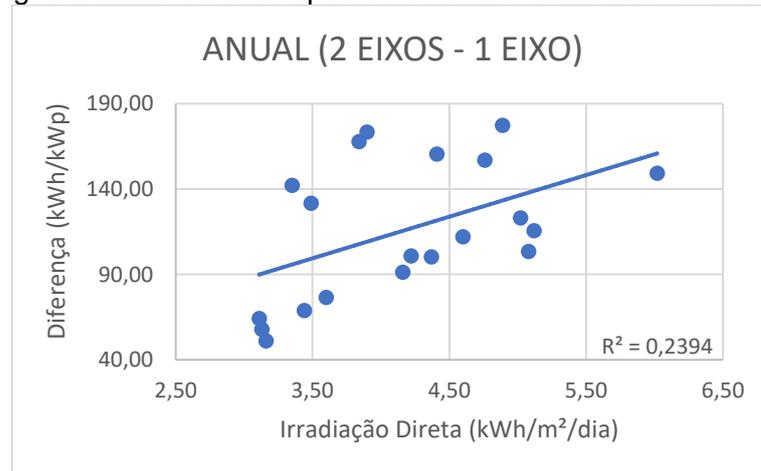
coeficiente de regressão. No entanto, é possível afirmar que independente da irradiação diária do local, a utilização do sistema de rastreador de 2 eixos sempre irá produzir mais energia.

Figura 16 – Aumento de produtividade entre 1 e 2 eixos nas estações do ano.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 17 - Aumento de produtividade entre 1 e 2 eixos anual.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 9 apresenta a diferença de produtividade anual para o sistema de rastreamento de 2 eixos comparado a 1 eixo.

Tabela 9 - Comparação anual de produtividade entre rastreador de 1 e 2 eixos.

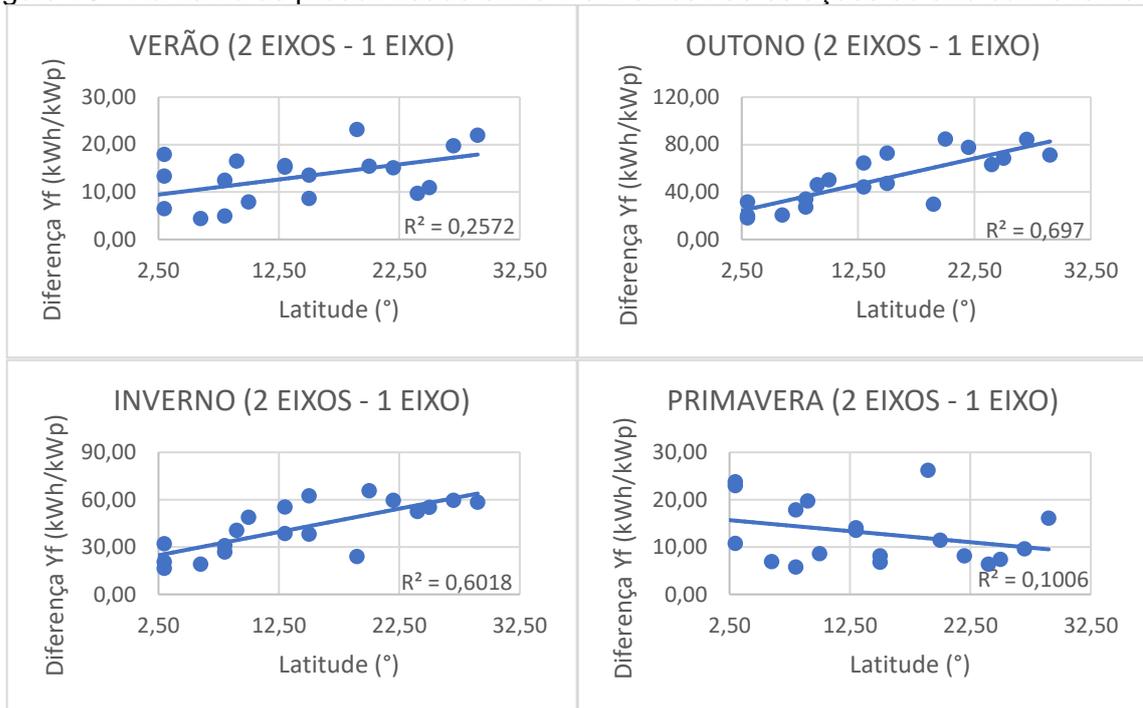
Cidades brasileiras	Irradiação Direta kWh/m ² /dia	Produtividade Anual (kWh/kWp)			
		1 Eixo	2 Eixos	Aumento	
Belo Horizonte	5,08	2.039	2.142	103	5%
Belém	3,11	1.739	1.803	64	4%
Boa Vista	3,60	1.854	1.930	76	4%
Bom Jesus da Lapa	6,02	2.106	2.255	149	7%
Brasília	4,76	2.005	2.162	157	8%
Campo Grande	4,89	1.984	2.161	177	9%
Cuiabá	4,22	1.809	1.910	101	6%
Curitiba	3,35	1.533	1.675	142	9%
Florianópolis	3,90	1.703	1.877	173	10%
Fortaleza	4,37	2.013	2.113	100	5%
Jacareacanga	3,16	1.553	1.604	51	3%
Manaus	3,13	1.586	1.644	58	4%
Petrolina	5,02	2.105	2.229	123	6%
Porto Nacional	5,12	1.921	2.036	116	6%
Porto Velho	3,44	1.653	1.721	69	4%
Recife	4,16	1.934	2.025	91	5%
Rio de Janeiro	4,41	1.856	2.016	160	9%
Salvador	4,60	1.912	2.024	112	6%
Santa Maria	3,84	1.682	1.849	168	10%
São Paulo	3,49	1.659	1.791	132	8%

Fonte: elaborado pelo autor.

A variação no incremento da produtividade anual foi de 3 a 10%. Pode-se destacar que o sistema de 2 eixos ficou mais eficiente nas cidades de Florianópolis e Santa Maria, e com 3%, Jacareacanga foi a cidade com o menor aumento energético.

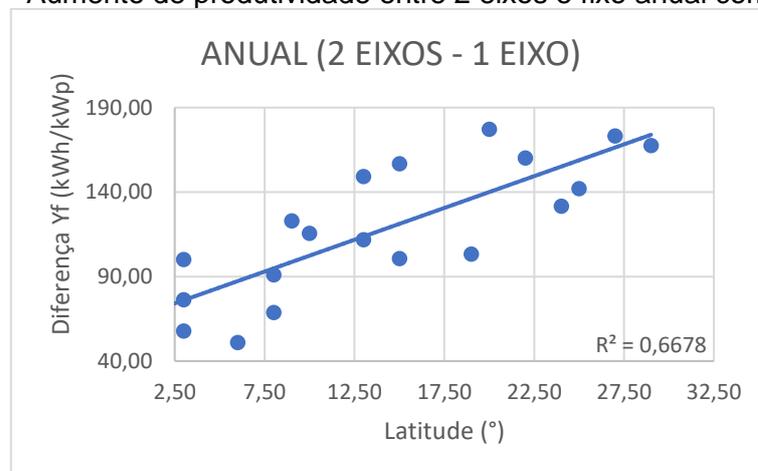
São apresentadas nas Figuras 18 e 19 o aumento de produtividade do sistema com relação a latitude geográfica das cidades, quando comparados os sistemas de rastreamento de 1 e 2 eixos. É possível observar que há uma maior correção desses dois fatores em relação à análise anterior, com a radiação direta. Uma vez que o incremento do segundo eixo de rotação realiza o rastreamento do ângulo de inclinação do gerador, irá proporcionar e otimizar ainda mais os sistemas de maiores latitudes.

Figura 18 - Aumento de produtividade entre 1 e 2 eixos nas estações do ano com a latitude.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 - Aumento de produtividade entre 2 eixos e fixo anual com a latitude.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a análise anual, foi obtido o coeficiente de determinação de aproximadamente 0,67, um valor consideravelmente maior que os 0,24 encontrado quando correlacionado com a irradiação direta.

Na Tabela 10, tem-se o aumento de produtividade anual agora correlacionando com a latitude geográfica da cidade.

Tabela 10 - Comparação anual de produtividade entre rastreador de 1 e 2 eixos com a latitude.

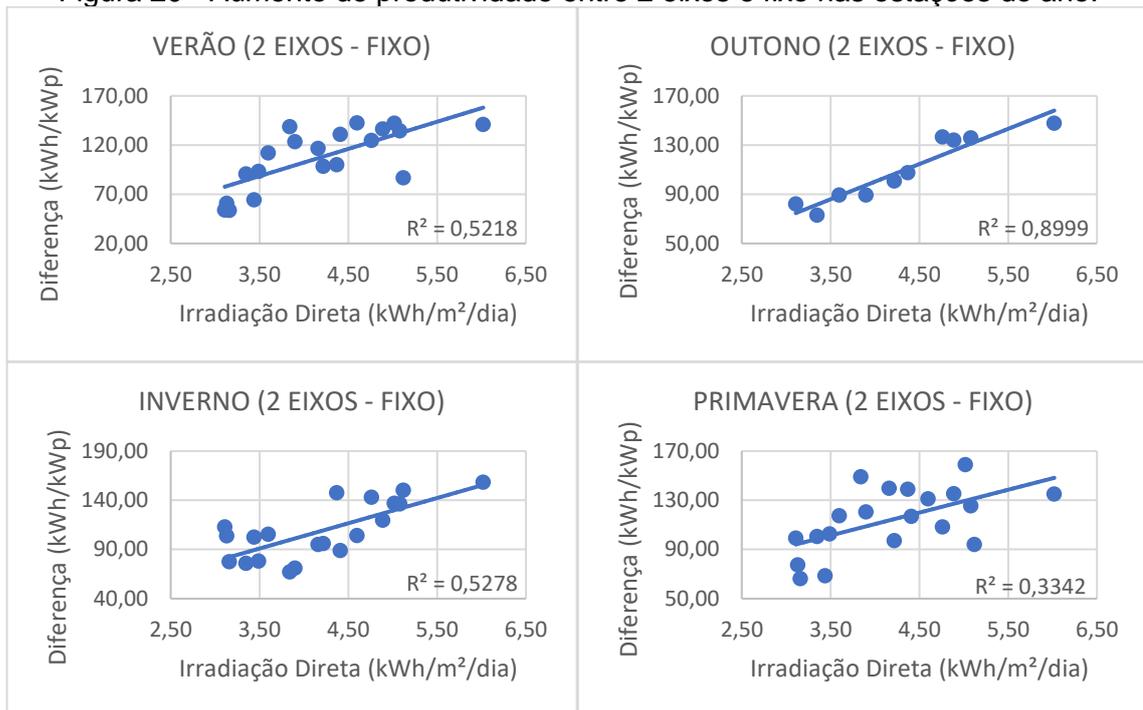
Cidades brasileiras	Latitude (°)	Produtividade Anual (kWh/kWp)			
		1 Eixo	2 Eixos	Aumento	
Belo Horizonte	19,00	2.039	2.142	103	5%
Belém	1,00	1.739	1.803	64	4%
Boa Vista	3,00	1.854	1.930	76	4%
Bom Jesus da Lapa	13,00	2.106	2.255	149	7%
Brasília	15,00	2.005	2.162	157	8%
Campo Grande	20,00	1.984	2.161	177	9%
Cuiabá	15,00	1.809	1.910	101	6%
Curitiba	25,00	1.533	1.675	142	9%
Florianópolis	27,00	1.703	1.877	173	10%
Fortaleza	3,00	2.013	2.113	100	5%
Jacareacanga	6,00	1.553	1.604	51	3%
Manaus	3,00	1.586	1.644	58	4%
Petrolina	9,00	2.105	2.229	123	6%
Porto Nacional	10,00	1.921	2.036	116	6%
Porto Velho	8,00	1.653	1.721	69	4%
Recife	8,00	1.934	2.025	91	5%
Rio de Janeiro	22,00	1.856	2.016	160	9%
Salvador	13,00	1.912	2.024	112	6%
Santa Maria	29,00	1.682	1.849	168	10%
São Paulo	24,00	1.659	1.791	132	8%

Fonte: elaborado pelo autor.

Em geral, os maiores valores de latitudes apresentaram os maiores aumentos de produtividade, visto nas cidades de Florianópolis e Santa Maria, ambos na região Sul e com latitudes intermediárias. Cidade com baixas latitudes e próximas a linha do Equador, obtiveram menores aumentos de produtividade, exemplificados nas cidades de Belém, Boa Vista, Fortaleza, Manaus e Jacareacanga.

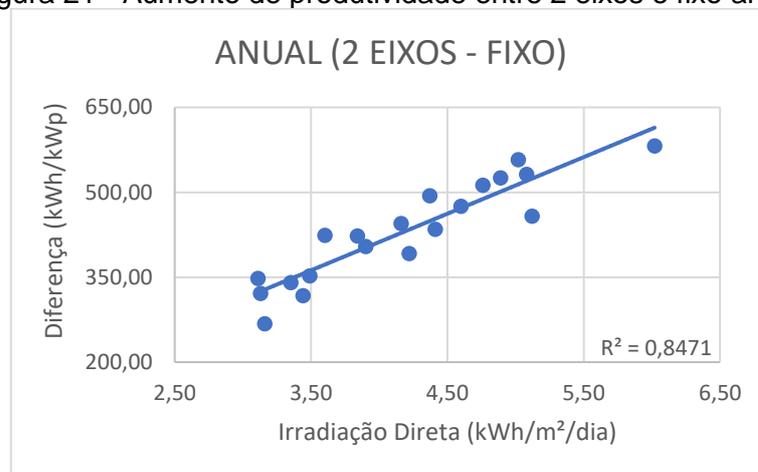
A Figura 20 apresenta os gráficos comparativos da utilização de rastreador de 2 eixos e fixo. Assim, é possível afirmar que a estação de outono apresentou menor variabilidade dos dados, e a primavera a maior. A Figura 21, mostra o aumento anual da utilização de 2 eixos quanto fixo, e indica uma forte relação do aumento de produtividade com o aumento da irradiação direta diária.

Figura 20 - Aumento de produtividade entre 2 eixos e fixo nas estações do ano.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 21 - Aumento de produtividade entre 2 eixos e fixo anual.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 11 apresenta o aumento de produtividade da utilização do sistema mais eficiente energeticamente, que é o de 2 eixos, com o sistema mais simples, que contém apenas o rastreamento fixo.

Tabela 11 - Comparação anual de produtividade entre rastreador fixo e de 2 eixos.

Cidades brasileiras	Irradiação Direta kWh/m ² /dia	Produtividade Anual (kWh/kWp)			
		Fixo	2 Eixos	Aumento	
Belo Horizonte	5,08	1.610	2.142	532	33%
Belém	3,11	1.454	1.803	348	24%
Boa Vista	3,60	1.506	1.930	424	28%
Bom Jesus da Lapa	6,02	1.673	2.255	582	35%
Brasília	4,76	1.650	2.162	513	31%
Campo Grande	4,89	1.635	2.161	526	32%
Cuiabá	4,22	1.517	1.910	392	26%
Curitiba	3,35	1.335	1.675	340	26%
Florianópolis	3,90	1.472	1.877	404	27%
Fortaleza	4,37	1.619	2.113	494	31%
Jacareacanga	3,16	1.336	1.604	268	20%
Manaus	3,13	1.323	1.644	321	24%
Petrolina	5,02	1.671	2.229	558	33%
Porto Nacional	5,12	1.578	2.036	458	29%
Porto Velho	3,44	1.404	1.721	317	23%
Recife	4,16	1.580	2.025	445	28%
Rio de Janeiro	4,41	1.581	2.016	435	28%
Salvador	4,60	1.548	2.024	475	31%
Santa Maria	3,84	1.426	1.849	423	30%
São Paulo	3,49	1.438	1.791	353	25%

Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar que a diferença, ou melhor, o aumento de produtividade quando se substitui um sistema de rastreador fixo para um de 2 eixos é ainda maior, e na cidade de Bom Jesus da Lapa foi o local que pode ser melhor aproveitado a utilização do rastreador de 2 eixos, quando comparado ao fixo, aumentando em 35% a produtividade do sistema. A Tabela 12 indica as médias de aumento de todas as cidades brasileiras de produtividade apresentadas nas Tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 12 – Médias anuais de crescimento de produtividade.

Comparação	Médias de Aumento de Produtividade Anual (kWh/kWp)	
1 Eixo e Fixo	314	21%
2 Eixos e 1 Eixo	116	6%
2 Eixos e Fixo	430	27%

Fonte: elaborado pelo autor.

O aumento da utilização do rastreador de 1 eixo ao invés do fixo é grande, atingindo uma média de 21% para todas as regiões do Brasil. É possível observar

também que a diferença, ou melhor, o aumento de produtividade quando se substitui um sistema de rastreador fixo para um de 2 eixos é ainda maior, valor médio de 6% dos resultados obtidos, contudo, a complexidade do sistema aumenta, e seu custo inicial e com a manutenção cresce de forma mais acentuada que a produtividade, assim, o sistema de 1 eixo é o mais utilizado para as usinas fotovoltaicas.

4.2 ANÁLISE ECONÔMICA

A partir das premissas apresentadas na seção de materiais e métodos, foram calculados na Tabela 13 o VPL para o sistema fixo e com 1 eixo.

Tabela 13 - Valor presente líquido das usinas fotovoltaicas.

Cidades brasileiras	Irradiação Direta kWh/m ² /dia	Valor Presente Líquido (VPL)		
		Fixo	1 Eixo	Aumento
Belo Horizonte	5,08	R\$ 14.210.382,18	R\$ 18.412.943,94	29,57%
Belém	3,11	R\$ 12.119.863,70	R\$ 14.386.458,45	18,70%
Boa Vista	3,60	R\$ 12.815.766,49	R\$ 15.931.930,69	24,32%
Bom Jesus da Lapa	6,02	R\$ 15.063.907,41	R\$ 19.316.144,31	28,23%
Brasília	4,76	R\$ 14.743.388,01	R\$ 17.963.669,69	21,84%
Campo Grande	4,89	R\$ 14.548.297,48	R\$ 17.672.158,93	21,47%
Cuiabá	4,22	R\$ 12.963.955,00	R\$ 15.327.363,59	18,23%
Curitiba	3,35	R\$ 10.507.531,66	R\$ 11.626.576,89	10,65%
Florianópolis	3,90	R\$ 12.356.860,49	R\$ 13.910.597,23	12,57%
Fortaleza	4,37	R\$ 14.327.715,28	R\$ 18.060.580,27	26,05%
Jacareacanga	3,16	R\$ 10.529.120,41	R\$ 11.894.360,81	12,97%
Manaus	3,13	R\$ 10.346.006,29	R\$ 12.339.016,55	19,26%
Petrolina	5,02	R\$ 15.026.472,78	R\$ 19.308.009,08	28,49%
Porto Nacional	5,12	R\$ 13.785.353,58	R\$ 16.828.331,30	22,07%
Porto Velho	3,44	R\$ 11.439.249,22	R\$ 13.230.431,41	15,66%
Recife	4,16	R\$ 13.805.113,53	R\$ 17.006.661,02	23,19%
Rio de Janeiro	4,41	R\$ 13.826.579,62	R\$ 15.961.099,57	15,44%
Salvador	4,60	R\$ 13.381.456,53	R\$ 16.709.218,54	24,87%
Santa Maria	3,84	R\$ 11.736.763,67	R\$ 13.619.660,72	16,04%
São Paulo	3,49	R\$ 11.895.969,58	R\$ 13.315.523,08	11,93%

Fonte: elaborado pelo autor.

A cidade de Belo Horizonte apresentou o maior aumento no VPL de todas as cidades é caracterizada pela terceira maior irradiação direta diária. Já a cidade de Curitiba, apresentou o menor aumento de VPL, e se caracteriza pela baixa irradiação direta diária.

Os cálculos da taxa interna de retorno foram calculados e apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Taxa interna de retorno das usinas fotovoltaicas.

Cidades brasileiras	Irradiação Direta kWh/m ² /dia	Taxa Interna de Retorno (TIR)		
		Fixo	1 Eixo	Aumento
Belo Horizonte	5,08	27,62%	31,23%	3,61%
Belém	3,11	25,04%	26,66%	1,62%
Boa Vista	3,60	25,90%	28,42%	2,52%
Bom Jesus da Lapa	6,02	28,66%	32,24%	3,58%
Brasília	4,76	28,27%	30,72%	2,45%
Campo Grande	4,89	28,03%	30,39%	2,36%
Cuiabá	4,22	26,09%	27,73%	1,65%
Curitiba	3,35	23,03%	23,47%	0,44%
Florianópolis	3,90	25,34%	26,11%	0,78%
Fortaleza	4,37	27,76%	30,83%	3,07%
Jacareacanga	3,16	23,06%	23,79%	0,73%
Manaus	3,13	22,83%	24,30%	1,47%
Petrolina	5,02	28,62%	32,24%	3,62%
Porto Nacional	5,12	27,10%	29,44%	2,34%
Porto Velho	3,44	24,20%	25,33%	1,13%
Recife	4,16	27,12%	29,64%	2,52%
Rio de Janeiro	4,41	27,15%	28,46%	1,31%
Salvador	4,60	26,60%	29,30%	2,70%
Santa Maria	3,84	24,57%	25,78%	1,21%
São Paulo	3,49	24,77%	25,43%	0,66%

Fonte: elaborado pelo autor.

O comportamento do TIR se assemelha bastante com o VPL no desempenho das cidades. Os aumentos deste indicador foram de 0,44% na cidade de Curitiba e o maior valor de 3,62% na cidade de Petrolina.

O tempo de retorno de investimento foi calculado seguindo as premissas apresentadas e podem ser vistos na Tabela 15.

Tabela 15 - Tempo de retorno do investimento das usinas fotovoltaicas.

Cidades brasileiras	Irradiação Direta kWh/m ² /dia	Tempo de Retorno do Investimento (anos)		
		Fixo	1 Eixo	Redução
Belo Horizonte	5,08	4,96	4,26	14,24%
Belém	3,11	5,62	5,18	7,94%
Boa Vista	3,60	5,39	4,78	11,20%
Bom Jesus da Lapa	6,02	4,73	4,09	13,57%
Brasília	4,76	4,82	4,34	9,83%
Campo Grande	4,89	4,87	4,40	9,60%
Cuiabá	4,22	5,34	4,93	7,65%
Curitiba	3,35	6,25	6,06	3,15%
Florianópolis	3,90	5,54	5,31	4,14%
Fortaleza	4,37	4,93	4,32	12,29%
Jacareacanga	3,16	6,24	5,96	4,57%
Manaus	3,13	6,32	5,80	8,22%
Petrolina	5,02	4,74	4,09	13,72%
Porto Nacional	5,12	5,09	4,58	9,95%
Porto Velho	3,44	5,87	5,51	6,13%
Recife	4,16	5,08	4,54	10,61%
Rio de Janeiro	4,41	5,07	4,78	5,86%
Salvador	4,60	5,21	4,61	11,55%
Santa Maria	3,84	5,76	5,40	6,35%
São Paulo	3,49	5,70	5,49	3,78%

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados de retorno financeiro fortalecem os parâmetros anteriores. A maior no retorno do investimento foi Belo Horizonte, em aproximadamente 8 meses e meio, já a cidade de Curitiba, por volta de 2 meses e meio.

Na Tabela 16 temos o custo da energia gerada, o LCOE, para ambos os sistemas.

Tabela 16 - LCOE das usinas fotovoltaicas.

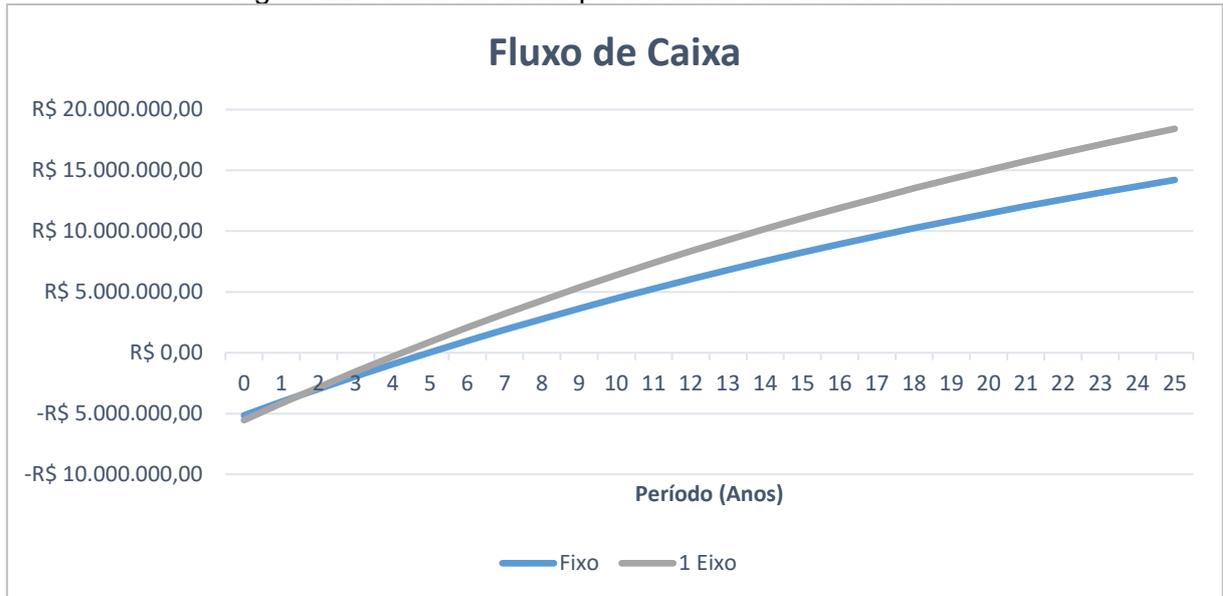
Cidades brasileiras	Irradiação Direta kWh/m ² /dia	LCOE (R\$/kWh)		
		Fixo	1 Eixo	Aumento
Belo Horizonte	5,08	0,18	0,20	11,14%
Belém	3,11	0,20	0,23	17,74%
Boa Vista	3,60	0,19	0,22	14,35%
Bom Jesus da Lapa	6,02	0,17	0,19	11,83%
Brasília	4,76	0,18	0,20	15,78%
Campo Grande	4,89	0,18	0,21	16,02%
Cuiabá	4,22	0,19	0,23	18,06%
Curitiba	3,35	0,22	0,27	22,53%
Florianópolis	3,90	0,20	0,24	21,65%
Fortaleza	4,37	0,18	0,20	13,20%
Jacareacanga	3,16	0,22	0,26	21,10%
Manaus	3,13	0,22	0,26	17,36%
Petrolina	5,02	0,17	0,19	11,68%
Porto Nacional	5,12	0,18	0,21	15,66%
Porto Velho	3,44	0,21	0,25	19,57%
Recife	4,16	0,18	0,21	14,97%
Rio de Janeiro	4,41	0,18	0,22	19,92%
Salvador	4,60	0,19	0,21	13,99%
Santa Maria	3,84	0,20	0,24	19,36%
São Paulo	3,49	0,20	0,25	21,99%

Fonte: elaborado pelo autor.

O custo por kWh produzido reproduziu uma tendência onde os melhores resultados são nas cidades de maior radiação direta por dia. Entretanto, o uso do rastreador encareceu o custo da energia, devido ao maior custo de implementação e de O&M, de 11,14% a 22,53%. Como uma das premissas era manter a mesma potência do sistema, a energia encareceu, porém como visto nos outros indicadores financeiros, o retorno monetário foi maior pois é produzido mais energia com a mesma potência do sistema fotovoltaico.

Pelos resultados obtidos, a cidade de Belo Horizonte apresentou um maior benefício na utilização do rastreador solar e pode ser visto o fluxo de caixa descontado a TMA na Figura 22. No período inicial, a usina com estrutura fixa apresenta um custo inicial menor, em contrapartida a usina com rastreador se sobressai a partir do ano 2, e no fim da vida útil do sistema, apresenta uma diferença significativa.

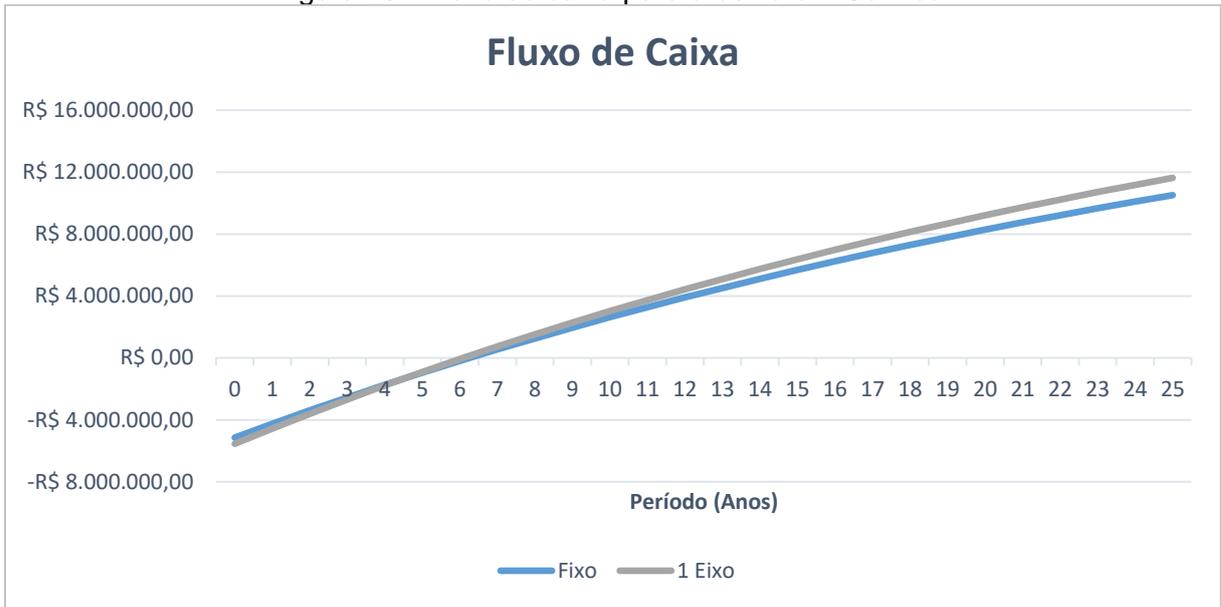
Figura 22 - Fluxo de caixa para a usina em Belo Horizonte.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 23, apresenta o fluxo de caixa para a cidade de Curitiba, que apresentou menores benefícios financeiros na utilização do rastreador pelo fixo. Observando o gráfico, é possível perceber que apenas no quinto ano o sistema com 1 eixo superou o sistema fixo, além disso, após 25 anos, foram obtidos valores que diferem em 10,65%, que representa um ganho três vezes o valor do investimento adicional no rastreador solar, ainda tornando viável a opção da estrutura móvel de fixação dos módulos fotovoltaicos.

Figura 23 - Fluxo de caixa para a usina em Curitiba.



Fonte: elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

A partir de simulações no software SAM, foi possível obter dados de geração de energia de usinas com e sem rastreador solar em diferentes regiões do Brasil e correlacionar com a radiação direta. Os dados mostraram que para todas as condições definidas, a utilização de rastreador solar aumentou a eficiência dos sistemas, de 20% com 1 eixo e 27% com 2 eixos. Entretanto, a utilização dos rastreadores solares se torna mais eficiente para maiores valores da componente direta, e comprovou-se que o aumento de produtividade está correlacionado com a componente direta da radiação solar. Para usinas que já vão utilizar rastreador solar, a comparação entre 1 e 2 eixos na questão energética não apresentou nenhuma tendência ou conclusão, logo é necessário analisar caso a caso e atender às características do local, como inclinação do terreno, orientação e sombreamento.

A análise econômica das usinas fixas e com rastreadores de 1 eixo, possibilitou analisar as tendências das diferentes estruturas de fixação. Em geral, nas cidades de maiores radiações direta medida, apresentaram as maiores melhoras nos parâmetros econômicos, elevando o VPL e o TIR em média 20,08% e 1,99% respectivamente, e reduzindo o tempo de retorno do investimento aproximadamente 8,72%, todavia, o LCOE piorou na média de 16,90%. Nessa perspectiva, a utilização do rastreador de 1 eixo se mostra vantajoso financeiramente, porém é importante avaliar o LCOE da usina, ainda que seja um importante parâmetro na rentabilidade do modelo de negócio, uma vez que o ganho financeiro e viabilidade econômica da usina depende da diferença do custo de produção da energia elétrica e o preço da comercialização dessa energia gerada.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho apresentado, recomenda-se alguns temas para futuros trabalhos:

- Aprofundar e relacionar de outras maneiras a correlação da componente direta da radiação solar com o aumento de produtividade;
- Realizar dois estudos de caso, um para a melhor cidade, outro para a pior cidade, quanto aos índices de mérito econômico;
- Fazer a análise econômica com os rastreadores solares de 2 eixos.

REFERÊNCIAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** Jun., 2012.

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Infográfico.** Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 30/11/2022.

ALVES, João Paulo Gomes. **Requisitos para a Certificação PV.** Dissertação/Relatório de Projeto (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº482/2012.** Abr., 2012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Anexo III da Resolução Normativa ANEEL nº 956 - Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 3 - conexão ao sistema de distribuição de energia elétrica.** Dez., 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899:** Energia solar fotovoltaica — Terminologia. Rio de Janeiro, 2020.

CORTEZ, José Monteiro. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica.** Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.

FROSI, F.; CHESINI, D.; GABE, I. J.; BONA, J. C. **Análise comparativa da produção de energia de um seguidor solar de dois eixos para a região de Farroupilha - RS.** VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018. Gramado, 2018.

DUARTE, Thiago de Souza. **Estudo de viabilidade de uma usina solar de 5 MW com tracker.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2021.

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída - Mercado Fotovoltaico - 1º Semestre 2022 | Brasil.** 2022; Disponível em: <https://greener.com.br/>. Acesso em: 05/09/2022.

HOFFMANN, F. M.; MOLZ, R. F.; KOTHE, J. V.; NARA, E. O. B.; TEDESCO, L. P.C. Monthly Profile Analysis Based on a Two-Axis Solar Tracker Proposal For Photovoltaic Panels. **Renewable Energy**, v. 115, p. 750-759, 2018.

KROTH, Geóvio. **Análise de Indicadores de Desempenho e de Qualidade de Energia de um Sistema Fotovoltaico com Distintos Fatores de Dimensionamento de Inversor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2011.

LIMA, Luiz Carlos A; SARRADE, Laurent. **Como otimizar a produção e a eficiência de usinas fotovoltaicas com o uso de rastreadores solares**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS 2016. Belo Horizonte, 2016.

LIRA, José Rômulo Vieira. **Desenvolvimento de um Rastreador Solar do Tipo Polar com Ajuste do Ângulo de Inclinação**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; DE LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; DE ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; DE SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

INSTITUTO ACENDE BRASIL (2020). **Evolução das Tarifas de Energia Elétrica e a Formulação de Políticas Públicas**. *White Paper 22*, São Paulo, 28 p.

NUBANK. **O que é Taxa Selic e como ela afeta seu dinheiro?**. Disponível em: <https://blog.nubank.com.br/taxa-selic/>. Acesso em: 20/10/2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

PORTAL ENERGIAS RENOVÁVEIS, **Diferenças entre seguidores solares de eixo único e eixo duplo**. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/diferencas-seguidores-solares-eixo-unico-eixo-duplo/>. Acesso em: 10/11/2022.

SILVA, Gabriel Francisco da. *et al.* **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro**. Associação Acadêmica de Propriedade Intelectual – API. Aracaju, 2019.

SILVA, Milena Paim; RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Influência da radiação direta do desempenho de um sistema fotovoltaico fixo e com rastreador solar.** 5º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul. Araranguá, 2016.

STROSKI, P. N. **Como painéis solares fotovoltaicos funcionam? (Parte 2).** Disponível em: <http://www.electricalibrary.com/2017/07/31/como-paineis-solares-fotovoltaicos-funcionam-parte-2/>. Acesso em: 01/10/2022.