



Universidade de Brasília - UnB

**Análise de sensibilidade local e global na
avaliação técnico-econômica de usinas
fotovoltaicas**

Lucas Trigueiro Santana

Brasília, fevereiro de 2023

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
Graduação em Engenharia Elétrica

Lucas Trigueiro Santana

Análise de sensibilidade local e global na avaliação técnico-econômica de usinas fotovoltaicas

Orientador: Prof. Dr. Anésio de Leles Ferreira Filho

Coorientador: Prof. Elder Geraldo Domingues

Coorientador: Prof. Wesley Rodrigues de Oliveira

Projeto apresentado para o Departamento de Energia Elétrica da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Brasília
2023**

Banca Examinadora

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, ENE/UnB _____

Orientador

Prof. João Yoshiyuki Ishihara, ENE/UnB _____

Examinador Interno

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, ENE/UnB _____

Examinador Interno

Ficha Catalográfica

Santana, Lucas Trigueiro

Análise de sensibilidade local e global na avaliação técnico-econômica de usinas fotovoltaicas.
/ Lucas Trigueiro Santana; Prof. Dr. Anésio de Leles Ferreira Filho; Prof. Elder Geraldo Domingues; Prof. Wesley Rodrigues de Oliveira. – Brasília, 2023. 53 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Elétrica) - - Universidade de Brasília, 2023.

1. Análise de sensibilidade. 2. Modelo estocástico. 3. Viabilidade econômica. 4. Energia renovável. 5. Energia solar fotovoltaica. 6. Ambiente de contratação regulada.

Resumo

Nos últimos anos, a necessidade de se diversificar as fontes de energia tem criado uma oportunidade para se aumentar a produção de energia renovável. O aumento da demanda energética global é impulsionado pelo crescimento populacional e desenvolvimento econômico, entretanto a maior parcela da geração de energia provém da queima de combustíveis fósseis, tornando necessário o investimento em fontes renováveis e limpas. Novas políticas têm sido implementadas para impulsionar a utilização de energias limpas e observa-se um aumento significativo no ramo da geração fotovoltaica, especialmente no Brasil, onde há elevados valores de irradiação solar. É necessário consolidar estudos precisos sobre a viabilidade técnica e econômica da tecnologia para criar um ambiente propício e atrativo para investidores do setor energético, ressaltando suas vantagens, retornos e riscos associados. Neste contexto, este trabalho concentra-se na execução de uma análise de riscos da viabilidade técnica e econômica de uma usina fotovoltaica, e ainda, na avaliação comparativa dos resultados das análises de sensibilidade local e global deste tipo de empreendimento. Para tanto, são empregados processos aleatórios baseados em séries históricas para se obter os resultados técnicos ao longo da vida útil da usina. A avaliação da viabilidade econômica é executada empregando-se a energia gerada e indicadores financeiros como o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno Modificada e o Custo Nivelado de Energia. A modelagem do fluxo de caixa considera a venda de energia no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Após a análise inicial, são efetuadas análises de sensibilidade local e global para os parâmetros técnicos e financeiros que afetam a viabilidade financeira, a saber, o preço de venda de energia no ACR, as taxas de câmbio do dólar e do euro, o custo médio ponderado de capital, a eficiência nominal e o fator de degradação dos módulos fotovoltaicos. A comparação entre as duas metodologias de análise de sensibilidade mostra que a análise global é mais precisa para classificar e avaliar a influência dos parâmetros em um modelo, pois ela considera todo o espaço amostral dos fatores de entrada, sem dependência de um ponto específico.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, Modelo estocástico, Viabilidade econômica, Energia renovável, Energia solar fotovoltaica, Ambiente de contratação regulada.

Abstract

In recent years, the need to diversify energy sources has created an opportunity to increase renewable energy production. The increase in global energy demand is driven by population growth and economic development, however the majority of energy generation comes from burning fossil fuels, making investment in renewable and clean sources necessary. New policies have been implemented to boost the use of clean energy, and there is a significant increase in photovoltaic generation, especially in Brazil, where there are high values of solar irradiation. It is necessary to consolidate accurate studies on the technical and economic feasibility of the technology to create a favorable and attractive environment for investors in the energy sector, highlighting its advantages, returns, and associated risks. In this context, this study focuses on the execution of a risk analysis of the technical and economic viability of a photovoltaic plant, and also on the comparative evaluation of the results of local and global sensitivity analyses of this type of investment. To this end, random processes based on historical series are employed to obtain the technical results over the lifetime of the plant. The evaluation of economic viability is carried out using the energy generated and financial indicators such as Net Present Value, Modified Internal Rate of Return, and Levelized Cost of Energy. The cash flow modeling considers the sale of energy in the Regulated Contracting Environment (ACR). After the initial analysis, local and global sensitivity analyses are performed for the technical and financial parameters that affect financial viability, namely the selling price of energy in the ACR, the dollar and euro exchange rates, the weighted average cost of capital, the nominal efficiency and the degradation factor of the photovoltaic modules. The comparison between the two sensitivity analysis methodologies shows that the global analysis is more accurate for classifying and evaluating the influence of the parameters in a model, as it considers the entire sample space of the input factors, without dependence on a specific point.

Keywords: Sensitivity analysis, Stochastic model, Economic feasibility, Renewable energy, Solar photovoltaic energy, Regulated contracting environment.

Dedicatória

Aos meus pais, Joana e Francisco, sou grato por todo amor, incentivo e ajuda durante o período de minha graduação e execução deste trabalho

Agradecimentos

Gostaria de agradecer meus pais, Joana e Francisco, agradeço por todo o amor, apoio e incentivo que me deram ao longo dos anos. Eles foram minha base, sempre acreditando em mim e me incentivando a alcançar meus sonhos.

Em seguida, aos meus amigos, Paula, Maycon, Paulo, Bianca, Lara, Noemy e Débora, que também são importantes na minha vida, gostaria de agradecer a eles por toda a amizade, confiança e apoio que sempre me deram.

Aos meus colegas de faculdade, Vini, Thiaguinho, Gustavo, Railson, Li, Thiagão, Dani, Anne, Xulinha e Helenística, obrigado por toda a colaboração e aprendizado que tivemos juntos. Gostaria de agradecer à ENETEC, que me permitiu desenvolver minhas habilidades profissionais e me preparou para os desafios da vida real, e colegas de empresa por terem me acompanhado nessa jornada.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Anésio de Leles Ferreira Filho, Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues e Prof. Dr. Wesley Rodrigues de Oliveira pelo apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a FAP-DF pelo apoio via projeto aprovado no edital 04/2021 - Demanda Espontânea.

Lista de Figuras

1	Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.	10
2	Geração de eletricidade por fonte no mundo 1990-2020.	11
3	Radiação solar em um módulo fotovoltaico.	12
4	Fluxograma da metodologia da análise técnico-econômica	25
5	Fluxograma da análise de sensibilidade	26
6	Distribuições das variáveis estocásticas para 1000 cenários de um dia: (a) Ir-radiância solar; (b) Temperatura ambiente; (c) Velocidade do vento.	29
7	Valor esperado e o desvio padrão da energia anual gerada para cada ano	36
8	Gráficos de distribuições de probabilidade dos indicadores de viabilidade econômica: (a) VPL; (b) LCOE; (c) TIRM.	37
9	Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função da Eficiência Nominal dos Módulos: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.	39
10	Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função do Fator de Degradação: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.	40
11	Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função do Preço de Venda de Energia: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.	41
12	Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função do Custo Médio Ponderado de Capital - WACC: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.	42
13	Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função da Taxa de Câmbio do Dólar: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.	43
14	Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função da Taxa de Câmbio do Euro: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.	45
15	Síntese da sensibilidade do VPL pela análise local	46
16	Gráficos de dispersão das variáveis aleatórias de entrada em relação ao VPL: (a) VPL x Taxa de Câmbio do Dólar; (b) VPL x Taxa de Câmbio do Euro; (c) VPL x Fator de Degradação; (d) VPL x Eficiência Nominal dos Módulos; (e) VPL x Preço de Venda de Energia no ACR; (f) VPL x WACC.	47

Lista de Tabelas

1	Variáveis estocásticas e aleatórias	28
2	Parâmetros do módulo fotovoltaico	28
3	Modelo FCLA	31
4	Regime de tributação: Lucro Presumido	32
5	Variáveis estudadas na análise de sensibilidade	32
6	Valores mínimos e máximos adotados para a análise de sensibilidade local	33
7	Parâmetros técnicos da usina estudada	35
8	Valor esperado e desvio padrão dos indicadores de viabilidade econômica	38
9	Valor Médio fixado para cada variável	38
10	Índices de sensibilidade de primeira ordem (S_i) e efeito total (S_{T_i}) em relação ao VPL	48

Sumário

1 Introdução	7
1.1 Contextualização	7
1.2 Estado da arte	7
1.3 Objetivos	8
1.4 Estrutura dos capítulos	8
2 Referencial teórico	10
2.1 Considerações iniciais	10
2.2 Matriz energética brasileira e mundial	10
2.3 Energia solar fotovoltaica	11
2.3.1 Radiação solar	12
2.4 Usina fotovoltaica conectada à rede e principais componentes	12
2.4.1 Células fotovoltaicas	13
2.4.2 Módulos fotovoltaicos	13
2.4.3 Inversores	13
2.5 Análise de sensibilidade	13
2.5.1 Visão geral	13
2.5.2 Global e local	14
2.5.3 Índices de sensibilidade	14
2.5.4 Índices de sensibilidade de primeira ordem	14
2.5.5 Índices de sensibilidade de ordem maior	16
2.5.6 Efeito Total	16
2.6 Análise de viabilidade econômica	17
2.6.1 Modelagem do fluxo de caixa	17
2.6.2 Custo de oportunidade	20
2.6.3 Indicadores de viabilidade econômica	20
2.7 Considerações finais	23
3 Metodologia	24
3.1 Considerações iniciais	24
3.2 Visão geral	24

3.3 Detalhamento das etapas	26
3.3.1 Obtenção da energia anual	26
3.3.2 Fluxo de caixa e indicadores de viabilidade econômica	30
3.3.3 Análise de sensibilidade	32
3.4 Considerações finais	33
4 Resultados	35
4.1 Considerações iniciais	35
4.2 Usina fotovoltaica adotada.	35
4.3 Análise técnico-econômica	35
4.3.1 Análise técnica	35
4.3.2 Análise econômica	36
4.4 Análise de sensibilidade	38
4.4.1 Análise de sensibilidade local	38
4.4.2 Síntese da análise local	45
4.4.3 Análise de sensibilidade global	46
4.5 Comparação entre as análises	48
4.6 Considerações finais	49
5 Conclusão	50
Referências	52

1 Introdução

1.1 Contextualização

A atual situação energética global apresenta um crescimento de demanda devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico mundial. Tendo em vista que a maior parcela de produção de energia no mundo hoje é proveniente da queima de combustíveis fósseis (IEA, 2022a), existe uma emergente necessidade de geração de energia via fontes renováveis e limpas. Com isso, novas políticas nos mercados de energia vem sendo implementadas para impulsionar a utilização de energia limpa (IEA, 2022c).

Nesse contexto, observa-se no Brasil um aumento significativo dos sistemas de geração fotovoltaica, visto que o Brasil é um dos países com fatores climáticos mais favoráveis à integração de fontes de energia solar, principalmente, no que se refere aos elevados valores de irradiação solar.

No entanto, para a criação de um ambiente propício e atrativo para investidores do setor de geração fotovoltaica, faz-se necessária a consolidação de estudos precisos quanto à viabilidade técnica e econômica da tecnologia, ressaltando suas vantagens, retornos e riscos associados (OLIVEIRA, 2020). Por meio de estudos econômicos juntamente com análises de sensibilidade, é factível entender quais são os principais fatores que impactam na viabilidade desse ambiente.

Dentro do âmbito da análise de sensibilidade, existem diferentes alternativas para se alcançar os resultados desejados, todas com suas vantagens e desvantagens, desde a precisão dos dados obtidos até o custo computacional. Tudo isso deve ser levado em consideração ao se trabalhar com esse tipo de metodologia.

1.2 Estado da arte

Há na literatura diversos estudos vinculados à análise de viabilidade técnica e econômica da instalação de sistemas fotovoltaicos em regiões de elevados potenciais energético (BARBOSA, 2015; NETO; DOMINGUES; PINTO, 2018; NETO et al., 2017). Isso inclui avaliar fatores como a disponibilidade de radiação solar, a topografia da região, as condições climáticas, dentre outros aspectos.

Observa-se que, na literatura, a principal ferramenta empregada para simulações de plantas solares tem sido o software *System Advisor Model* (SAM), desenvolvido pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (DIAS et al., 2021; TORRES, 2021). O SAM é referência em estudos de viabilidade técnica e econômica, abrangendo modelos de simulação não apenas de usinas solares, mas também de geração eólica, geotérmica, biomassa e maremotriz. Entretanto, ele não abrange uma questão importante no quesito de viabilidade que é a análise de sensibilidade

do modelo utilizado.

No tocante à avaliação econômica de plantas solares, o levantamento da literatura atinente também aponta para a escassez de trabalhos que empregam análises de sensibilidade compostas pelos indicadores de viabilidade às alterações em parâmetros técnicos e econômicos das plantas (OLIVEIRA, 2020; COSTA et al., 2016; NETO et al., 2018; PINTO et al., 2020). A compreensão de como as condições de operação e a estrutura do mercado influenciam nos custos, despesas e receitas de uma usina é crucial, principalmente, no âmbito de políticas de incentivo à geração. O contexto apresentado cria uma demanda por estudos que possam preencher as lacunas ora identificadas. A análise de sensibilidade fornece informações fundamentais sobre como o modelo age, sua estrutura e como ele reage a variações nas entradas. Vários métodos de análise de sensibilidade foram desenvolvidos, resultando em uma ampla e crescente literatura (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016).

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho constitui-se na avaliação comparativa entre os resultados oriundos da utilização da análise de sensibilidade local e global no estudo técnico e econômico de uma usina fotovoltaica de grande porte. Neste estudo, considera-se: i) A negociação da energia gerada no Ambiente de Contratação Regulada (ACR); ii) Os sistemas de tributação em território nacional; iii) A legislação do setor elétrico; iv) A estrutura do mercado financeiro. Para tanto, é abarcada a caracterização do modelo de geração fotovoltaica, considerando-se todos os parâmetros pertinentes e séries históricas que definem o comportamento estocástico da geração fotovoltaica e do mercado. Ademais, para se executar a análise técnica-econômica, é descrito o modelo de fluxo de caixa ajustado à realidade do setor elétrico brasileiro, considerando os sistemas de tributação, os encargos setoriais, os aspectos de comercialização de energia e as especificidades de cada topologia.

Por fim, são explicitadas e conduzidas as análises de sensibilidade, visando-se identificar os parâmetros mais críticos do sistema.

1.4 Estrutura dos capítulos

O estudo encontra-se dividido de forma a proporcionar ao leitor o entendimento da problemática em questão, e ainda, das soluções propostas para se atender aos objetivos ora destacados. Para tanto, têm-se os seguintes capítulos:

- Capítulo 2: Referencial teórico - Parte deste capítulo é dedicado à apresentação dos conceitos das matrizes energéticas nacionais e globais. Em seguida, os componentes e o funcionamento de uma usina fotovoltaica conectada à rede são discutidos. Por fim, alguns aspectos relacionados às análises de viabilidade econômica e de sensibilidade são introduzidos.

-
- **Capítulo 3: Metodologia** - Neste capítulo, são detalhados os procedimentos adotados para a consecução dos objetivos propostos. No início do capítulo, é exibida a visão geral da metodologia adotada neste trabalho. Logo em seguida, o equacionamento empregado para modelagem da usina é especificado e então, o modelo de fluxo de caixa é apresentado. Por fim, são explicitados os métodos utilizados para o cálculo dos indicadores de viabilidade econômica e a estratégia empregada para a realização das análises de sensibilidade local e global.
 - **Capítulo 4: Resultados** - Esse capítulo é dedicado à apresentação dos resultados técnicos e econômicos alcançados neste trabalho, e ainda, aqueles referentes às análises de sensibilidade executadas.
 - **Capítulo 5: Conclusões** - Este capítulo apresenta um resumo da metodologia adotada e suas limitações, além de exibir as conclusões, contribuições e as propostas de trabalhos futuros.

2 Referencial teórico

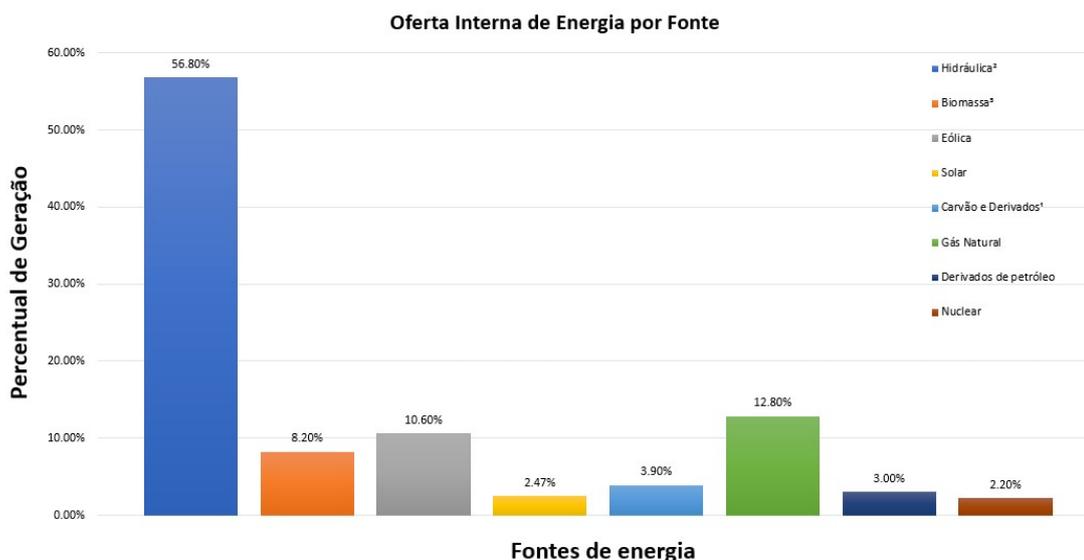
2.1 Considerações iniciais

Esse capítulo é dedicado à apresentação dos principais conceitos necessários ao entendimento do trabalho. Inicialmente, detalha-se o estado atual da matriz energética brasileira e mundial. Em seguida, os conceitos mais importantes acerca dos sistemas fotovoltaicos, especialmente os de geometria solar e radiação, são apresentados. Por fim, conceitos cruciais para realização de uma análise de sensibilidade e de viabilidade econômica são discutidos.

2.2 Matriz energética brasileira e mundial

A matriz energética brasileira é composta principalmente por fontes renováveis, como hidroelétricas, biomassa, solar e eólica. De acordo com a Figura 1, retirada do relatório do balanço energético nacional de 2022 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2021, a geração hídrica representou cerca de 56,8% da produção total de energia no país, seguida pela biomassa com cerca de 8,2%, e pela eólica e solar, com 10,6% e 2,47%, respectivamente (ANEEL, 2022). A energia térmica, que inclui fontes como carvão e gás natural, representou cerca de 3,9% da produção total de energia no mesmo ano. As fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil (resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações).

Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.



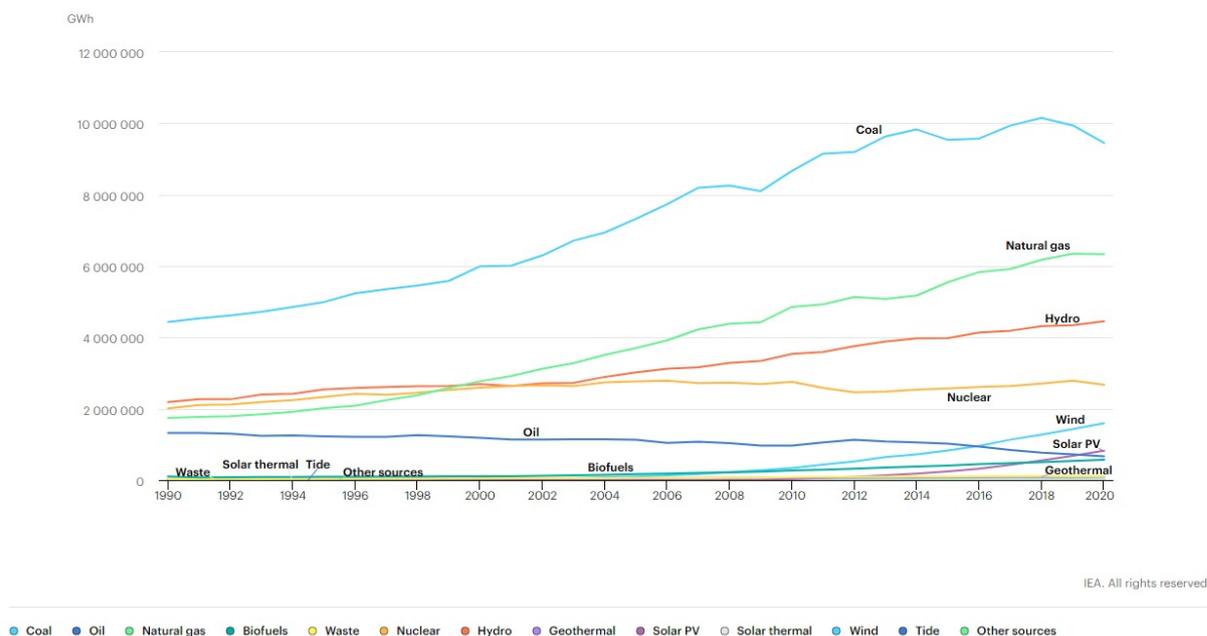
Notas:

1. Inclui gás de coqueira
2. Inclui importação de eletricidade
3. Inclui lenha, bagaço da cana, lixívia e outras recuperações

Fonte: (ANEEL, 2022)

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), em 2020, houve um aumento na geração de energias renováveis, liderados pela solar e eólica. Tais fontes apresentaram um crescimento de 23% e 12%, respectivamente. Além disso, a demanda por energias não-renováveis foi reduzida em mais de 3% no mesmo ano (IEA, 2022b). Entretanto, mais de 50% da matriz energética mundial é gerada com base na da queima de combustíveis fósseis (IEA, 2022a), como observado na Figura 2. Segundo a IAE, novas políticas nos principais mercados de energia ajudarão a impulsionar o investimento anual em energia limpa para mais de 2 trilhões de dólares até 2030 (IEA, 2022c).

Figura 2: Geração de eletricidade por fonte no mundo 1990-2020.



Fonte: (IEA, 2022a)

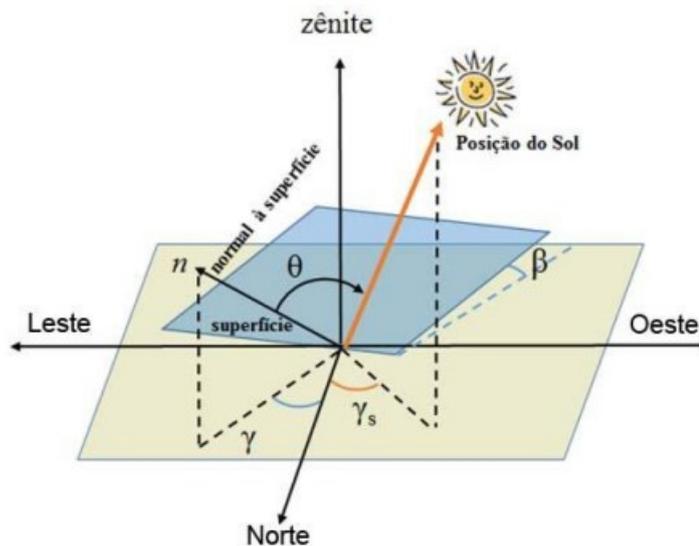
2.3 Energia solar fotovoltaica

A queima de combustíveis fósseis tem causado uma série de impactos no meio ambiente, como aquecimento global, poluição do ar, chuvas ácidas, entre outros. Mediante a isso, a necessidade do desenvolvimento de tecnologias de geração de energia limpa e renovável tem se tornado um tópico de interesse político, econômico e ambiental. A captura de energia solar por meio de placas fotovoltaicas é uma solução que tem se mostrado promissora, com pesquisas sobre energia solar sendo desenvolvidas sobre materiais usados, consumo de energia, modelo dos equipamentos, etc., de forma a otimizar a eficiência das células que convertem a radiação solar em eletricidade (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

2.3.1 Radiação solar

Os dados da radiação solar fornecem informações sobre quanto de incidência do sol atinge uma superfície em um local na terra durante um determinado período de tempo. Esses dados são necessários para uma pesquisa eficaz na utilização da energia solar. A radiação solar é calculada com base nos ângulos de inclinação do sol e dos ângulos da superfície (GILMAN, 2015). Os ângulos do sol variam com o passar do dia e são dependentes da posição da Terra.

Figura 3: Radiação solar em um módulo fotovoltaico.



Fonte: (PINHO; GALDINO et al., 2014)

Os ângulos de superfície, no contexto de sistemas fotovoltaicos, são referentes à inclinação das placas no plano terrestre e sua rotação em relação ao polo magnético, o azimute, como explicitado na Figura 3.

2.4 Usina fotovoltaica conectada à rede e principais componentes

Uma usina fotovoltaica conectada à rede, conhecida como um sistema *on-grid*, é um sistema onde a energia gerada é injetada na rede. Então por meio de um sistema de compensação de energia elétrica, a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro-geração ou mini-geração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2015). Além disso, é regulamentada a venda de energia excedente dentro de uma mesma concessão ou permissão, por pessoa física ou jurídica que possua unidade consumidora com micro-geração ou mini-geração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será

compensada. Um sistema fotovoltaico conectado à rede utiliza módulos fotovoltaicos como fonte geradora de energia, que são compostos por células solares. Ademais, usinas fotovoltaicas conectadas à rede também podem vender energia nos ambiente de contratação livre ou regulado do mercado de energia elétrica brasileiro. A energia produzida pelos módulos é transmitida a um inversor, que faz a conversão da potência de saída em corrente contínua dos módulos para uma potência em corrente alternada, compatível com a rede elétrica (BARBOSA, 2015).

2.4.1 Células fotovoltaicas

A célula funciona baseada no efeito fotovoltaico, gerando corrente elétrica e uma diferença de potencial em seus terminais ao ser exposta à radiação solar. Basicamente, quando a luz solar brilha sobre a célula, elétrons dos átomos de certo material semicondutor liberam-se e ficam disponíveis para se mover ao longo de um circuito elétrico fechado, que contenha alguma carga.

2.4.2 Módulos fotovoltaicos

O módulo, ou painel fotovoltaico, é o conjunto de várias células solares, montadas sobre uma estrutura rígida e ligadas eletricamente. A depender da finalidade e tipo de sistema, ajusta-se a quantidade de módulos em um arranjo série e paralelo, definindo-se potência, tensão e corrente desejadas.

2.4.3 Inversores

Os inversores são dispositivos para converter a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), fornecendo uma potência de saída com tensão, frequência e demais parâmetros devidamente adequados à rede elétrica. No caso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, os inversores trabalham como fontes de corrente, injetando na rede uma corrente senoidal sincronizada com a tensão local.

2.5 Análise de sensibilidade

2.5.1 Visão geral

A análise de sensibilidade pode ser definida como o estudo da maneira com que a incerteza na saída de um modelo (numérico ou não) pode ser rateada para diferentes fontes de incerteza na entrada do modelo (SALTELLI et al., 2004). Esse tipo de análise auxilia no estudo da robustez do sistema, permitindo a identificação das variáveis mais críticas do sistema.

2.5.2 Global e local

Dentro do âmbito da análise de sensibilidade, existem diferentes formas de se obter os resultados desejados. Dentre eles encontram-se as análises local e global. A análise de sensibilidade local considera a variação de uma única variável de entrada e sua influência na saída. Ela é útil para entender como o modelo responde a pequenas perturbações nas variáveis de entrada e para identificar quais são as variáveis mais sensíveis do processo. Essa análise apresenta limitações, pois ela apenas dispõe de informações sobre o ponto onde ela é computada, não considerando o resto do espaço de entrada (SALTELLI et al., 2008). Em contrapartida, a análise de sensibilidade global considera diversos pontos no espaço de entrada para computar os resultados. Essa análise é mais robusta e informativa. Entretanto, ela apresenta um custo computacional mais elevado, o que aumenta exponencialmente com o número de variáveis estudada.

2.5.3 Índices de sensibilidade

Dentro dos estudos da análise de sensibilidade existem diferentes índices que explicitam certas informações sobre as variáveis do modelo. Por meio de práticas que utilizam métodos baseados em variância, é possível obter os índices que indicam os efeitos principais de uma variável (S_i) e seu efeito total (S_{Ti}) (SALTELLI et al., 2008). Têm-se ainda outros índices de sensibilidade, a saber: o *Elementary Effect method* (EET) e o método *Regionalized Sensitivity Analysis* (RSA). O EET é uma extensão global do método local *One-At-the-Time* (OAT). No RSA as amostras das variáveis de entrada são agrupados em dois grupos, então suas funções de densidade acumulada de probabilidade (CDF) são calculadas e comparadas. Esses índices apresentam valores de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior é o grau de influência que a variável apresenta na saída do modelo.

2.5.4 Índices de sensibilidade de primeira ordem

Por meio dos métodos de variância, são calculados os índices de primeira ordem da análise de sensibilidade (SALTELLI et al., 2008). Para um modelo genérico $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$, cada valor de X apresenta um limite de variância ou incerteza não nula, e deseja-se saber o que acontece com a incerteza de Y ao se fixar um fator.

Fixando X_i em um valor x_i^* , tem-se a denominada variância condicional:

$$V_{x \sim i}(Y|X_i = x_i^*) \quad (2.5.1)$$

Se for feita a média de todos os possíveis pontos x_i^* , sua dependência irá desaparecer. É possível escrever essa definição como $E_{X_i}(V_{x \sim i}(Y|X_i))$, que é inferior a variância da saída $V(Y)$. A equação 2.5.2 exhibe essa relação:

$$E_{X_i}(V_{x \sim i}(Y|X_i)) + V_{X_i}(E_{x \sim i}(Y|X_i)) = V(Y) \quad (2.5.2)$$

Assim, é possível obter o coeficiente de sensibilidade de primeira ordem, cujo valor é dado entre 0 e 1.

$$S_{X_i} = \frac{V_{X_i}(E_{x \sim i}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (2.5.3)$$

Para computar esse índice, inicialmente define-se a matriz de Monte Carlo para o modelo estudado:

$$\begin{bmatrix} X_1^{(1)} & X_2^{(1)} & \dots & X_k^{(1)} \\ X_1^{(2)} & X_2^{(2)} & \dots & X_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{(N-1)} & X_2^{(N-1)} & \dots & X_k^{(N-1)} \\ X_1^{(N)} & X_2^{(N)} & \dots & X_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2.5.4)$$

É calculado cada valor $Y^{(i)} = f(X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)})$, e então a variância $V(Y)$ entre os valores obtidos. Em sequência, é feito o condicionamento da variável X_i selecionada para estudo, fixando seu valor em cada $X_i^{(j)}$, com $j = \{1, 2, \dots, N\}$, da amostra e computando a saída para cada caso. Assim, a matriz amostral tem seguinte formato:

$$\begin{bmatrix} X_1^{(1)} & X_2^{(1)} & \dots & X_i^{(1)} & \dots & X_k^{(1)} \\ X_1^{(2)} & X_2^{(2)} & \dots & X_i^{(2)} & \dots & X_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{(j)} & X_2^{(j)} & \dots & X_i^{(j)} & \dots & X_k^{(j)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{(N-1)} & X_2^{(N-1)} & \dots & X_i^{(N-1)} & \dots & X_k^{(N-1)} \\ X_1^{(N)} & X_2^{(N)} & \dots & X_i^{(N)} & \dots & X_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2.5.5)$$

$$\begin{bmatrix} X_1^{(1)} & X_2^{(1)} & \dots & X_i^{(j)} & \dots & X_k^{(1)} \\ X_1^{(2)} & X_2^{(2)} & \dots & X_i^{(j)} & \dots & X_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{(N-1)} & X_2^{(N-1)} & \dots & X_i^{(j)} & \dots & X_k^{(N-1)} \\ X_1^{(N)} & X_2^{(N)} & \dots & X_i^{(j)} & \dots & X_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2.5.6)$$

Assim, para todo $X_i^{(j)}$ condicionado, conforme exposto na equação 2.5.6, é calculada a esperança das N saídas Y computadas. Em sequência obtém-se a variância entre esses valores e por fim encontra-se o índice de sensibilidade de primeira ordem da variável X_i em relação a saída Y , de acordo com a equação 2.5.3.

2.5.5 Índices de sensibilidade de ordem maior

Pode-se calcular os índices de sensibilidade de ordem maior, que consideram o efeito de interação entre dois ou mais parâmetros. Para isso, considera-se a variância condicional utilizando-se mais de uma variável:

$$\frac{V(E(Y|X_i, X_j))}{V(Y)} \quad (2.5.7)$$

Assim, dadas duas variáveis genéricas X_i, X_j ,

$$V(E(Y|X_i, X_j)) = V_i + V_j + V_{ij} \quad (2.5.8)$$

O termo V_{ij} é o termo de interação entre os fatores X_i e X_j . Ele compreende a parte da resposta de Y referente a X_i e X_j que não pode ser escrita como uma sobreposição de efeitos separadamente devido a X_i e X_j .

A somatória de todos os termos não nulos de primeira e segunda ordens resultam em um valor unitário, o que implica na recuperação de toda a variância da saída até mesmo para um modelo não aditivo (SALTELLI et al., 2008).

A análise de sensibilidade de um modelo de k variáveis resulta em:

$$\sum_i S_i + \sum_i \sum_{j>i} S_{ij} + \sum_i \sum_{j>i} \sum_{l>i} S_{ijl} + \dots + S_{123\dots k} = 1 \quad (2.5.9)$$

Para fins computacionais, o procedimento para cálculo dos coeficiente de ordem superior segue conforme exposto na equação 2.5.6, entretanto realizando o condicionamento de duas ou mais variáveis ao mesmo tempo.

2.5.6 Efeito Total

Para o calculo do efeito total, consideram-se todos os fatores exceto um valor fixado. Esse condicionamento, para um modelo de k variáveis, pode ser escrito como:

$$\frac{V(E(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} = \frac{V(E(Y|X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_k))}{V(Y)} \quad (2.5.10)$$

Por analogia, por exemplo, para um modelo de duas variáveis tem-se:

$$\left(1 - \frac{V(E(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)}\right) = S_{X_i} + S_{X_i X_j} \quad (2.5.11)$$

Assim, para um modelo genérico de três variáveis, o efeito total de uma variável é dado por:

$$S_{T1} = \left(1 - \frac{V(E(Y|X_{\sim 1}))}{V(Y)} \right) = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} \quad (2.5.12)$$

$$S_{T2} = S_2 + S_{12} + S_{23} + S_{123}$$

$$S_{T3} = S_3 + S_{13} + S_{23} + S_{123}$$

Uma última observação é que, por regra algébrica:

$$S_{T1} = \left(1 - \frac{V(E(Y|X_{\sim 1}))}{V(Y)} \right) = \left(\frac{E(V(Y|X_{\sim 1}))}{V(Y)} \right) \quad (2.5.13)$$

Assim, para fins computacionais o cálculo dos índices de efeito total para uma variável X_i segue da matriz 2.5.4, entretanto diferente do procedimento realizado para os coeficiente de primeira ordem e ordem maior, é feito o condicionamento de todas as demais variáveis exceto a de estudo.

$$\begin{bmatrix} X_1^{(j)} & X_2^{(j)} & \dots & X_i^{(1)} & \dots & X_k^{(j)} \\ X_1^{(j)} & X_2^{(j)} & \dots & X_i^{(2)} & \dots & X_k^{(j)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{(j)} & X_2^{(j)} & \dots & X_i^{(N-1)} & \dots & X_k^{(j)} \\ X_1^{(j)} & X_2^{(j)} & \dots & X_i^{(N)} & \dots & X_k^{(j)} \end{bmatrix} \quad (2.5.14)$$

Após as alterações na matriz amostral, segue o mesmo procedimento realizado nas seções anteriores, e por fim obtêm-se o coeficiente de efeito total através da equação 2.5.13. Os coeficientes de efeito total apresentam informações sobre o efeito de interações entre as variáveis de entrada, possibilitando uma análise mais acurada sobre sua relação com a saída do modelo.

2.6 Análise de viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica tem como propósitos avaliar retornos e riscos de um determinado investimento. No ramo de geração de energia, são necessárias técnicas qualificadas de determinar um custo seguro para financiar um negócio dessa proporção, visto que se trata de um empreendimento que apresenta retorno diluído na medida que a energia é gerada e vendida.

2.6.1 Modelagem do fluxo de caixa

Dentro do contexto de modelagem econômica, faz-se necessário mensurar de maneira objetiva e completa os retornos de um dado investimento ou o valor real de um negócio no qual se pretende investir (OLIVEIRA, 2020). Um dos métodos utilizados para se calcular esses valores é o Fluxo de Caixa Descontado (FCD). Essa metodologia permite ter um discernimento

do valor presente de um determinado negócio com nível alto de detalhamento e objetividade.

2.6.1.1 Despesas de capitais (CAPEX)

O CAPEX inclui todos os custos diretos (obras civis, equipamentos, conexão e meio ambiente) e indiretos do empreendimento, sem juros durante a construção. Para o contexto de uma usina fotovoltaica, os três itens principais são os módulos, os inversores e o balanço do sistema.

Os módulos fotovoltaicos são os componentes que mais têm reduzido o preço ao longo dos anos, motivado pelo aumento de produção e por políticas de incentivo à utilização de energia de fontes renováveis. Este trabalho considera o custo internacional dos módulos como:

$$CI_{mod} = 0.2 \text{ \$/Wp} \quad (2.6.1)$$

O preço do inversor varia bastante em função da sua aplicabilidade e faixa de potência. O valor utilizado para o custo internacional do inversor neste trabalho é conforme (FRAUNHOFER, 2022):

$$CI_{inv} = 0.03 \text{ €/Wp} \quad (2.6.2)$$

A partir dos custos dos módulos e inversores estimados em valores de referência internacional, é feita a conversão dos valores para a moeda nacional em $R\$/Wp$. Para isso, converte-se o valor de referência internacional com base no câmbio atual e agrega-se a carga tributária:

$$CN_{mod} = CI_{mod} \cdot T_{Cambio} \cdot (1 + CT) \quad (2.6.3)$$

$$CN_{inv} = CI_{inv} \cdot T_{Cambio} \cdot (1 + CT) \quad (2.6.4)$$

Onde:

- CN_{mod} e CI_{mod} são iguais aos custos nacionais e internacionais do módulo, respectivamente, em $R\$/Wp$ e $\$/Wp$;
- CN_{inv} e CI_{inv} são iguais aos custos nacionais e internacionais do inversor, respectivamente, em $R\$/Wp$ e $€/Wp$;
- T_{Cambio} é a taxa de câmbio, em $R\$/\text{\$}$ para os módulos e $R\$/\text{€}$ para os inversores;
- CT é a carga tributária, em %.

O Balanço do sistema ($BoSEF$) para uma estrutura fixa, em $R\$/Wp$, inclui estruturas de sustentação dos módulos, equipamentos elétricos auxiliares, cabos, conexões e a engenharia

necessária para a adequação dos componentes do sistema, assim como custos gerais de instalação e montagem (EPE, 2012). Seu valor é calculado a partir dos custo dos módulos e inversores:

$$BoS_{EF} = \frac{34\% \cdot (CN_{mod} + CN_{inv})}{1 - 34\%} \quad (2.6.5)$$

O cálculo do BoS seria diferente para os casos com estruturas móveis, dependendo do número de eixos (BARBOSA, 2015). Entretanto, neste trabalho, é considerado somente um sistema de estrutura fixa.

Assim, para se obter o custo do CAPEX para uma usina de potência P_{usina} , é efetuado o seguinte cálculo:

$$CAPEX = P_{usina} \cdot (CN_{mod} + CN_{inv}) + BoS_{EF} \quad (2.6.6)$$

2.6.1.2 Despesas operacionais (OPEX)

O OPEX representa o custo anual com operação e manutenção (O&M) de um sistema e deve abranger serviços de engenharia, planejamento, limpeza, reposição de equipamentos, entre outros. Ele reflete a soma dos gastos (custos e despesas) fixos e variáveis, exceto para as fontes despacháveis centralizadamente. Para o cálculo do OPEX para sistemas fotovoltaicos, seu total pode ser dividido entre manutenção preventiva, manutenção corretiva, reserva para reposição de inversores e outros custos. A manutenção preventiva e os outros custos são considerados constantes. Supõe-se que a mão de obra necessária para manutenção corretiva aumente gradativamente conforme se aumenta a complexidade dos sistemas, especificamente para os casos que são utilizadas estruturas móveis. Para um sistema de estruturas fixas convencionais no Brasil, que é o caso estudado neste trabalho, o valor do OPEX é dado por (BARBOSA, 2015):

$$OPEX = 0.02 \cdot CAPEX \quad (2.6.7)$$

2.6.1.3 Carga tributária

A carga tributária brasileira sobre o custo de equipamentos e serviços compreende diversos impostos, incluindo o Imposto de importação (II), ICMS, IPI, PIS, COFINS, ISS, além de fretes e outras taxas. A carga tributária estimada para uma instalação de geração distribuída fotovoltaica está estimada em aproximadamente 25% do valor de venda e montagem dos equipamentos (EPE, 2012).

2.6.1.4 Taxa de Câmbio

Taxa de câmbio é o preço de uma moeda estrangeira medido em unidades ou frações (centavos) da moeda nacional. Por exemplo, se a taxa de câmbio do dólar é 3,10, significa que um dólar dos Estados Unidos custa R\$ 3,10. A taxa de câmbio reflete, assim, o custo de uma moeda em relação à outra.

2.6.1.5 Venda de energia

Existem formas diferentes de abater os investimentos empregados para a geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos. Uma delas é o suprimento da demanda própria, minimizando os gastos com a compra de energia elétrica da concessionária. Outra possibilidade é por meio das receitas obtidas pela venda da energia elétrica excedente através da conexão com a rede de distribuição. No Brasil o mercado de venda de energia apresenta comercialização de energia elétrica em dois ambientes, o Ambiente de Contratação Livre (ACL) composto pelos consumidores livres e especiais, e o Ambiente de Contratação Regulado (ACR), que compreende consumidores cativos.

Neste estudo, a análise de viabilidade econômica é feita considerando-se que a energia produzida pela usina FV é vendida no ACR. O ACR é o segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição, precedidas de licitação, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

2.6.2 Custo de oportunidade

O custo de oportunidade é um termo usado na economia para indicar o custo de algo em termos de uma oportunidade renunciada, ou seja, o dispêndio, até mesmo social, causado pela renúncia do ente econômico, bem como os benefícios que poderiam ser obtidos com base nesta oportunidade renunciada ou, da mais alta renda gerada em alguma aplicação alternativa.

2.6.3 Indicadores de viabilidade econômica

Para esse estudo foram considerados as simulações de $k = 1000$ cenários, onde cada um desses corresponde ao período de vida útil do projeto, que neste trabalho foi de 25 anos.

2.6.3.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) de uma proposta de investimento caracteriza-se, essencialmente, pela transferência para o instante presente dos saldos dos fluxos de caixa descontados

à Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Neste trabalho, foi empregado o *Weighted Average Capital Cost* (WACC) para o valor da TMA no cálculo do VPL, que pode ser obtido da seguinte forma:

$$VPL(k) = \sum_{i=0}^n \frac{FC_i(k)}{(1 + TMA(k))^i} \quad (2.6.8)$$

Onde:

- $VPL(k)$ = Valor Presente Líquido para cada cenário k ;
- $FC_i(k)$ = fluxo de caixa no período i e cenário k ;
- $TMA(k)$ = taxa de desconto (ou custo de oportunidade) aplicada ao fluxo de caixa para cada cenário k ;
- n = Número de intervalos anuais durante a vida útil do projeto.

Assim, é possível obter informações como o valor esperado, desvio padrão e a probabilidade de não retorno do investimento, que por este critério, tem-se a representação da probabilidade dos valores de VPL serem inferiores a zero.

2.6.3.2 Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) simboliza a taxa na qual se igualam as entradas de caixa aos valores investidos no projeto, podendo ser calculada com base no balanço anual, descontando todos os valores para o valor presente. A Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM) é um método de análise da viabilidade econômica que traz os fluxos de caixa negativos ao valor presente líquido e que leva os fluxos de caixa positivos para os valores futuros. A TIRM que permite fixar taxas de reinvestimento mais realistas para os fluxos de caixa intermediários, levando a um cálculo mais correto do rendimento anual do projeto. O valor da TIRM é dado por (OLIVEIRA, 2020):

$$TIRM_{(k)} = \left[\frac{\sum_{i=0}^n FCP_{i(k)} \cdot (1 + R_a)^{n-i}}{\sum_{i=0}^n \frac{|FCN_{i(k)}|}{(1+R_c)^i}} \right]^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (2.6.9)$$

Em que:

- $TIRM_{(k)}$ é a Taxa Interna de Retorno Modificada para o cenário k ;
- $FCP_{i(k)}$ é o fluxo de caixa positivo para o cenário k e período i ;
- $FCN_{i(k)}$ é o fluxo de caixa negativo para o cenário k e período i ;

- R_a é a taxa de aplicação de recursos (% a.a.);
- R_c é a taxa de captação de recursos (% a.a.);

A atratividade do projeto é determinada mediante a comparação entre a TIRM e a TMA. Se a TIRM for maior que a TMA, o projeto é atrativo. Caso contrário, se a TIRM for menor que a TMA, o projeto passa a não ser interessante para o investidor. A partir da distribuição de probabilidade da TIRM pode-se obter o valor esperado e desvio padrão da mesma, bem como a probabilidade da TIRM ser menor que a TMA.

Para os valores das taxas de aplicação e de captação, foram utilizados os valores de custo de capital próprio e de custo de capital de terceiros, respectivamente (OLIVEIRA, 2020):

$$\begin{aligned} R_a &= \text{Igual ao custo de capital próprio} = 7,95\% \text{ a.a.} \\ R_c &= \text{Igual ao custo de capital de terceiros} = 8,34\% \text{ a.a.} \end{aligned} \quad (2.6.10)$$

2.6.3.3 Custo nivelado da eletricidade (LCOE)

Um indicador eficaz para avaliar a viabilidade econômica do setor de energia é o custo nivelado da energia, ou *Levelised Cost of Electricity* (LCOE). O LCOE é dado pela relação dos custos envolvidos e a energia gerada ($R\$/kWh$). Ele indica o quanto que se deve obter de receita por kWh para que seja suficiente cobrir as despesas operacionais, os investimentos, os juros e remunerar os investidores (BARBOSA, 2015).

O LCOE pode ser calculado, como proposto por (BRANKER; PATHAK; PEARCE, 2011), da seguinte forma:

$$LCOE(k) = \frac{\text{Custo ao longo da vida útil para o cenário } k}{\text{Energia gerada ao longo da vida útil para o cenário } k} \quad (2.6.11)$$

$$LCOE(k) = \frac{I_0 + \sum_{i=1}^n C_i(k)/(1 + TMA(k))^i}{\sum_{i=1}^n E_i(k)/(1 + TMA(k))^i} \quad (2.6.12)$$

Onde:

- I_0 é o investimento inicial na data 0;
- $C_i(k)$ é igual aos custos para o cenário k e período i (R\$);
- $E_i(k)$ é igual à energia produzida no cenário k e período i (kWh);

O componente C_t engloba os custos de investimento inicial (CAPEX) e os custos com operação e manutenção (OPEX). Por meio da distribuição de probabilidade do $LCOE$ pode-se obter o valor esperado e desvio padrão.

2.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos acerca da matriz energética nacional e mundial e de uma usina fotovoltaica. Além disso, foram apresentadas as particularidades da análise de sensibilidade e de seus indicadores. Também foi explanada a modelagem econômica utilizada na mensuração do retorno de um investimento, por meio de um detalhamento da modelagem do fluxo de caixa, custo de oportunidade, e os indicadores de viabilidade econômica que são empregados neste estudo.

3 Metodologia

3.1 Considerações iniciais

A metodologia desenvolvida neste trabalho é segmentada em quatro partes. Inicialmente foi efetuada a modelagem dos processos aleatórios por meio de suas séries históricas. Em seguida, é detalhada a modelagem da usina fotovoltaica e, a partir das distribuições obtidas anteriormente, é computada a energia anual.

A análise de viabilidade econômica dos investimentos é efetuada utilizando-se indicadores, como o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno Modificada e o Custo Nivelado de Energia.

Uma análise de sensibilidade local é executada para determinar como parâmetros-chave, como preço de venda de energia, fator de degradação, taxa de câmbio, entre outros fatores, afetam o fluxo de caixa e os indicadores de viabilidade econômica.

Por fim, uma análise de sensibilidade global é realizada para avaliar os efeitos de interação entre os parâmetros-chaves que compõem o modelo do sistema estudado.

3.2 Visão geral

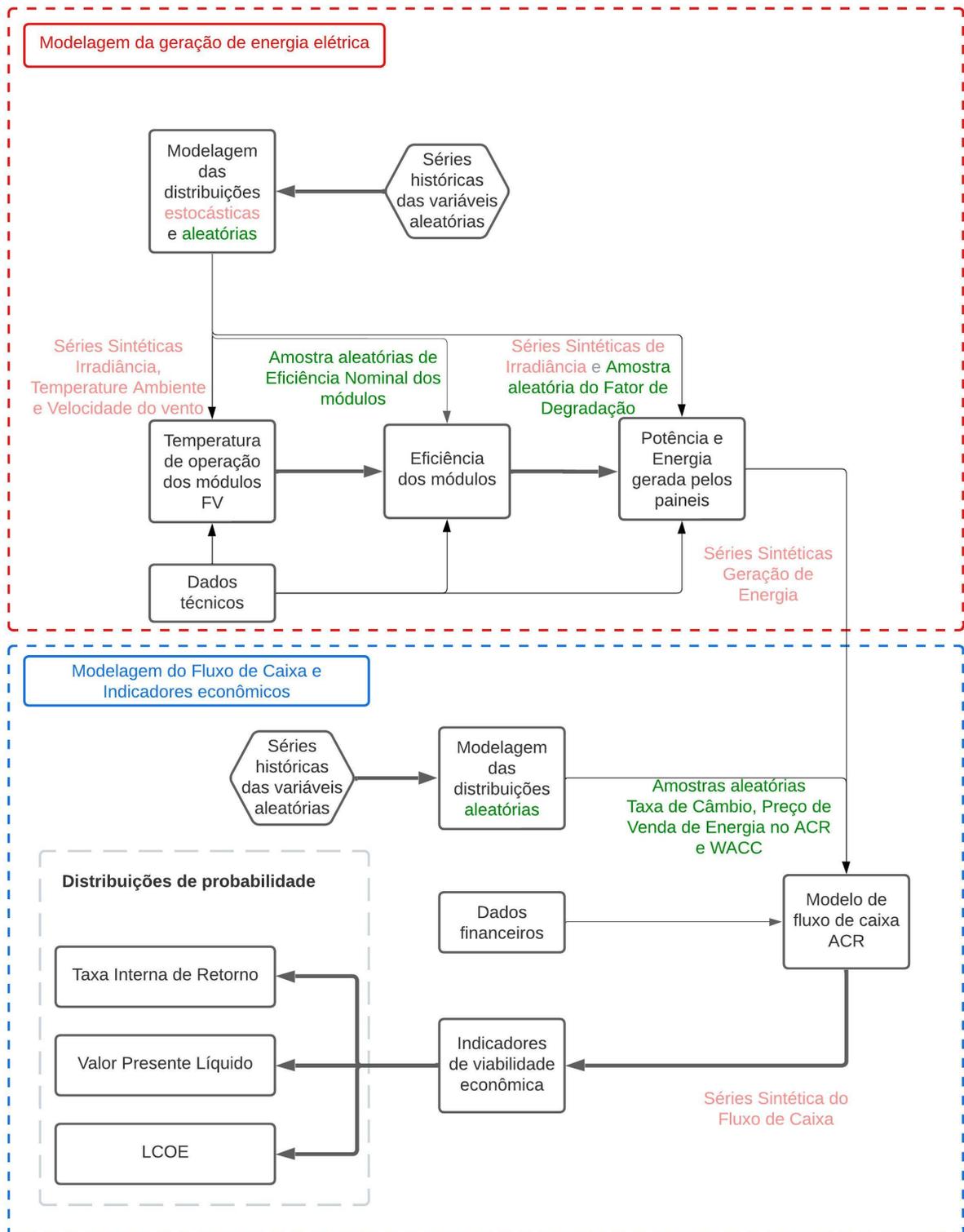
O fluxograma geral da metodologia proposta neste estudo é apresentado na Figura 4. A metodologia foi utilizada para a análise de viabilidade técnica e econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede (on-grid). Ela pode ser dividida em três fases: análise técnica, econômica e de sensibilidade.

A primeira parte da metodologia engloba a modelagem dos processos aleatórios das variáveis a serem utilizadas no modelo fotovoltaico, a saber, a irradiação solar, a velocidade do vento, a temperatura ambiente, a eficiência nominal dos módulos e o fator de degradação, além do detalhamento do próprio modelo em questão a ser empregado. Assim, uma vez inseridas as distribuições geradas, é calculada a energia anual.

Na segunda etapa, uma vez obtida a energia, é executada a modelagem das variáveis aleatórias a serem aplicadas nos cálculos dos indicadores de viabilidade econômica. Com isso são obtidos os indicadores VPL, LCOE e a TIRM.

Por fim, uma vez estimados os resultados técnicos e econômicos, são realizadas as análises de sensibilidade para avaliar quais são as variáveis mais críticas do sistema.

Figura 4: Fluxograma da metodologia da análise técnico-econômica

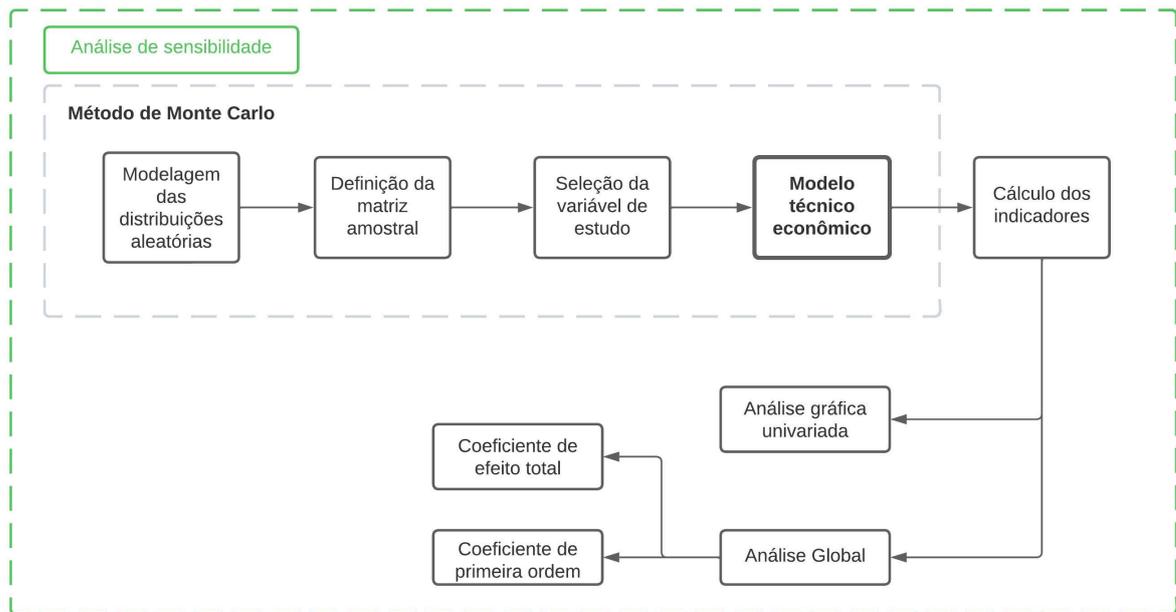


Fonte: Dados do próprio autor

O fluxograma disposto na Figura 5 detalha o procedimento abordado para as análises de sensibilidade. Inicialmente, são geradas as distribuições das variáveis aleatórias a serem

estudadas. Em seguida, essas distribuições são organizadas em formato de matriz, onde cada coluna representa uma variável, e cada linha um cenário. Então, é feita a escolha de qual variável analisar. Por fim, são geradas as saídas dos modelos e então realizada os diferentes métodos de análise de sensibilidade em relação ao parâmetro escolhido anteriormente. Repete-se esse processo para cada variável a ser estudada no modelo.

Figura 5: Fluxograma da análise de sensibilidade



Fonte: Dados do próprio autor

3.3 Detalhamento das etapas

3.3.1 Obtenção da energia anual

3.3.1.1 Modelo fotovoltaico

A equação adotada para cálculo da potência de saída do sistema é dada por (ZHAI et al., 2018):

$$P_{PV} = n_{MOD} \cdot A_{MOD} \cdot GI \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_{INV} \cdot f_{PV} \quad (3.3.1)$$

Ao qual:

- P_{PV} é a potência de saída do sistema (W)
- n_{MOD} é o número de módulos no sistema

- A_{MOD} é a área ativa de cada módulo fotovoltaico (m^2)
- η_{PV} é a eficiência do módulo fotovoltaico (%)
- η_{INV} é a eficiência do inversor (%)
- f_{PV} é o fator de degradação (%)

Assim, ao se calcular a saída do modelo utilizando os valores das séries sintéticas para cada hora, essa equação retorna a energia em Wh . O sistema fotovoltaico é dependente da temperatura de operação (T_C) dos módulos (ZHAI et al., 2018). Dessa forma, T_C pode ser calculada como:

$$T_C = T_A + (T_{NOCT} - T_{A,NOCT}) \cdot \frac{GI}{GI_{NOCT}} \cdot \frac{U_{L,NOCT}}{(5,7 + 3,8V_{vento})} \cdot \left[1 - \frac{\eta_{PV}}{\tau\alpha} \right] \quad (3.3.2)$$

Onde:

- T_A é a temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
- $T_{A,NOCT}$ é a temperatura ambiente nominal ($^{\circ}C$)
- T_{NOCT} é a temperatura de operação nominal da célula ($^{\circ}C$)
- GI é a irradiação solar (W/m^2)
- GI_{NOCT} é a irradiação solar nominal (W/m^2)
- V_{vento} é a velocidade do vento (m/s)
- $U_{L,NOCT}$ é o fator de transferência de calor nominal
- η_{PV} é a eficiência do módulo fotovoltaico (%)
- $\tau\alpha$ é o coeficiente de transmitância-absortância

A eficiência dos módulos fotovoltaicos pode ser calculada como:

$$\eta_{PV} = \eta_{PV,NOM} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_C - T_{C,REF})] \quad (3.3.3)$$

Em que:

- $\eta_{PV,NOM}$ é a eficiência nominal dos módulos fotovoltaicos (%)
- γ é o fator de temperatura de uma potência Y ($\%/K$)
- $T_{C,REF}$ é a temperatura do módulo sob condições de teste ($^{\circ}C$)

Importante ressaltar que as variáveis estocásticas utilizadas como entrada são horárias, ou seja, seus valores foram considerados constantes durante o período de uma hora. A Tabela 1 categoriza os parâmetros aleatórios e estocásticos:

Tabela 1: Variáveis estocásticas e aleatórias

Variáveis estocásticas			Variáveis aleatórias	
GI	T_A	V_{vento}	f_{PV}	$\eta_{PV,NOM}$

Fonte: Dados do próprio autor

Os valores para esses parâmetros estão expostos na Tabela 2:

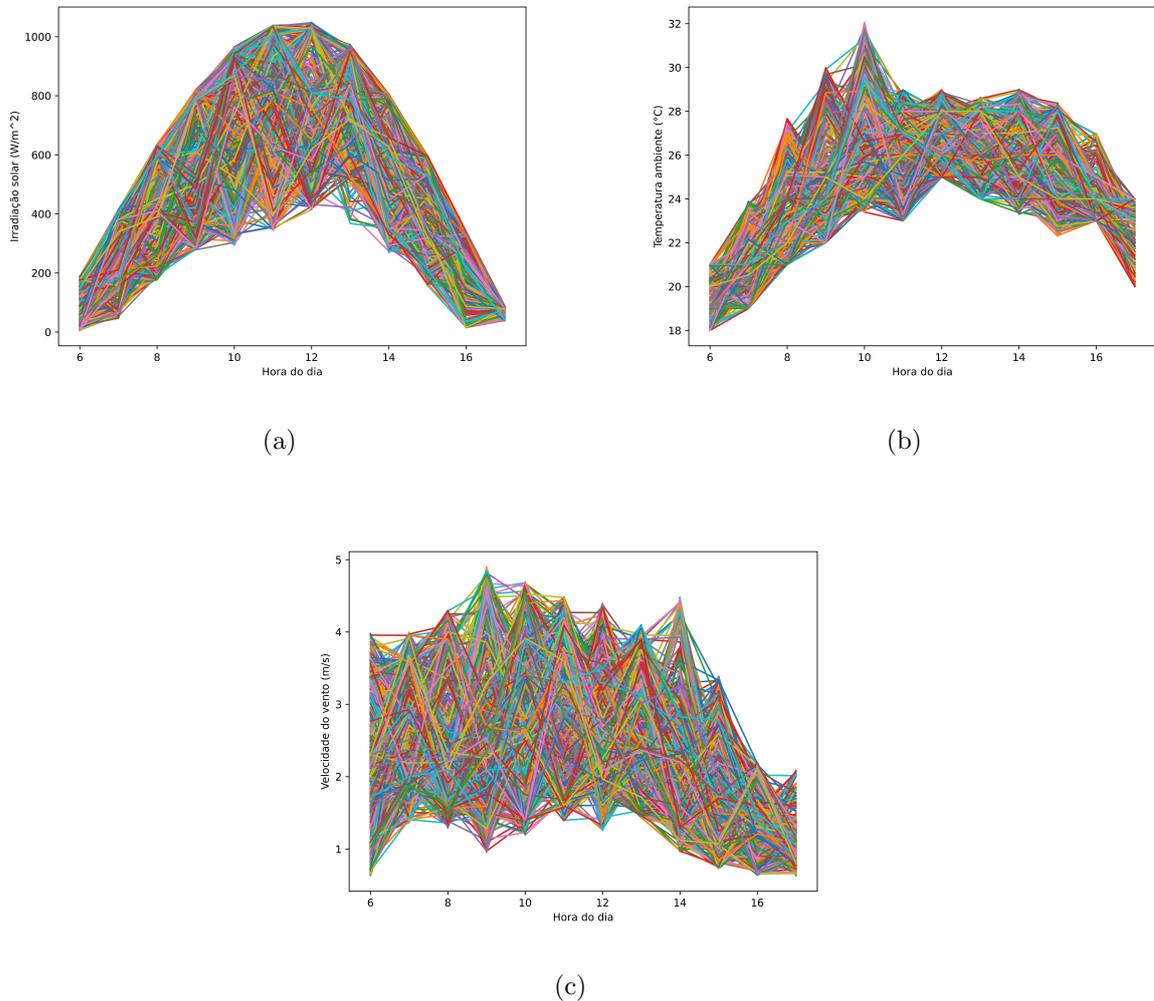
Tabela 2: Parâmetros do módulo fotovoltaico

Parâmetros do módulo	Valor	Outros Parâmetros	Valor
T_{NOCT}	$46^{\circ}C$	GI_{NOCT}	$800W/m^2$
$T_{A,NOCT}$	$20^{\circ}C$	$U_{L,NOCT}$	9,5
$T_{C,REF}$	$25^{\circ}C$	$\tau\alpha$	0,8
A_{MOD}	$1,675m^2$	η_{INV}	97,8%
γ	$-0,41\%/K$		

Fonte: Dados do próprio autor

Para as variáveis GI , V_{vento} , e T_A , seus valores foram obtidos a partir de séries históricas e modelados em distribuições pseudoaleatórias. A Figura 6 apresenta os gráficos das distribuições aleatórias dessas variáveis para 1000 cenários de um dia, considerando apenas os horários onde tem-se GI não nulo. Os parâmetros $\eta_{PV,NOM}$ e f_{PV} deu-se por meio de valores encontrados na literatura e então modelados em uma distribuição por meio da *Empirical Cumulative Distribution Function* (ECDF).

Figura 6: Distribuições das variáveis estocásticas para 1000 cenários de um dia: (a) Irradiância solar; (b) Temperatura ambiente; (c) Velocidade do vento.



Fonte: Dados do próprio autor

A variável GI é obtida conforme (GILMAN, 2015). Para um sistema fixado na superfície, que é o caso estudado nesse trabalho, considera-se somente um ângulo de inclinação, igual 15° . Foi definido o ângulo de azimute dos módulos como 180° . Os valores dos ângulos de zenite e azimute solar foram obtidos por meio da biblioteca do python pvlib (F et al., 2018), uma ferramenta apoiada pela comunidade que fornece um conjunto de funções e classes para simular o desempenho de sistemas de energia fotovoltaica, relacionando os dados referentes a posição do sol na cidade de São Paulo, em um período de 23 anos, de 1998 a 2020. De forma similar, foram retirados do mesmo período de tempo, 1998 a 2020, os dados de irradiância do feixe e irradiância difusa do banco de dados de radiação solar da NREL (NREL, 2022), o *National Solar Radiation Database* (NSRDB), que é uma coleção serialmente completa de valores horários e semestrais de dados meteorológicos. Dessa forma, foi computada a série histórica da GI dos últimos 23 anos. Com isso foi modelada uma distribuição aleatória da variável para uma projeção de 1000

cenários, onde cada um desses compreende uma simulação de 25 anos.

3.3.1.2 Modelagem das variáveis aleatórias

Para modelar as variáveis GI , V_{vento} , e T_A em cada hora, foi inicialmente calculada a ECDF da série histórica,

$$\hat{F}_n(x) = \hat{P}_n(X \leq x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_i \leq x) \quad (3.3.4)$$

Então, pelo teorema da transformação integral de probabilidade, foi gerada uma amostra aleatória por meio da função inversa da ECDF. Como os valores empíricos dessas séries históricas são dados por hora, e devido ao fato desses valores se alterarem ao decorrer de um ano, para essas variáveis foram geradas distribuições estocásticas por hora e por dia, para assim se computar a energia anual gerada de forma mais acurada.

Para a modelagem da distribuição da $\eta_{PV,NOM}$, foram listados os valores comerciais encontrados nos catálogos de módulos fotovoltaicos da CanadianSolar (CANADIANSOLAR, 2022), um dos maiores fornecedores mundiais de produtos e soluções para energia solar fotovoltaica. Com isso, foi gerada uma amostra aleatória a partir de uma distribuição triangular tendo como referência os valores máximos, mínimos e médios tabelados. De forma similar, para o f_{PV} , gerou-se uma distribuição triangular a partir da faixa de valores utilizados na literatura (MASRUR et al., 2021).

3.3.2 Fluxo de caixa e indicadores de viabilidade econômica

3.3.2.1 Modelagem do fluxo de caixa

Foi utilizado o método do Fluxo de Caixa Livre do Acionista (FCLA) que permite calcular o valor da participação acionária do negócio, viabilizando assim realizar a avaliação do investimento, pois este método sinaliza a capacidade de pagamento de dívidas e dividendos, oferecendo ao investidor o dinheiro excedente produzido pela empresa. O modelo utilizado segue o elaborado em (DAMODARAN, 2010), mas foi modificado para considerar as particularidades das tributações do mercado brasileiro (NETO et al., 2017).

As Tabelas 3 e 4 apresentam o modelo de FCLA utilizado neste trabalho e os impostos aplicados aos regimes de tributação por Lucro Presumido, respectivamente.

Para comercialização da energia no ACR, foi realizada a apuração dos preços de venda da energia a partir dos valores históricos dos leilões de energia alternativa (EPE, 2022), e com base nos dados registrados, foi construída uma distribuição aleatória de forma similar ao procedimento realizado no modelo fotovoltaico, calculando a ECDF e então gerando a distribuição a partir de sua função inversa.

Além disso, para os valores utilizados do Custo Médio Ponderado de Capital (WACC), que representa a taxa mínima de atratividade do projeto ou investimento, como não haviam dados históricos da mesma, foi tomado como referência o histórico da taxa SELIC. Assim, por meio da ferramenta de consulta pública de séries estatísticas públicas do Banco Central do Brasil (BCB, 2022), foram obtidos os valores da taxa dos últimos 20 anos. Ademais, também foram coletados os dados históricos das taxas de câmbio. Desse modo, repetiu-se o procedimento de modelagem de amostra aleatória utilizado no preço de venda no ACR para o WACC e as taxas de câmbio.

Tabela 3: Modelo FCLA

Receita Bruta da Venda da Energia no ACR

(-) Impostos sobre a Receita Bruta

PIS/PASEP¹

COFINS²

(-) Despesas Operacionais

Custo de Operação e Manutenção (O&M)

Arrendamento do Terreno

Seguro Operacional

Transporte de Energia

Depreciação

Encargos Setoriais

(=) Lucro antes do Imposto de Renda (LAIR)

(-) Impostos (no lucro presumido incidem sobre receita bruta, no lucro real sobre LAIR)

Imposto de Renda (IR)

Contribuição Social sobre Lucro Líquido (CSLL)³

(=) Lucro Líquido

(+) Remuneração do capital próprio

(+) Depreciação

(-) Investimento

(=) FCLA

Fonte: Dados do próprio autor

¹Por meio da Lei Complementar no 7/1970, foi criado o Programa de Integração Social (PIS). O programa buscava a integração do empregado do setor privado com o desenvolvimento da empresa. Paralelamente à criação do PIS, a Lei Complementar no 8/1970 instituiu o Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PASEP), com o qual União, Estados, Municípios, Distrito Federal e territórios contribuíam com o fundo destinado aos empregados do setor público.

²Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS), instituída pela Lei Complementar No 70 de 30/12/1991.

³Tributo federal que incide sobre o lucro líquido do período-base, antes da provisão para o Imposto de Renda. É devida pelas pessoas jurídicas e entes equiparados pela legislação do IR, destinando-se ao financiamento da Seguridade Social, estando disciplinado pela lei no 7.689/1988 e suas alterações.

Tabela 4: Regime de tributação: Lucro Presumido

PIS	0,65% da Receita Bruta
COFINS	3% da Receita Bruta
CSLL	9% sobre a base do cálculo de 12% da Receita Bruta
IR (Sobre a Receita Bruta)	8% da Receita Bruta

Fonte: (NETO et al., 2017)

3.3.2.2 Indicadores de viabilidade econômica

Os indicadores de viabilidade que foram selecionados para este trabalho foram o VPL, o LCOE e o TIRM. Baseado na energia anual gerada pelo modelo fotovoltaico utilizado, foram gerados 1000 cenários para cada variável aleatória ao longo da vida útil da usina FV, que neste estudo foi considerada igual a 25 anos. Desse modo, obteve-se as distribuições de preço de venda de energia no ACR e taxas de câmbio do Euro e do Dólar. Mantiveram-se constantes esses valores durante os 25 anos de cada cenário, variando-se essas grandezas entre um cenário e outro. Por fim, calculou-se o CAPEX, o OPEX e o fluxo de caixa do investimento ao longo da sua vida útil.

Na sequência, com base nos valores computados e utilizando a distribuição aleatória gerada para o WACC, foi encontrado o VPL, o LCOE e a TIRM para cada cenário ao longo da vida útil da planta.

3.3.3 Análise de sensibilidade

A fim de averiguar quais são os efeitos dos parâmetros no modelo dos indicadores de viabilidade econômica, foram realizadas duas análises de sensibilidade, uma local e uma global. Para tal, as variáveis selecionadas para o estudo são:

Tabela 5: Variáveis estudadas na análise de sensibilidade

Variável	Descrição	Unidade
$\eta_{PV,NOM}$	Eficiência nominal dos módulos fotovoltaicos	%
F_{PV}	fator de degradação	%
$WACC$	Custo Médio Ponderado de Capital	% <i>a.a.</i>
Preço de venda	Preço de venda de energia no ACR	$R\$/kWh$
Câmbio (Dolar)	Taxa de câmbio do Dolar	$R\$/USD$
Câmbio (Euro)	Taxa de câmbio do Euro	$R\$/EUR$

Fonte: Dados do próprio autor

3.3.3.1 Análise local

Inicialmente, foram realizadas análises de sensibilidade local para determinar quais são os parâmetros mais críticos na modelagem dos indicadores de viabilidade econômica. Para isso, foi efetuada a análise de uma variável por vez, dada a definição de análise local. Com base nas distribuições aleatórias construídas a partir das séries históricas, fixaram-se todos os parâmetros, exceto o estudado, em seus valores médios. Então, variando somente a variável estudada dentro de uma faixa especificada, foi computada a saída do sistema. Essa forma de análise de sensibilidade é denominada *One-At-a-Time*. O processo é então repetido para as demais variáveis. A Tabela 6 indica os valores mínimos e máximos adotados para as distribuições de cada variável analisada.

Tabela 6: Valores mínimos e máximos adotados para a análise de sensibilidade local

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo
$\eta_{PV,NOM}$	%	18	26
F_{PV}	%	78	98
$WACC$	% <i>a.a.</i>	7,19	12
Preço de venda	R\$/kWh	0,17	0,28
Câmbio (Dolar)	R\$/USD	1	5,7
Câmbio (Euro)	R\$/EUR	1	6

Fonte: Dados do próprio autor

3.3.3.2 Análise global

Neste estudo, foi realizada uma análise de sensibilidade global sobre as saídas do sistema estudado. Essa análise considera todos os valores das distribuições aleatórias dos parâmetros da Tabela 5. Dessa forma, como exposto na Seção 2.5.4, são computados os índices de primeira ordem para cada fator que entra no sistema, considerando todo espaço amostral de entrada. Esses denominados índices revelam as informações referentes a cada variável separadamente. Por essa razão, são obtidos também os índices de efeito total para cada fator. O efeito total fornece informação da influência do fator estudado na saída do sistema, juntamente com o efeito das interações desse mesmo parâmetro com os demais (SALTELLI et al., 2008).

3.4 Considerações finais

Esse capítulo constitui a base para a construção da metodologia proposta. Foi exposto neste capítulo o modo como foram construídas as distribuições das variáveis de entrada aleatórias do sistema. Outrossim, foram abordados os métodos para a obtenção dos valores das energias anual baseado no modelo fotovoltaico, como também a abordagem adotada para a obtenção dos

indicadores de viabilidade econômica. Para terminar o capítulo, foram explicitadas as estratégias empregadas para os diferentes modelos de análise de sensibilidade.

O capítulo seguinte detalha os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta para uma usina fotovoltaica. Eles são apresentados partindo-se do detalhamento técnico da planta e dos resultados obtidos para geração de energia elétrica e dos indicadores econômicos. O capítulo é concluído com a apresentação das informações alcançadas por meio das análises de sensibilidade e comparação entre os métodos utilizados.

4 Resultados

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo versa sobre os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta. Tem-se como ponto de partida a apresentação do detalhamento da usina fotovoltaica utilizada para o estudo. São abordados e analisados os resultados técnicos e econômicos obtidos por meio das distribuições aleatórias geradas. Por fim, apresentam-se os resultados da análise de sensibilidade local e global dos indicadores econômicos.

4.2 Usina fotovoltaica adotada

A Tabela 7 expõe as principais informações técnicas da usina fotovoltaica considerada neste estudo (TORRES, 2021).

Tabela 7: Parâmetros técnicos da usina estudada

	Parâmetro	Valor
Capacidade da usina	Potência Nominal	100MW
Região de operação	Localização	São Paulo, Brasil
	Coordenadas	15, 76° S 47, 87° O
Detalhes do sistema	Número de módulos	302.706

Fonte: Dados do próprio autor

Cabe destacar que as informações da Tabela 7 são utilizadas na obtenção dos dados históricos da GI , T_A e V_{vento} . Com isso, obtêm-se os dados históricos de irradiância, velocidade do vento, temperatura ambiente e os ângulos de posição do sol para essa região nos últimos 23 anos. Com isso, foram geradas as distribuições aleatórias segundo exposto na seção 3.3.1.2.

4.3 Análise técnico-econômica

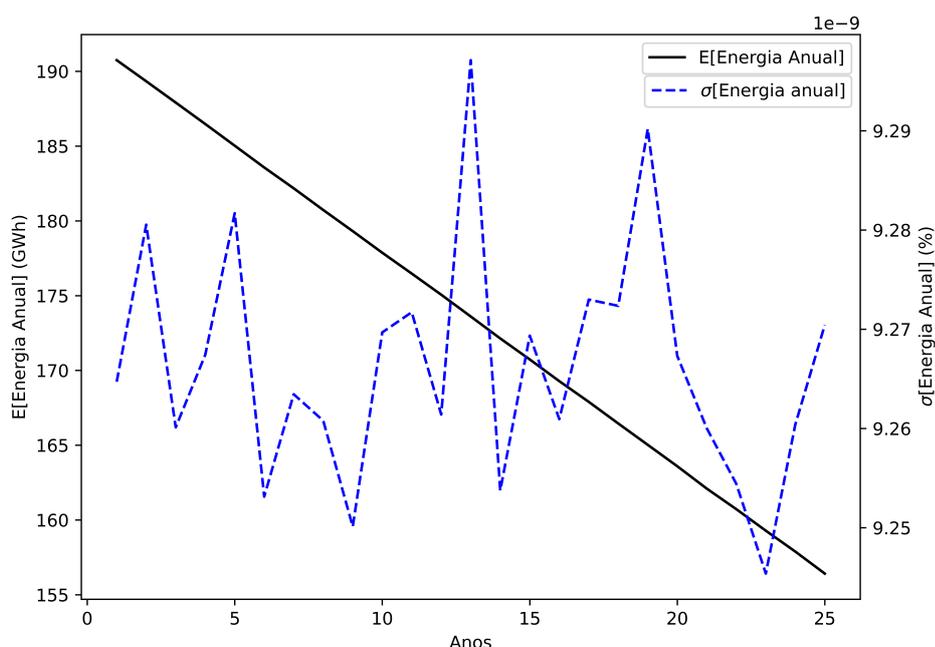
Esta seção é dedicada à apresentação dos resultados técnicos provenientes da aplicação da metodologia proposta neste trabalho.

4.3.1 Análise técnica

De posse dos dados climáticos e técnicos, as simulações foram executadas para cada cenário, considerando-se a localização explicitada na Tabela 7. Com isso, calculou-se a energia

anual de 25 anos por cenário. Devido às características estocásticas e aleatórias das variáveis de entrada, plotou-se na Figura 7 um gráfico do valor esperado e do desvio padrão da energia anual gerada para cada ano.

Figura 7: Valor esperado e o desvio padrão da energia anual gerada para cada ano



Fonte: Dados do próprio autor

A energia gerada para cada cenário foi obtida considerando-se os valores das variáveis adquiridas empregando-se as distribuições estocásticas. A faixa de variação tomada para os valores de eficiência nominal dos módulos é de 17,9% a 26,8%. Os limites mínimo e máximo para o fator de degradação são 0,78% a.a. e 0,98% a.a., respectivamente. Para cada cenário, o valor da eficiência e fator de degradação assumem valores aleatórios dentro dessas faixas. Considerou-se uma redução de 0,75% no fator de degradação por ano, o que resultou na redução de 18,4% no valor esperado da energia gerada ao longo do período de análise. Além disso, houve uma redução do valor esperado da energia gerada de 190 GWh, para o primeiro ano, e de 156 GWh, para o vigésimo quinto ano. Como o desvio padrão foi obtido em relação ao valor esperado, observa-se que, existe pouca variação entre ambos no decorrer da vida útil da usina.

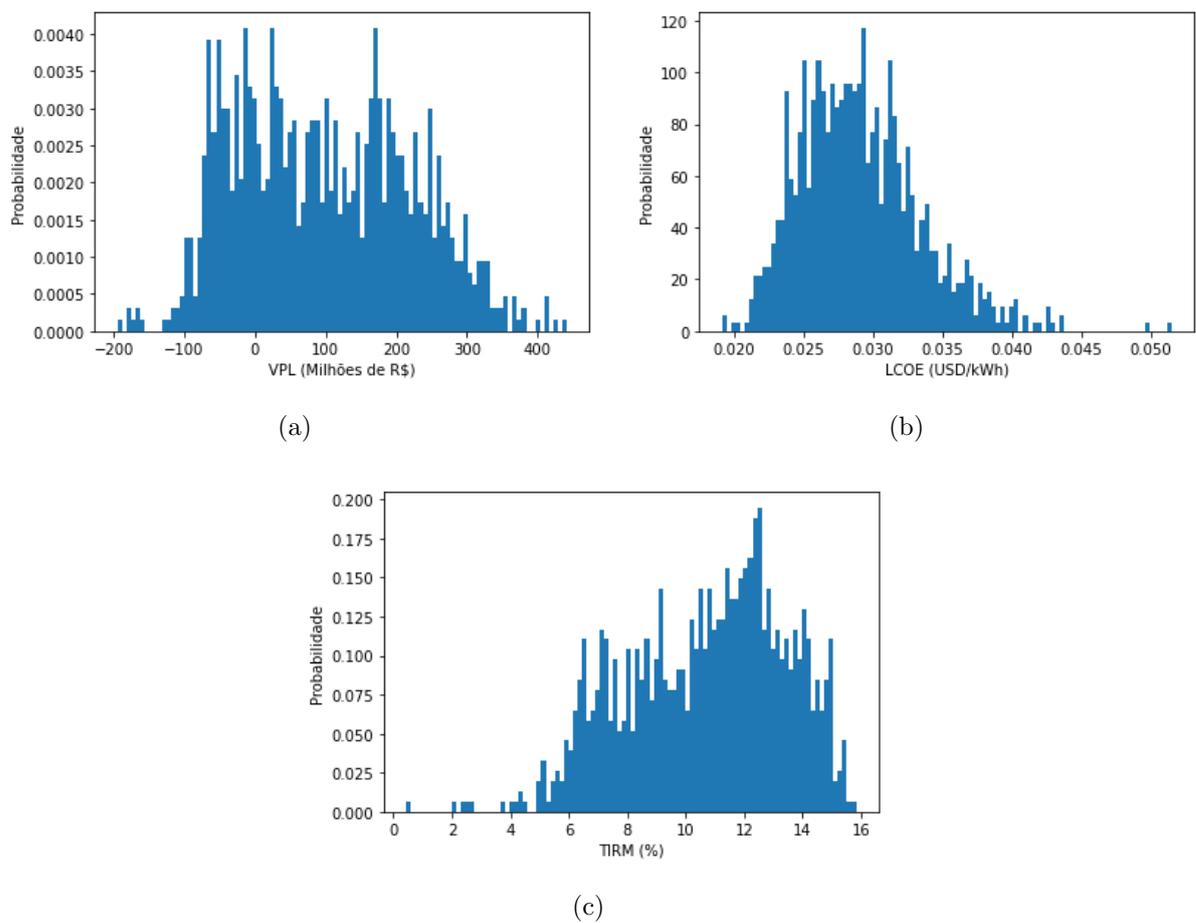
4.3.2 Análise econômica

Na sequência, tendo obtido os dados de energia anual para cada cenário, foram feitas as simulações de cálculo dos indicadores de viabilidade econômica, VPL, LCOE e TIRM. Neste estudo, utilizou-se a TIRM devido ao fato de haver mais de uma inversão de sinal no fluxo de

caixa. Uma nova inversão de sinal ocorre no décimo quinto ano, quando está prevista a troca dos inversores. A Figura 8 apresenta as distribuições de probabilidade dos indicadores VPL, LCOE e TIRM. A Tabela 8 exhibe os resultados do valor esperado, mínimos e máximos, além dos desvios padrão, destes indicadores.

A usina fotovoltaica apresentou valores promissores em relação a todos os indicadores avaliados. A probabilidade de não retorno do investimento é de 26,90%. Isto significa que o projeto é viável para 73,10% dos cenários simulados.

Figura 8: Gráficos de distribuições de probabilidade dos indicadores de viabilidade econômica: (a) VPL; (b) LCOE; (c) TIRM.



Fonte: Dados do próprio autor

Tabela 8: Valor esperado e desvio padrão dos indicadores de viabilidade econômica

	Valor mínimo	Valor Máximo	Valor Esperado	Desvio Padrão
VPL (Milhões de R\$)	-162	426	97,673	121.805
TIRM (% a.a.)	2,7	16,3	10,707	2.701
LCOE (USD/kWh)	0,019	0,049	0,029	0.004

Fonte: Dados do próprio autor

Por outro lado, a probabilidade da TIRM ser menor que o valor da taxa mínima de atratividade (TMA), para o qual utilizou-se o WACC, foi de aproximadamente 37,90%. Esse valor indica uma possibilidade alta de não haver rentabilidade no projeto. O valor esperado do LCOE encontrado é igual a 0,029 USD/kWh. Este valor, caracterizado como baixo quando comparado ao calculado em (TORRES, 2021), aponta um baixo custo de geração.

4.4 Análise de sensibilidade

A seção de análise de sensibilidade foi dividida em duas partes, a saber: análise local e global. Para ambos, os indicadores selecionados foram o LCOE, a TIRM e o VPL. As variáveis de estudo selecionadas são as que estão dispostas Tabela 5. Para fins de análise, foram abordados os valores esperados para cada cenário e o desvio padrão em relação a esse valor para cada variável.

4.4.1 Análise de sensibilidade local

Seguindo a metodologia explicitada na Seção 3.3.3.1 desse texto, é realizada a análise de sensibilidade local, alterando o valor da variável de estudo dentro de sua faixa e observando esse efeito nos indicadores de viabilidade econômica. Para isso, a Tabela 9 evidencia as condições de contorno das variáveis de entrada, ou seja, os valores médio nos quais as variáveis foram fixados.

Tabela 9: Valor Médio fixado para cada variável

WACC	Preço de Venda	$\eta_{PV,NOM}$	F_{PV}	Dólar	Euro
9,59 % a.a.	0,228 R\$/kWh	22,3 %	88 % a.a.	3,28 R\$/USD	3,57 R\$/EUR

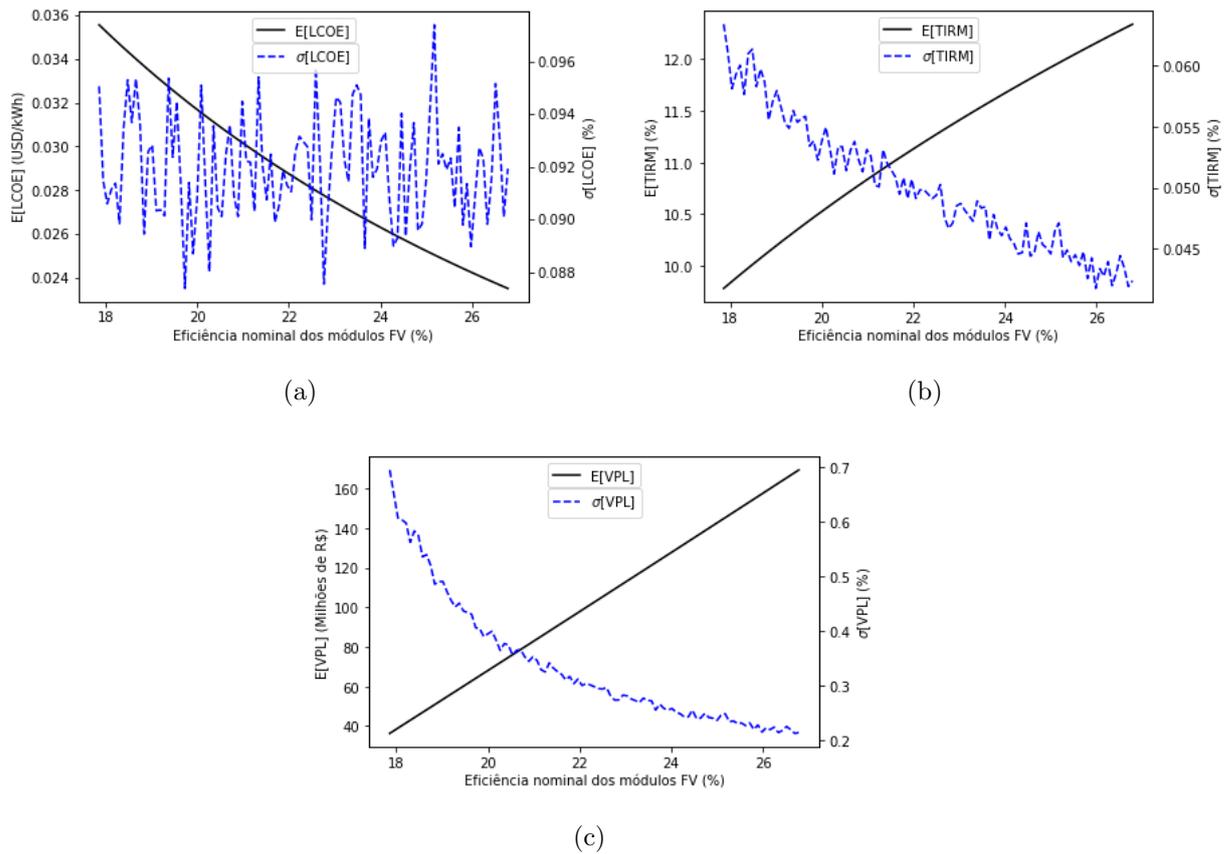
Fonte: Dados do próprio autor

4.4.1.1 Eficiência Nominal dos Módulos ($\eta_{PV,NOM}$)

Seguindo o modelo fotovoltaico disposto na Equação 3.3.1, a potência gerada pelo sistema é dependente da eficiência dos módulos, como visto na Equação 3.3.3. Portanto, observa-

se o impacto nos indicadores econômicos causado por sua variação. Esse efeito é visível nos gráficos dispostos na Figura 9. Como visto na teoria, o aumento da eficiência nominal dos módulos implica no crescimento do VPL e da TIRM, e em contrapartida, ocasiona na redução do LCOE.

Figura 9: Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função da Eficiência Nominal dos Módulos: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.



Fonte: Dados do próprio autor

O VPL e a TIRM reduziram à medida que se aumentou o valor esperado. Isso indica que, conforme esperado, quanto maior a eficiência dos módulos, menor é o risco do projeto ser inviável financeiramente. Esse comportamento acontece, como visto na Equação 2.6.9, devido ao fato de seu cálculo compreender as parcelas positivas e negativas do fluxo de caixa. Dado que uma fração da parte negativa é constante, isso é, os custos do investimento inicial e da troca de inversores, como o aumento da eficiência implica em menos parcelas negativas do fluxo de caixa, no cálculo da TIRM para valores maiores, a parcela negativa compreendida terá somente os custos fixos.

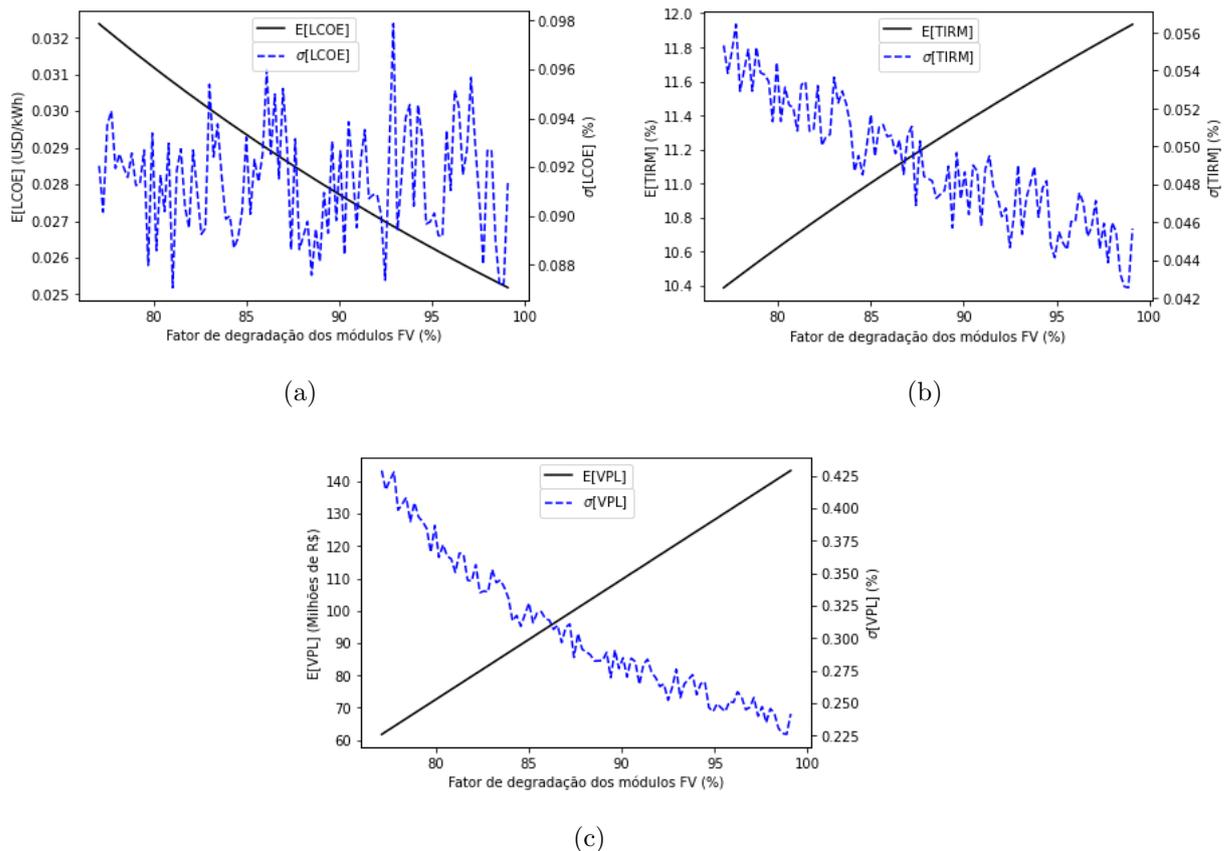
De forma similar, o aumento da eficiência nominal implica em uma receita maior, sem alteração significativa nos custos fixos, resultando em um menor desvio padrão em relação ao valor esperado do VPL.

Entretanto, o desvio padrão em relação ao valor esperado do LCOE, apresentou um comportamento mais aleatórios, sem tendência de aumento ou redução. Isso ocorre, como visto na equação 2.6.12, devido ao fato de seu cálculo considerar os custos fixos, a taxa de desconto e a energia gerada. Como as duas primeiras são mantidas constantes, apenas a variação na energia afetará o LCOE. Como o desvio padrão apresenta uma pequena variação, percebe-se que este indicador não é muito susceptível às variáveis estocásticas.

4.4.1.2 Fator de Degradação dos Módulos (F_{PV})

Segundo a Equação 3.3.1, a potência gerada pelo sistema fotovoltaico está diretamente relacionada com o fator de degradação dos módulos. A Figura 10 exibe os gráficos da influência de sua variação nos indicadores econômicos. A faixa de valores tomada para estudo do fator de degradação foi entre 78% a 98% (MASRUR et al., 2021).

Figura 10: Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função do Fator de Degradação: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.



Fonte: Dados do próprio autor

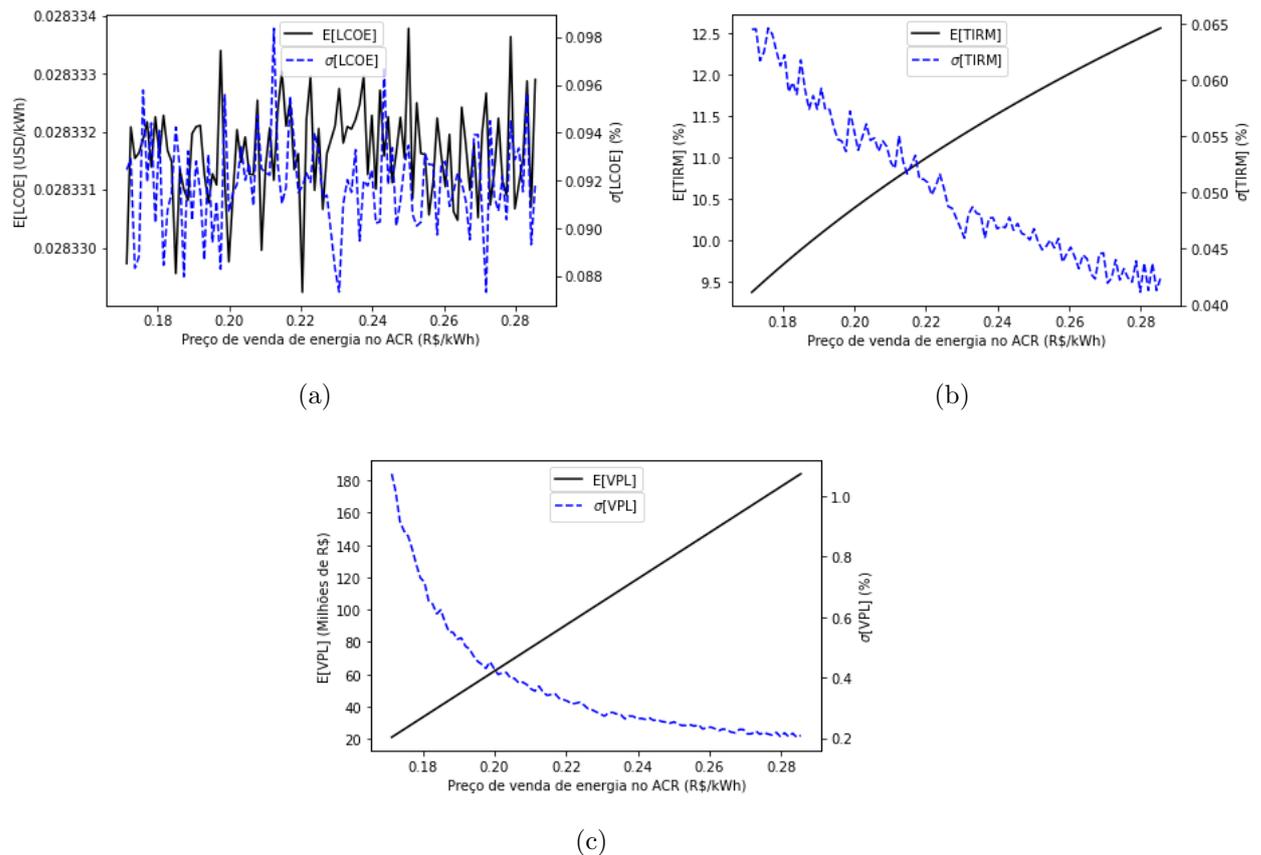
Da Figura 10, é possível observar que os resultados dos desvios-padrão em relação ao valor esperado do VPL e da TIRM apresentam redução com o aumento do fator de degradação

dos módulos FV. Além disso, o comportamento do desvio padrão do LCOE segue estocástico, sem tendência de redução ou crescimento. Uma vez verificada uma pequena variação, conclui-se que o indicador é pouco influenciado pelas variáveis estocásticas neste contexto.

4.4.1.3 Preço de Venda de Energia

A receita arrecadada pela usina provém da venda da energia gerada no ambiente de contratação regulado pela ANEEL. Avalia-se, neste estudo, a influência que a variação no preço de venda estipulado no contrato possui sobre os indicadores econômicos. A faixa de variação do preço da energia negociada no ACR variou de 0,17 R\$/kWh a 0,28 R\$/kWh. Este intervalo contempla os preços históricos de venda registrados em leilões de geração da ANEEL para a energia fotovoltaica dos últimos anos (EPE, 2022). Da Figura 11 é possível observar os efeitos da variação no preço de venda nos indicadores de viabilidade econômica.

Figura 11: Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função do Preço de Venda de Energia: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.



Fonte: Dados do próprio autor

O gráfico do valor esperado do LCOE indica que o preço de venda não influencia em seu resultado, o que é observado devido ao comportamento estocástico de seu valor esperado e desvio

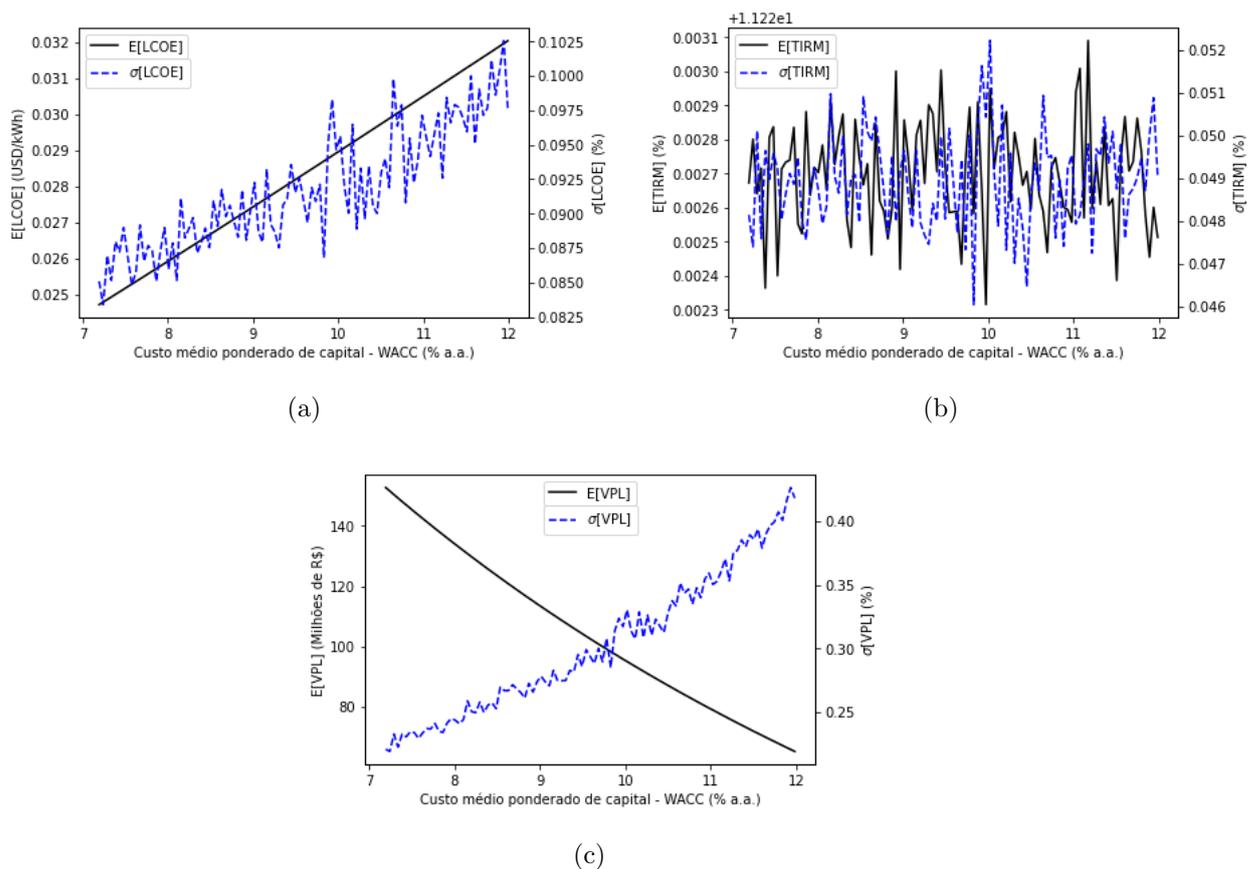
padrão. A Equação 2.6.12 valida esse ponto, visto que, no cálculo do LCOE são consideradas somente as energias geradas e os custos totais.

De forma similar, os desvios-padrão em relação aos valores esperados do VPL e da TIRM apresentam uma redução na medida que ocorre o aumento do preço de venda.

4.4.1.4 Custo Médio Ponderado de Capital (WACC)

A TMA está ligada a vários indicadores econômicos empregados neste trabalho em razão de ela representar o percentual mínimo que um investidor está disposto a ganhar por meio de uma aplicação financeira. Para os cenários avaliados neste estudo, a taxa empregada foi igual à WACC. Para tal, foi tomada como referência a série histórica da taxa SELIC (BCB, 2022). A Figura 12 exibe o efeito da variação da TMA nos indicadores econômicos em avaliação.

Figura 12: Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função do Custo Médio Ponderado de Capital - WACC: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.



Fonte: Dados do próprio autor

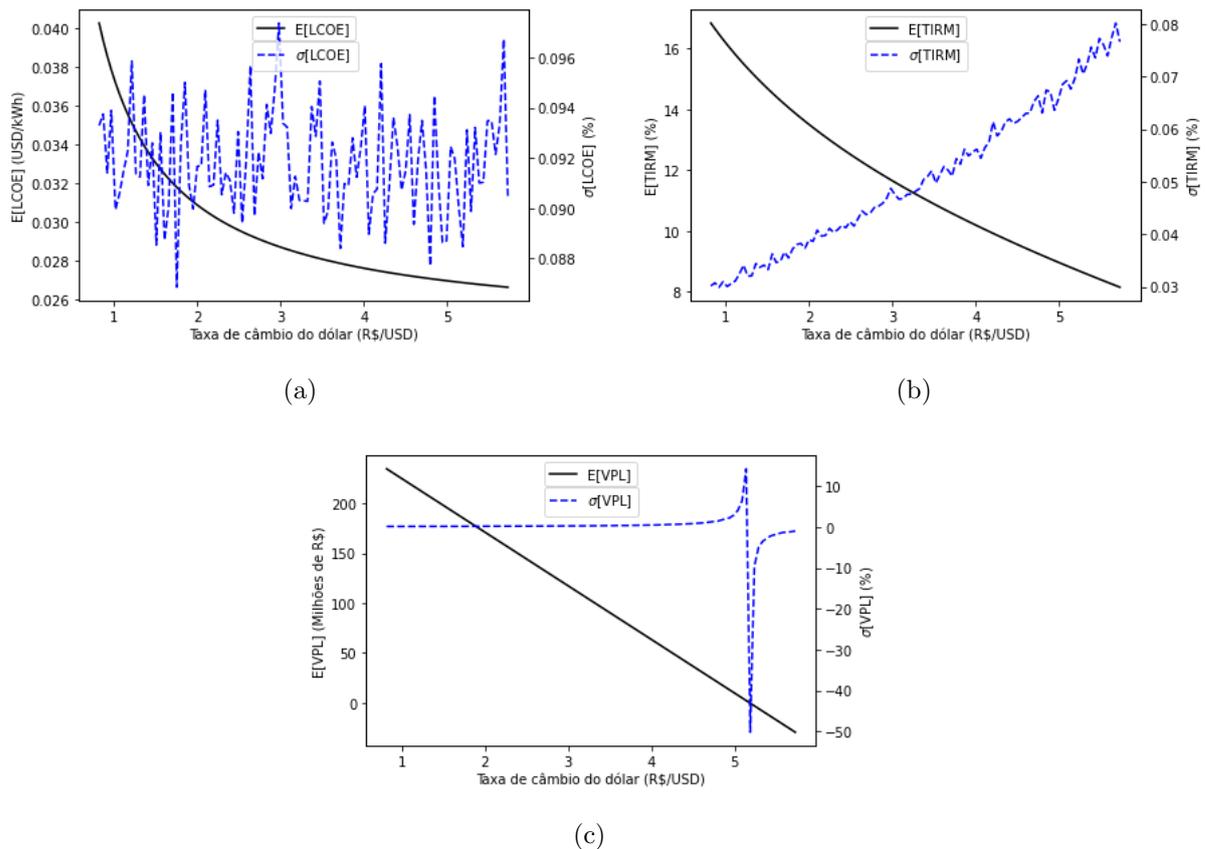
O gráfico da TIRM indica que o WACC não impacta no indicador em estudo, o que é observado devido ao comportamento estocástico em seu valor esperado e desvio padrão. A Equação 2.6.9 valida esse ponto, visto que no cálculo da TIRM é considerado somente o fluxo

de caixa e as taxas de captação e aplicação. Além disso, como o aumento do WACC ocasiona também no aumento do desvio padrão do LCOE e do VPL, contrário às variáveis anteriores, isso torna o investimento menos seguro. Na verdade, o investimento está mais suscetível às variações dos parâmetros estocásticos.

4.4.1.5 Taxa de Câmbio do Dólar

Os últimos parâmetros investigados são as taxas de câmbio. A variação na taxa de câmbio visa auferir dados sobre a dependência dos custos gerais da planta em relação à importação de equipamentos do exterior, como visto na Equação 2.6.6. Primeiramente, efetuou-se o estudo sobre a taxa do Dólar. A faixa de variação adotada foi baseada na sua série histórica dos últimos 20 anos (BCB, 2022). Com isso, observou-se o efeito de sua variação nos indicadores de viabilidade econômica, exposto nos gráficos na Figura 13.

Figura 13: Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função da Taxa de Câmbio do Dólar: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.



Fonte: Dados do próprio autor

Como foi feita a conversão da unidade do LCOE para USD/kWh, o aumento da taxa implicou na redução do valor do indicador. De forma similar aos primeiros indicadores, o desvio

padrão em relação ao valor médio do LCOE apresenta um comportamento estocástico sem tendência de aumento ou redução definida. Isso ocorre uma vez que a taxa de câmbio afeta somente os custos de investimento inicial e da troca dos inversores, ou seja, uma parcela fixa no fluxo de caixa. Dessa forma, é predominante no desvio padrão a característica estocásticas das variáveis de entrada horárias.

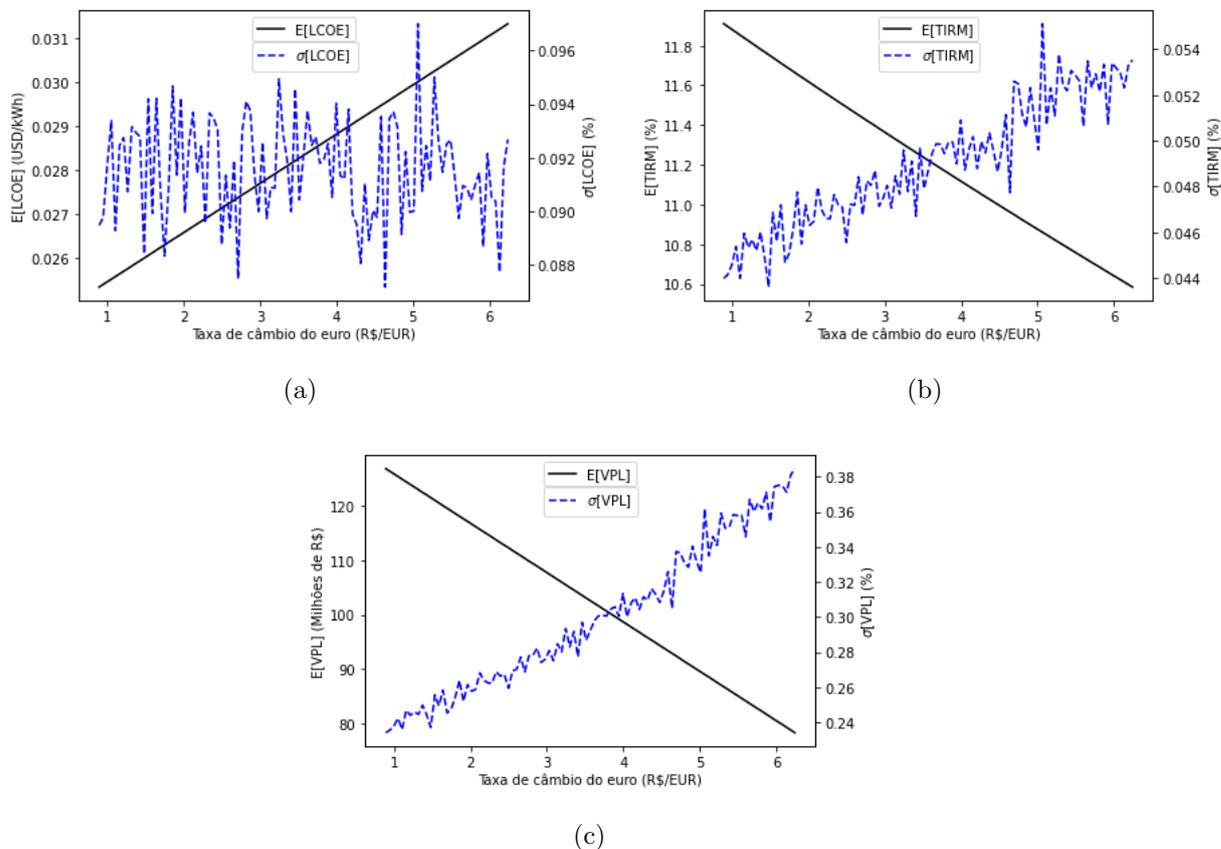
Por outro lado, como os custos estão diretamente ligados ao valor do dólar, o desvio padrão da TIRM apresenta um crescimento, dado que o investimento se torna mais arriscado com o aumento dessas despesas. Além disso, o desvio padrão do VPL apresenta uma inversão de sinal para valores elevados da taxa de câmbio, visto que o valor esperado se torna negativo, significando que os custos do investimento foram superiores à receita gerada pela usina.

4.4.1.6 Taxa de Câmbio do Euro

Realizou-se ainda a análise sobre a taxa de câmbio do Euro. Como no estudo do dólar a faixa de variação adotada foi baseada em sua série histórica dos últimos 20 anos. Então observou-se o efeito de sua variação nos indicadores de viabilidade econômica. Os gráficos da Figura 14 demonstram que o comportamento do LCOE apresentou aumento. Isso ocorreu pois, esse dado está apresentado em USD/kWh, e como a taxa do dólar foi fixada, os custos aumentaram proporcionalmente à taxa de câmbio do euro.

Similar à análise da taxa de câmbio do dólar, o desvio padrão do LCOE apresentou um comportamento estocástico sem tendência de aumento ou redução definida. Isso ocorre devido ao fato que a taxa de câmbio afeta somente os custos de investimento inicial e da troca dos inversores, ou seja, uma parcela fixa no fluxo de caixa. Dessa forma, é predominante no desvio padrão a característica estocástica das variáveis de entrada horárias.

Figura 14: Gráficos de Valor Esperado e Desvio Padrão em função da Taxa de Câmbio do Euro: (a) LCOE; (b) TIRM; (c) VPL.



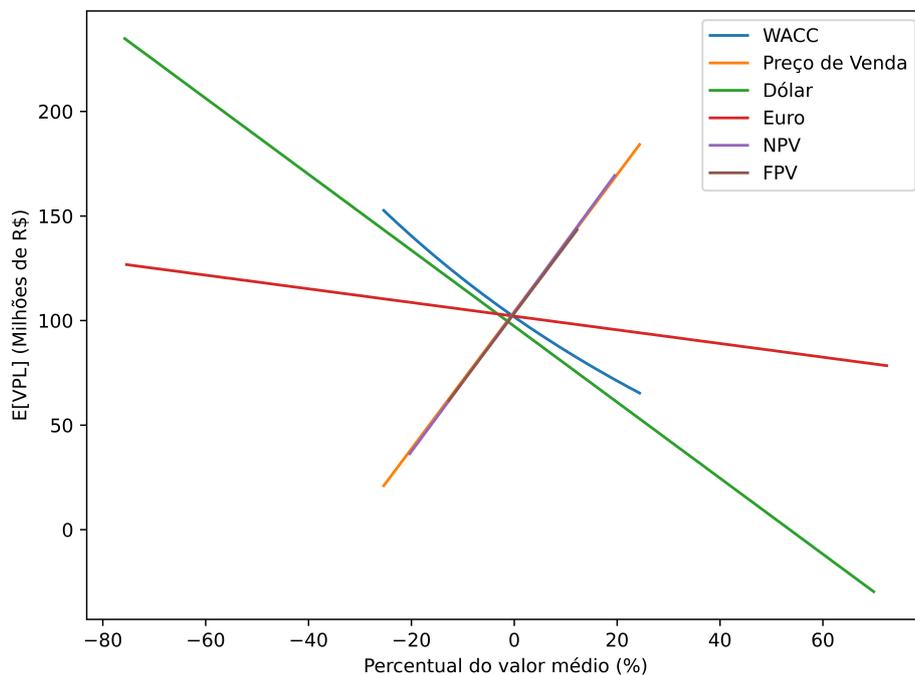
Fonte: Dados do próprio autor

Ademais, o desvio padrão em relação ao valor esperado da TIRM e do VPL, como para o dólar, apresenta tendência crescente, apesar de não ocorrer a inversão de sinal para o desvio padrão do VPL, visto que o valor esperado não se torna negativo na faixa de variação da taxa do euro.

4.4.2 Síntese da análise local

Para se comparar o efeito de cada variável estudada, elaborou-se um gráfico do valor esperado do VPL em função da variação percentual de cada variável, disposto na Figura 15. A análise do gráfico da Figura 9 revela que ao se alterar a eficiência nominal de 18% para 26%, teve-se um aumento de 366% no valor esperado do VPL. Além disso, partindo-se do gráfico da Figura 10, abstrai-se que mudando o valor do fator de degradação de 78% para 98%, houve um aumento de 132%. Alternativamente, o gráfico da Figura 11 revela que ao variar o preço de venda de 0,17 R\$/kWh para 0,28 R\$/kWh, sucedeu-se um crescimento de 777% no valor esperado do VPL. Em contrapartida, pelo gráfico da Figura 12, alterar o valor do WACC dentro de sua faixa, de 7,19% para 12 %, resultou em uma redução de 57% na saída analisada.

Figura 15: Síntese da sensibilidade do VPL pela análise local



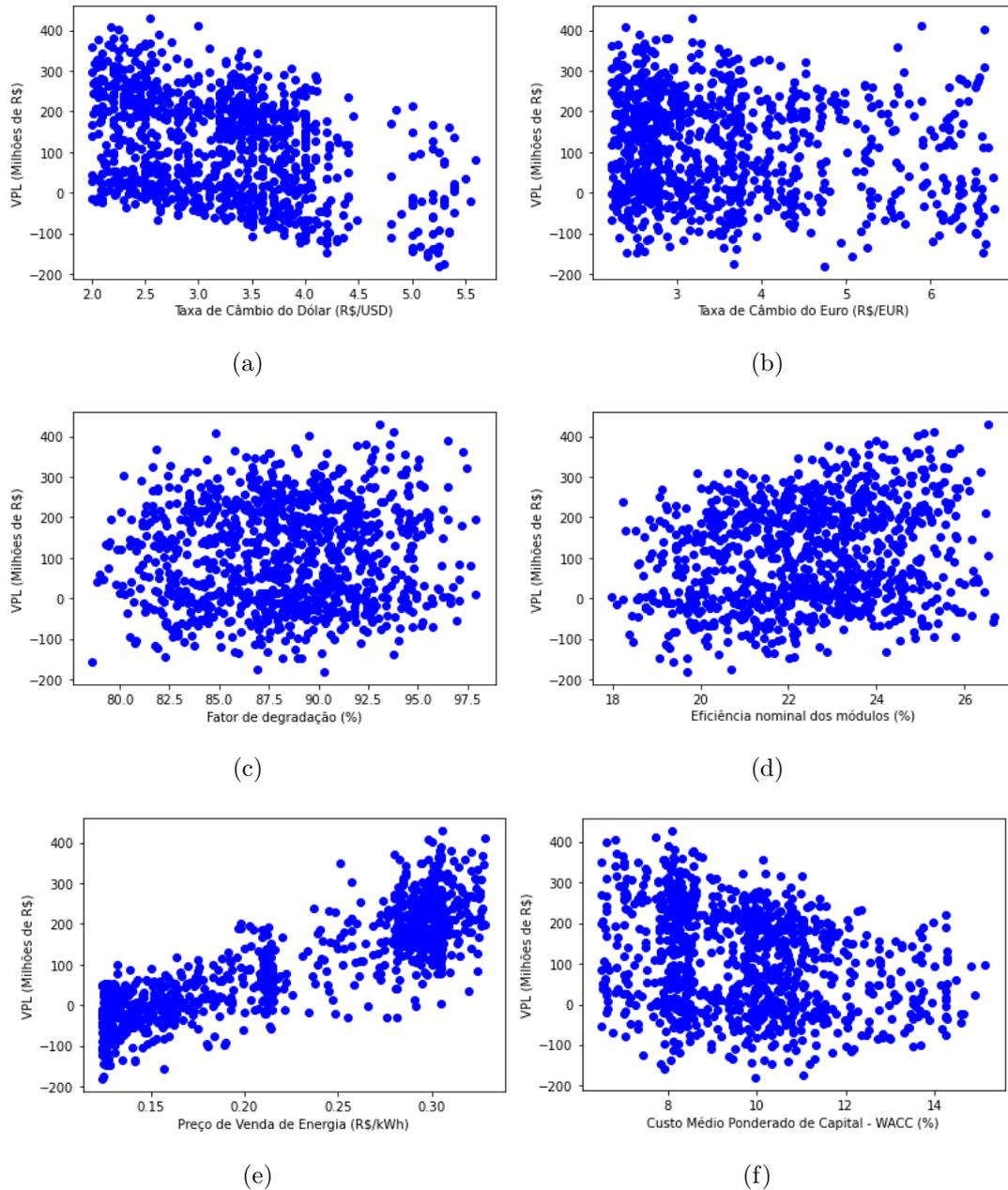
Fonte: Dados do próprio autor

A análise do gráfico da Figura 13 indica que mudar a taxa de câmbio do dólar de 1 R\$/USD para 5,7 R\$/USD, ocasionou uma redução de aproximadamente 113% no valor esperado do VPL. De forma similar, por meio da Figura 14, observa-se que ao variar a taxa de câmbio do euro em sua faixa de distribuição, de 1 R\$/EUR até 6 R\$/EUR, ocorreu uma redução de 38% VPL. É possível observar essas variações no valor esperado do VPL no gráfico da Figura 15, onde as variáveis que mais influenciaram no valor do VPL foram o preço de venda de energia e a eficiência nominal dos módulos.

4.4.3 Análise de sensibilidade global

Para a análise de sensibilidade global, escolheu-se o VPL para estudo. Dado a alta demanda computacional para cada indicador, optou-se por trabalhar somente com um deles. Agrupando as distribuições das variáveis de entrada geradas segundo o formato exposto na Equação 2.5.4, obtém-se as saídas $Y^{(i)} = f(X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)})$ com $i = \{1, 2, \dots, N\}$ e $N = 1000$, onde $Y = VPL$ e $X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)}$ são as variáveis de entrada dispostas na Tabela 5. Pode-se então produzir k gráficos de dispersão projetando por sua vez os N valores da saída Y selecionada contra os valores N de cada um dos k fatores de entrada. Estes gráficos de dispersão, dispostos na Figura 16, podem ser usados para investigar o comportamento dos modelos.

Figura 16: Gráficos de dispersão das variáveis aleatórias de entrada em relação ao VPL: (a) VPL x Taxa de Câmbio do Dólar; (b) VPL x Taxa de Câmbio do Euro; (c) VPL x Fator de Degradação; (d) VPL x Eficiência Nominal dos Módulos; (e) VPL x Preço de Venda de Energia no ACR; (f) VPL x WACC.



Fonte: Dados do próprio autor

Nos gráficos da Figura 16, é possível verificar que o preço de venda de energia é a variável para o qual o VPL é mais sensível, dado que é visível um formato mais acentuado dos valores plotados para esse gráfico. Outra variável cujo VPL apresenta alta sensibilidade é a taxa de câmbio do dólar. Todavia, o fator de degradação e a eficiência nominal dos módulos apresentam menor influência na saída, dado que demonstram uma grande dispersão de dados.

Em seguida, foram computados os índices de sensibilidade de primeira ordem e de efeito

total em relação ao VPL para cada variável de entrada. Esses valores estão dispostos na Tabela 10. Os índices de primeira ordem indicam o impacto individual que o fator estudado tem sobre a saída, desconsiderando os efeitos de interação entre as variáveis. O efeito total por sua vez considera não somente o efeito do parâmetro analisado, como também as interações.

Tabela 10: Índices de sensibilidade de primeira ordem (S_i) e efeito total (S_{Ti}) em relação ao VPL

Variável	S_i	S_{Ti}
Preço de Venda	0,11303	0,88972
Câmbio (Dólar)	0,09957	0,86230
$\eta_{PV,NOM}$	0,00764	0,77497
$WACC$	0,00334	0,76918
Câmbio (Euro)	0,00574	0,76769
F_{PV}	0,00253	0,76569

Fonte: Dados do próprio autor

Como foi observado nos gráficos de dispersão, o preço de venda de energia e a taxa de câmbio do dólar apresentam maior influência no VPL, tanto quando se observa seus índices de primeira ordem, quando em relação ao efeito total. Um ponto interessante a se mencionar é que, analisando o índice de primeira ordem do WACC em relação ao da taxa de câmbio do euro, o segundo aparenta ser mais influente sobre o VPL. Entretanto, observando o efeito total dos mesmos, o VPL se mostra mais sensível ao WACC do que à taxa de câmbio do euro.

4.5 Comparação entre as análises

Após a avaliação da análise de sensibilidade local e global, observou-se uma discrepância entre as variáveis de entrada para os quais o VPL é mais sensível. Segundo a análise local, as variáveis que mais influenciam no VPL são o preço de venda, a eficiência dos módulos e o fator de degradação, que provocaram um aumento de 777%, 366% e 132%, respectivamente, no seu valor esperado. Todavia, de acordo com a análise global, o efeito total para as mesmas foram de 0,88972, 0,77497 e 0,76569, nesta ordem. Esses valores são medidas adimensionais do quão sensível a saída é em relação à cada variável. O preço de venda mantém-se como a variável mais influente, e a eficiência é a terceira mais influente. Entretanto, o fator de degradação ocupa a posição mais inferior na classificação de sensibilidade global. Como na análise global considera-se todo o espaço amostral de entrada para cálculo dos coeficientes, a estimativa obtida por meio desse método informa com mais precisão os efeitos das variáveis estudadas.

4.6 Considerações finais

Nesse capítulo foram expostos os resultados obtidos para a análise técnico-econômica e para as diferentes metodologias de análise de sensibilidade. Ao comparar os resultados da análise local e global realizadas, é possível concluir que na análise local foi visto que os parâmetros mais influentes foram o preço de venda no ACR, eficiência dos módulos e fator de degradação dos módulos FV. Entretanto, apesar do preço de venda ter se mantido a variável para o qual o VPL é mais sensível, o mesmo não se manteve para os outros dois fatores na análise global. Isso pode ser derivado da forma como a análise local, mais especificamente o método *One – At – a – Time*, aborda os dados estudados. Essa forma de se realizar a análise de sensibilidade é restrita, visto que ela trabalha com um limitado conjunto de dados para calcular o efeito sobre a saída. Em contrapartida, como demonstrado na Seção 2.5, o cálculo do efeito das variáveis na saída, segundo (SALTELLI et al., 2008), considera todo o espaço amostral de entrada para que seja descartada a dependência de um único ponto no processamento do modelo.

Ademais, os índices de efeito total demonstram o quanto que as interações entre as variáveis impactam na saída. Outrossim, o efeito total pode até mesmo contradizer os próprios índices de primeira ordem, como visto para o caso do WACC e da taxa de câmbio do euro mencionadas anteriormente. Na verdade, dependendo da natureza das interações, o efeito do parâmetro na saída do modelo terá um impacto diferente.

Por fim, pontua-se que a variável econômica que apresenta maior influência no VPL foi o preço de venda de energia no ACR, resultado que pode ser observado tanto na análise local quanto na global, para os dois indicadores considerados. Por outro lado, o parâmetro técnico para o qual o VPL é mais sensível foi a eficiência nominal dos módulos, que apesar de ter apresentado uma discrepância de classificação de sensibilidade entre os diferentes métodos, foi o aspecto técnico mais influente nas duas análises de sensibilidade efetuadas.

5 Conclusão

Esse trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre duas metodologias de análise de sensibilidade, aplicadas a um modelo técnico-econômico de uma usina fotovoltaica.

Para tanto, a metodologia adotada consiste em três etapas: as análises técnica, econômica e de sensibilidade. Nas duas primeiras etapas são efetuadas as modelagens das variáveis aleatórias e estocásticas, que por sua vez são inseridas nos modelos fotovoltaico e de fluxo de caixa adotados. Dessa forma, obtém-se a energia anual para cada N cenários abordado, onde cada um desses contempla uma quantidade especificada de anos. Para esse trabalho, foram adotados 25 para cada cenário, correspondente à vida útil da usina FV. Em seguida, calcula-se o fluxo de caixa para cada caso, prosseguindo para a simulação dos indicadores de viabilidade econômica.

Na última parte da metodologia, é realizada a análise de sensibilidade. Foram utilizados dois tipos de métodos, a saber, as análises local e a global. Para a primeira, após selecionar uma variável de entrada para estudo, fixou-se os outros parâmetros em seus valores médios, e foi alterado o valor do fator estudado em sua faixa de variação. Por fim, observou-se graficamente o seu efeito nos indicadores de viabilidade econômica. De outro modo, para a análise de sensibilidade global, considerou-se um espaço amostral de entrada composto pelas distribuições aleatórias geradas para os parâmetros estudados, e segundo o método proposto por (SALTELLI et al., 2008), percorreu-se todo esse espaço. De acordo com as Equações 2.5.3 e 2.5.13, foram calculados os índices de sensibilidade de primeira ordem e de efeito total.

Ao se comparar as metodologias de análise de sensibilidade, observou-se que a análise local apresenta limitações visto que ela está limitada a uma parcela do conjunto de dados no espaço amostral de entrada. Com isso, ela não considera os efeitos das interações das variáveis. Por outro lado, a análise global apresenta mais informações sobre a influência dos parâmetros de entrada, tanto por considerar todo o espaço amostral de dados em cálculo, quanto por levar em consideração as interações entre os próprios fatores. Por esta razão, recomenda-se o seu uso quando da avaliação dos parâmetros mais influentes neste tipo de processo. Por fim, ficou evidente que a variável econômica mais influente no VPL foi o preço de venda de energia, e o parâmetro técnico para o qual o VPL é mais sensível foi a eficiência nominal dos módulos. Portanto, para estudos de viabilidade de usinas fotovoltaicas, é imprescindível o estudo detalhado sobre essas variáveis.

O maior limitante da análise de sensibilidade global é o custo computacional gasto para obter os resultados das simulações. O principal problema com as medidas baseadas em variância é esse custo. Estimar os coeficientes de sensibilidade demanda computar diversas vezes o modelo. Exemplificando com base no que foi feito neste trabalho, usou-se 1000 cenários para obter uma boa estimativa da média condicional $E(Y|X_i)$, e repetiu-se o procedimento 1000 vezes para estimar a variância. Logo, foram necessários 10^6 pontos apenas para um índice de sensibilidade. Em (SALTELLI et al., 2008) é proposto um diferente método de se obter os coeficiente de

sensibilidade de primeira ordem e de efeito total, que apresenta custo computacional inferior ao utilizado neste trabalho.

De forma a aprimorar os conhecimentos acerca da análise de sensibilidade e os principais indicadores de viabilidade econômica, apresenta-se a seguir sugestões para estudos futuros:

- Análise de sensibilidade global no estudo técnico-econômico de usinas fotovoltaicas com inserção de sistemas de baterias com diferentes estratégias de controle, para tal seria necessário adequar o modelo fotovoltaico para englobar esses sistemas, utilizando, por exemplo, controladores de carga para realizar o gerenciamento por meio do monitoramento da tensão nos terminais do acumulador. Além disso, a modelagem do fluxo de caixa abordaria os custos para a inserção dessas baterias, degradação e substituição das mesmas;
- Análise de sensibilidade global das variáveis horárias (irradiação solar, velocidade do vento, temperatura ambiente) na avaliação técnico-econômica de uma usina fotovoltaica, sendo necessária a adequação da modelagem das variáveis estocásticas de forma a serem sensibilizadas. Uma alternativa seria fixar os valores das distribuições horárias em seu valor médio, uma hora por vez, a fim de observar o efeito na saída do modelo;
- Análise de sensibilidade por meio do estudo das derivadas do modelo técnico-econômico de usinas fotovoltaicas. Assim, é possível obter uma análise mais direta do modelo estudado, e fazer a comparação com os métodos utilizados neste trabalho.

Referências

- ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015*. [S.l.], 2015. 12
- ANEEL. *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL-2022*. [S.l.], 2022. 10
- BARBOSA, L. K. P. Análise técnico-econômica acerca de diferentes sistemas de geração de energia solar fotovoltaica com base no projeto jaíba solar. 2015. 7, 13, 19, 22
- BCB. *Sistema Expectativas de Mercado*. 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/expectativas2/#/consultaSeriesEstatisticas>. 31, 42, 43
- BORGONOVO, E.; PLISCHKE, E. Sensitivity analysis: a review of recent advances. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 248, n. 3, p. 869–887, 2016. 8
- BRANKER, K.; PATHAK, M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 15, n. 9, p. 4470–4482, 2011. 22
- CANADIANSOLAR. *Catálogos de Módulos Fotovoltaicos*. 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/br/>. 30
- COSTA, A. N. et al. Análise de risco do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários para a geração de eletricidade. *Tecnia*, v. 1, n. 2, p. 111–128, 2016. 8
- DAMODARAN, A. *Applied corporate finance*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. 30
- DIAS, A. de B. et al. Techno-economic assessment of photovoltaic plants with and without tracking systems in brazil. In: IEEE. *2021 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. [S.l.], 2021. p. 1–6. 7
- EPE. *Leilões de Energia*. 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes>. 30, 41
- EPE, N. T. Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. *Nota Técnica da EPE, Rio de Janeiro*, p. 25, 2012. 19
- F, H. W. et al. *pvlb python: a python package for modeling solar energy systems*. 2018. *Journal of Open Source Software*, 3(29), 884, (2018). Disponível em: <https://doi.org/10.21105/joss.00884>. 29
- FRAUNHOFER. *PHOTOVOLTAICS REPORT*. 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>. 18
- GILMAN, P. *SAM photovoltaic model technical reference*. [S.l.], 2015. 12, 29
- IEA. *Energy Statistics Data Browser, IEA, Paris*. 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>. 7, 11
- IEA. *Global Energy Review 2021, IEA, Paris, License: CC BY 4.0*. 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>. 11

- IEA. *World Energy Outlook 2022*, IEA, Paris, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A). 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>). 7, 11
- MASRUR, H. et al. Assessing the techno-economic impact of derating factors on optimally tilted grid-tied photovoltaic systems. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 4, p. 1044, 2021. 30, 40
- NETO, D. P. et al. Methodology of investment risk analysis for wind power plants in the brazilian free market. *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis, v. 46, n. 3, p. 316–330, 2018. 8
- NETO, D. P.; DOMINGUES, E. G.; PINTO, L. S. Risk analysis of levelized cost of electricity to renewable energy in brazil. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. 7
- NETO, D. P. et al. Processo de otimização aplicada à análise de risco de investimento em geração de energia elétrica com fontes renováveis. Universidade Federal de Goiás, 2017. 7, 30, 32
- NREL. *NSRDB: National Solar Radiation Database*. 2022. Acesso em: 04 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://nsrdb.nrel.gov/>. 29
- OLIVEIRA, T. A. P. d. Metodologia para análise de risco de investimento em fontes de geração heliotérmica do tipo torre solar no mercado regulado brasileiro. 2020. 7, 8, 17, 21, 22
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. et al. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, v. 1, p. 47–499, 2014. 12
- PINTO, L. S. et al. An alternative methodology for analyzing the risk and sensitivity of the economic viability for generating electrical energy with biogas from the anaerobic bio-digestion of vinasse. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 155, p. 1401–1410, 2020. 8
- SALTELLI, A. et al. *Global sensitivity analysis: the primer*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. 14, 16, 33, 49, 50
- SALTELLI, A. et al. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. *Chichester, England*, Wiley Online Library, 2004. 13
- SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 74, p. 590–601, 2017. 11
- TORRES, G. d. S. Análise comparativa técnica e econômica de usinas heliotérmicas e fotovoltaicas no brasil. 2021. 7, 35, 38
- ZHAI, R. et al. Optimal design method of a hybrid csp-pv plant based on genetic algorithm considering the operation strategy. *International Journal of Photoenergy*, Hindawi, v. 2018, 2018. 26, 27