

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO PAOLINI

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETOS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO SOLAR E  
EÓLICA COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

CURITIBA

2024

MARCELO PAOLINI

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETOS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO SOLAR E  
EÓLICA COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Especialista em MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Junior Ruiz Garcia

CURITIBA

2024

## RESUMO

As fontes renováveis eólica e solar, usadas para produção de energia elétrica, pelo comportamento do recurso natural ser intermitente, apresentam incertezas na previsibilidade de produção de energia. Neste cenário, os projetos de geração de energia a partir de fontes renováveis eólicas e solares não utilizam toda a capacidade do sistema de transmissão de energia ao qual realizaram um investimento significativo. A incerteza na previsão de geração é agravada nos períodos de alta produção e baixa demanda de consumo. A hibridização de projetos renováveis a partir de fontes eólicas e solares surge como uma estratégia eficaz para enfrentar o desafio da sazonalidade e da utilização do sistema restrito de transmissão ao capitalizar suas características complementares. Ao combinar as vantagens da energia eólica e solar fotovoltaica, é possível mitigar significativamente a irregularidade na produção de energia, proporcionando uma fonte mais estável ao longo do tempo. Com a utilização de sistemas de armazenamento de energia, o impacto do *curtailment* é reduzido pois a produção antes limitada pode ser armazenada. O presente relatório técnico visa avaliar a viabilidade de projetos híbridos de energia renovável, integrando fontes eólicas e solares, complementadas por sistemas de armazenamento. O relatório destaca a relevância dessa abordagem diante dos desafios do efeito de *curtailment* em projetos conectados ao Sistema Interligado Nacional, enfocando a mitigação de desperdícios e a necessidade de uma geração mais estável. A revisão bibliográfica abrange tecnologias disponíveis no mercado brasileiro. Por fim, a proposta inclui apresentar um estudo de viabilidade de um projeto híbrido na configuração eólica, solar com sistema de armazenamento de energia através de utilização de baterias.

Palavras-chave: Energia Eólica, Energia Solar, Armazenamento em baterias, Complementariedade, Viabilidade Financeira.

## ABSTRACT

The renewable sources of wind and solar energy, used for electricity production, present uncertainties in predicting energy output due to the intermittent nature of the natural resource. In this scenario, projects for generating electricity from renewable wind and solar sources do not fully utilize the capacity of the energy transmission system, to which they have made a significant investment. The uncertainty in generation forecasting is exacerbated during periods of high production and low consumption demand. The hybridization of renewable projects from wind and solar sources emerges as an effective strategy to address the challenges of seasonality and the restricted use of the transmission system by capitalizing on their complementary characteristics. By combining the advantages of wind energy and photovoltaic solar energy, it is possible to significantly mitigate the irregularity in energy production, providing a more stable source over time. With the use of energy storage systems, the impact of curtailment is reduced because previously limited production can be stored. This technical report aims to assess the feasibility of hybrid renewable energy projects, integrating wind and solar sources, complemented by storage systems. The study highlights the relevance of this approach in the face of the challenges posed by curtailment effects in projects connected to the Brazilian National Interconnected System, focusing on waste mitigation and the need for more stable generation. The literature review encompasses technologies available in the Brazilian market. Finally, the proposal includes presenting a feasibility study of a hybrid project in the wind and solar configuration with an energy storage system using batteries.

Keywords: Wind Energy, Solar Energy, Battery Storage, Complementarity, Financial Feasibility.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	6
1.1	CONTEXTO E PROBLEMA	6
1.2	OBJETIVOS	6
1.3	JUSTIFICATIVA	7
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	7
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1.1.	SISTEMAS HÍBRIDOS	8
2.1.2.	SISTEMAS HÍBRIDOS NO BRASIL	9
2.1.3.	COMPLEMENTARIEDADE ENERGÉTICA	10
2.1.4.	ANÁLISE DE VIABILIDADE	10
<b>3</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO</b>	11
3.1	PROJETO EÓLICO	11
3.2	PROJETO SOLAR FOTOVOLTAICO	12
3.3	PROJETO HÍBRIDO	14
3.3.1.	ESTUDO DE COMPLEMENTARIEDADE	14
3.3.2.	DIMENSIONAMENTO DO PROJETO SOLAR	16
3.4	PROJETO HÍBRIDO SOLAR-EÓLICO	18
3.5	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	18
3.6	ANÁLISE DE VIABILIDADE INDIVIDUAL E GLOBAL	22
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	25

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

A demanda crescente por energia e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis no setor elétrico. Nesse contexto, os projetos híbridos de geração solar e eólica, aliados ao armazenamento de energia, surgem como alternativas promissoras. Contudo, a implementação desses projetos enfrenta desafios econômicos significativos. A análise dos custos de investimento (Capex) dessas tecnologias, bem como a consideração das peculiaridades do mercado, tornam-se cruciais para determinar a viabilidade econômica dessas iniciativas, especialmente em um cenário de restrições de transmissão.

Os desafios operacionais e financeiros associados à intermitência dessas fontes de energia renovável, somados às incertezas nas condições de transmissão, destacam a necessidade urgente de um modelo analítico abrangente. Este relatório pretende abordar tais questões, oferecendo uma análise da viabilidade econômica de projetos híbridos no contexto brasileiro. Ao compreender os elementos fundamentais que impactam o sucesso desses empreendimentos, podemos contribuir para o avanço de uma matriz energética mais sustentável no país.

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste relatório é analisar a viabilidade econômico-financeira de implantação de projetos híbridos solar-eólicos com armazenamento de energia na matriz energética brasileira.

Os objetivos específicos são:

- (i) Dimensionar um projeto híbrido de geração de energia renovável configurado com fontes eólica, solar e armazenamento de energia na área de interesse do estado da Bahia no Brasil;
- (ii) Apresentar projeções de custo e receita para o projeto na configuração proposta;
- (iii) Avaliar cenários de fluxo de caixa e indicadores de viabilidade.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A realização de uma análise de viabilidade econômico-financeira de sistemas híbridos de geração de energia é essencial diante do imperativo global de transição para fontes renováveis. A importância desta análise reside na necessidade de orientar decisões de investimento, mitigar riscos e fornecer *insights* estratégicos para os atores envolvidos no setor elétrico nacional. Ao considerar os custos de investimento, produção efetiva e restrições de transmissão, a avaliação de viabilidade torna-se um instrumento crucial para garantir a eficiência operacional e econômica de projetos híbridos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Este relatório emprega uma abordagem qualiquantitativa para a análise de viabilidade econômico-financeira de projetos híbridos de geração solar fotovoltaica e eólica com armazenamento de energia no Brasil, utilizando como referência a região de interesse do estado da Bahia. O desenvolvimento do modelo proposto foi estruturado considerando um conjunto abrangente de variáveis críticas. Essas variáveis incluem a capacidade de produção, restrições de transmissão e armazenamento, o custo de investimento (Capex), despesas operacionais (Opex) e preço da energia.

O relatório também utilizou referências confiáveis para os cálculos de capacidade de produção, custos de investimento e despesas operacionais associados a projetos eólicos, solares e de armazenamento de energia disponibilizados no site da Empresa Brasileira de Planejamento Energético (EPE) no Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (EPE, 2022). Essa base de dados, proveniente de uma fonte reconhecida no cenário energético nacional, assegura a qualidade e confiabilidade das estimativas utilizadas neste relatório.

A análise de Capex e Opex foi conduzida de maneira individualizada para cada componente do projeto, considerando as particularidades técnicas e os custos associados a cada tecnologia. Além disso, a produção do sistema híbrido foi calculada levando em consideração possíveis restrições de transmissão, contribuindo para uma avaliação mais realista do desempenho do sistema. Esta etapa da metodologia visa fornecer uma visão holística da capacidade de geração de energia e da eficiência do sistema em cenários variados.

Na fase seguinte, os preços de energia obtidos no site da EPE nos resultados dos últimos dois leilões de energia nova, A-4 e A-5, foram utilizados como parâmetros para a avaliação da viabilidade econômica (EPE, 2022). A comparação entre esses preços e os custos

de investimento calculados permitiu determinar a atratividade financeira dos projetos híbridos, considerando o contexto específico do mercado de energia. Essa metodologia integrada busca proporcionar uma análise completa e robusta da viabilidade econômica de um sistema híbrido, fornecendo uma referência valiosa para futuros planejamentos no setor energético.

Ao final deste relatório, o modelo proposto se configura como uma ferramenta para avaliação de viabilidade econômico-financeira de futuros projetos híbridos de geração de energia, contribuindo para a tomada de decisões informadas e sustentáveis no contexto do setor elétrico.

A revisão bibliográfica é composta por pesquisas em artigos técnicos, resoluções normativas brasileiras e consulta em sites eletrônicos.

## 2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os principais aspectos regulatórios relacionados à projetos híbridos de geração de energia no Brasil. É importante que a definição de “usina híbrida de energia” esteja clara, ou seja, trata-se de uma configuração de projeto que possui mais de uma fonte primária. Diversas combinações têm sido propostas para esse tipo de projeto das quais podemos exemplificar:

- (i) Eólica + Fotovoltaica;
- (ii) Hidráulica + Fotovoltaica;
- (iii) Heliotérmica (termossolar) + outro combustível (biomassa);
- (iv) Biomassa + gás natural;
- (v) Carvão + biomassa (coqueima).

Os exemplos citados não são as únicas combinações possíveis e outras podem existir.

### 2.1.1. SISTEMAS HÍBRIDOS

Os sistemas híbridos são aqueles formados a partir da combinação de duas ou mais tecnologias de geração de energia elétrica. No arranjo tradicional (usinas adjacentes), cada usina deve contratar Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) igual ou maior que a potência instalada. Segundo Sena e Passos (2022), nos arranjos híbridos ou associados, a contratação de uso da rede é menor do que a soma das potências individuais. O MUST, termo que será utilizado ao longo deste relatório, é definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL) (2022, p. 13) como sendo os montantes, em MW, de potência média integralizada em intervalos de 15 (quinze) minutos contratados por usuários do sistema de transmissão, por ponto de conexão e horário de contratação, estabelecidos de acordo com regulamentação da ANEEL.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (EPE) (2018), existem quatro topologias de arranjos para projetos híbridos: Usinas adjacentes, Usinas associadas, Usinas híbridas e Portfolios comerciais.

Para a desenvolvimento deste relatório foi considerado um projeto híbrido do tipo associado que segundo EPE e MME (2018, p. 8) possuem duas (ou mais) usinas de fontes energéticas distintas, com características de produção complementar e que, além de estarem próximas (podendo, inclusive, utilizar o mesmo terreno), compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e acesso à Rede Básica ou de Distribuição.

### 2.1.2. SISTEMAS HÍBRIDOS NO BRASIL

No contexto brasileiro, embora não existam incentivos diretos específicos para a implementação de projetos híbridos, é evidente o interesse de diversas instituições relevantes, como a ANEEL, a EPE e o Operador Nacional do Sistema (ONS), na adoção desses sistemas.

De acordo com Britto (2015), em 2015, no estado de Pernambuco, o Brasil testemunhou a implementação pioneira do primeiro projeto híbrido exclusivamente eólico e solar fotovoltaico. Ainda segundo Britto (2015), o Complexo Tacaratu, de propriedade da Enel Green Power (EGP), possui uma capacidade instalada de 80MW em energia eólica e 11MWp em energia solar é capaz de gerar 340GWh por ano, suficiente para abastecer 250 mil residências.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA) (2019), a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) (2019) e Associação Brasileira dos Produtores Independentes de Energia Elétrica (APINE) (2019), a EGP demonstrou que havia uma complementariedade eficaz na curva de geração do complexo híbrido Tacaratu e a contratação híbrida de MUST com uma otimização de 77 MW para o conjunto híbrido, indicando que em apenas 3,7% do tempo no ano ocorreria ultrapassagem de demanda. Esta constatação evidencia que, embora haja probabilidade de ultrapassagem de potência, quando esta ocorre perdura por pouco tempo, então os impactos na expectativa de geração mensal são relativamente pouco significativos (ABEEÓLICA; ABSOLAR; APINE, 2019, p. 16).

### 2.1.3. COMPLEMENTARIEDADE ENERGÉTICA

Segundo De Oliveira Barbosa (2006), a complementaridade energética refere-se à capacidade de duas ou mais fontes se complementarem na geração de energia em um determinado período para o atingimento de um determinado limite de geração. Nos sistemas híbridos de geração, a grande vantagem reside na possibilidade de compartilhamento do sistema de transmissão e do sistema de interesse restrito, tirando proveito da complementaridade entre as diferentes fontes. Em linhas gerais, é válido presumir que o projeto híbrido ideal não é aquele cuja potência nominal é simplesmente a soma das potências nominais de cada projeto individual.

A concepção de complementariedade neste relatório residirá entre as fontes eólica e solar fotovoltaica em base horária de cada mês do ano. Esse planejamento visa manter a variável da sazonalidade do recurso eólico e solar ao longo do ano, evitando também coincidências nos horários de pico de uma fonte com o de outra e possibilitando assim o uso eficiente do MUST. O relatório considerará como referência o Fator de Capacidade, calculando a capacidade de produção de energia de cada fonte para cada mês típico do ano.

$$FC = \frac{E}{P \times t}$$

onde:

FC: Fator de capacidade em %;

E: Capacidade de produção de energia em MWh;

P: Potência instalada em MW;

t: Tempo em horas.

### 2.1.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE

Para a análise de viabilidade será considerado o método proposto por (KASSAI, 2000), que trata da análise de retorno de investimento utilizando ferramentas como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback. Os projetos Eólico, Solar Fotovoltaico e Sistema de Armazenamento serão primeiramente avaliados de forma individual

através do VPL utilizando como referência uma Taxa de Desconto de 11,0010% divulgada pela ANEEL no despacho nº 829 de 24 de março de 2023, que estipula as taxas regulatórias mínimas para remuneração do capital em ativos de Transmissão e Geração (ANEEL, 2023).

### 3 RESULTADO E DISCUSSÃO

#### 3.1 PROJETO EÓLICO

Para fins de desenvolvimento deste relatório o Projeto Eólico localiza-se na região Nordeste do Brasil, no estado da Bahia, e terá uma potência instalada de 180 MW. Tal potência foi definida pelo somatório das potências dos projetos eólicos baianos de Baraúnas IV e Baraúnas XV divulgados pela EPE nos dois últimos leilões de energia A-4 e A-5 realizados em 2022 (EPE, 2022).

Os custos de Capex e Opex foram estimados para a implantação e operação do projeto a partir do Caderno de Parâmetros de Custos com Geração e Transmissão do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 divulgado pela EPE (EPE, 2022).

QUADRO 1 – Referências de custos para projetos eólicos e solares.

TIPO DE FONTE	VIDA ÚTIL ECONÔMICA (anos)	FAIXA DE CAPEX (R\$/kW)	O&M (R\$/kW/ano)	ENCARGOS E IMPOSTOS (R\$/kW/ano)	TEMPO MÉDIO DE DESEMBOLSO
Eólica Onshore	20	3.200 a 5.500	90	150	24
Solar Fotovoltaica	25	2.500 a 5.000	50	130	12

Fonte: Adaptada de EPE (2022).

Para este relatório foi considerado o valor médio da Faixa de Capex do Tipo de Fonte Eólica Onshore, de acordo com o Quadro 1, resultando em um valor de 4375,00 R\$/kW e totalizando um investimento de R\$ 787.500.000,00 para a potência instalada de 180.000kW do Projeto Eólico Referência. Os custos de Opex, de acordo com o Quadro 1, serão divididos em O&M, com o valor de R\$ 90,00 por kW por ano, totalizando R\$ 12.000.000,00 e Impostos e Encargos, com o valor de R\$ 150,00 por kW por ano, totalizando R\$ 27.000.000,00 por ano.

O preço da energia gerada pelo Projeto Eólico foi estimado através da média dos Preços dos Lances dos projetos eólicos Baraúnas IV e Baraúnas XV divulgados pela EPE nos dois últimos leilões de energia A-4 e A-5 realizados em 2022 (EPE, 2022).

QUADRO 2 – Preços de lance na venda de energia de projetos eólicos.

<b>PROJETO EÓLICO REFERÊNCIA</b>	<b>PREÇO DE LANCE (R\$)</b>
Baraúnas IV (A-4)	179,50
Baraúnas XV (A-4)	179,67
Baraúnas IV (A-5)	175,00
Baraúnas XV (A-5)	175,00
Média	177,29

Fonte: Adaptada de EPE (2022).

O tempo médio para construção do Projeto Eólico será de 24 meses obtido através da referência de Tempo Médio de Desembolso apresentado no Quadro 1. A vida útil do Projeto Eólico foi estimada em 20 anos conforme apresentado no Quadro 1. O Quadro 3 resume os valores de referência para o Projeto Eólico Referência que serão utilizados ao longo do desenvolvimento do relatório.

QUADRO 3 – Dimensionamento e custos do Projeto Eólico.

<b>ITEM</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>VALOR</b>
Potência instalada	MW	180,00
Capex	R\$	787.500.000,00
Desembolso do Capex	anos	2
Opex (O&M)	R\$/ano	12.000.000,00
Opex (Impostos/Encargos)	R\$/ano	27.000.000,00
Opex (Total)	R\$/ano	39.000.000,00
Preço de venda de energia	R\$/MWh	177,29
Vida útil	anos	20

Fonte: O autor (2024).

Após a definição das características do Projeto Eólico serão definidas as características do Projeto Solar Fotovoltaico para fins de tornar os dois um Projeto Híbrido.

### 3.2 PROJETO SOLAR FOTOVOLTAICO

Como premissa, foi considerado que o projeto Solar Fotovoltaico será instalado na área do Projeto Eólico e vai utilizar a mesma infraestrutura de conexão ao SIN – subestação, linha de transmissão e ponto de conexão.

Os custos de Capex e Opex foram estimados a partir do Caderno de Parâmetros de Custos com Geração e Transmissão do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 divulgado pela EPE (EPE, 2022). Conforme apresentado no Quadro 1, a faixa de Capex mínimo e máximo para o Tipo de Oferta Solar Fotovoltaica está entre 2.500 e 5.000 R\$/kW. Este relatório considerará a referência mínima de Capex de R\$ 2.500,00 por kW uma vez que os investimentos em infraestrutura para conexão ao SIN já foram realizados pelo Projeto Eólico e será agora aproveitado para o Projeto Solar Fotovoltaico, traduzindo em redução de custo.

Para as estimativas de custos de Opex considerou-se a referência mais próxima apresentada no Quadro 1, sendo R\$ 50,00 por kW por ano para custos com O&M e R\$ 130,00 por kW por ano para custos com Impostos e Encargos.

O preço da energia gerada pelo Projeto Solar Fotovoltaico foi estimado através da média dos Preços dos Lances dos projetos solares localizados na região Nordeste e divulgados pela EPE nos dois últimos leilões de energia A-4 e A-5 realizados em 2022 (EPE, 2022), sendo R\$ 176,44 por MWh.

QUADRO 4 – Preços de lance na venda de energia de projetos solares fotovoltaicos.

<b>PROJETO SOLAR FOTOVOLTAICO REFERÊNCIA</b>	<b>PREÇO DE LANCE (R\$)</b>
Belmonte 1 1	178,00
Belmonte 1 4	178,66
Belmonte 2 1	177,99
Luiz Gonzaga I	178,52
Luiz Gonzaga III	178,52
SANTA LUZIA XXVI	172,20
SANTA LUZIA XXVII	171,20
Média	176,44

Fonte: Adaptada de EPE (2022).

O tempo médio para construção do Projeto Solar Fotovoltaico será de 12 meses obtido através da referência de Tempo Médio de Desembolso apresentado no Quadro 1. A vida útil do Projeto Solar Fotovoltaico foi estimada em 25 anos conforme apresentado no Quadro 1. O Quadro 5 resume os valores de referência para o Projeto Eólico Referência que serão utilizados ao longo do desenvolvimento do relatório.

QUADRO 5 – Referências de custos do Projeto Solar Fotovoltaico.

ITEM	UNIDADE	VALOR
Potência instalada	MW	A definir
Capex	R\$/kW	2.500,00
Desembolso do Capex	anos	1
Opex (O&M)	R\$/kW	50,00
Opex (Impostos/Encargos)	R\$/kW	130,00
Opex (Total)	R\$/kW	180,00
Preço de venda de energia	R\$/MWh	176,44
Vida útil	anos	25

Fonte: Adaptada de EPE (2022).

A definição da potência instalada do Projeto Solar Fotovoltaico será feita após o estudo de complementariedade que será apresentado na seção 3.3.1.

### 3.3 PROJETO HÍBRIDO

#### 3.3.1. ESTUDO DE COMPLEMENTARIEDADE

A metodologia apresentada neste estudo considerou os dados médios horários de Fator de Capacidade de 2017 a 2019 para a fonte Eólica e de 2006 a 2017 para a fonte Solar Fotovoltaica, na região de interesse, disponibilizados pela Empresa Brasileira de Planejamento Energético (EPE) no Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (EPE, 2022). Os dados foram agrupados e foram calculadas as médias de cada hora típica de cada mês.

FIGURA 1 – Complementariedade das fontes Jan.

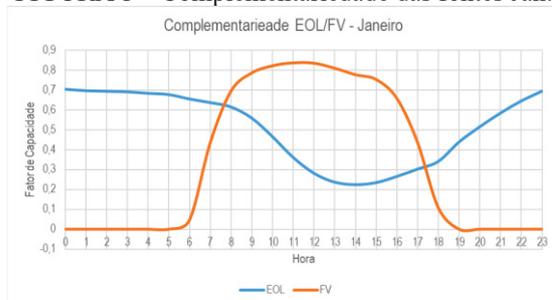
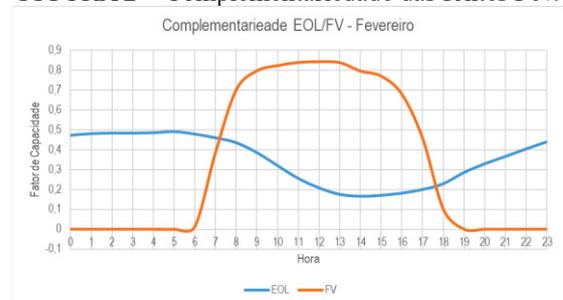


FIGURA 2 – Complementariedade das fontes Fev.



Fonte: O autor (2024).

FIGURA 3 – Complementariedade das fontes Mar.

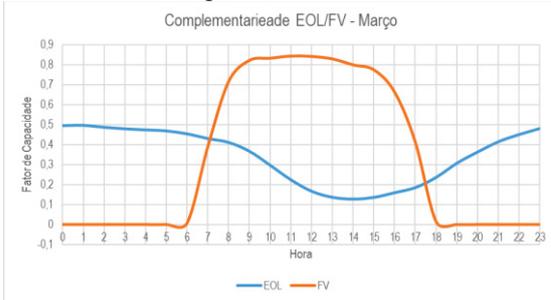


FIGURA 4 – Complementariedade das fontes Abr.

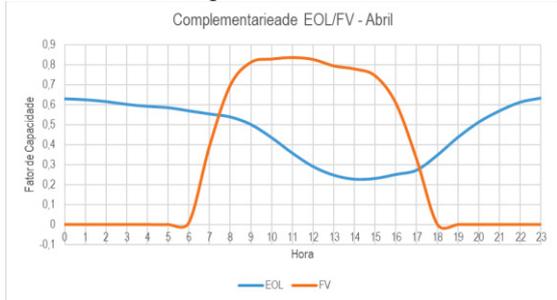


FIGURA 5 – Complementariedade das fontes Mai.

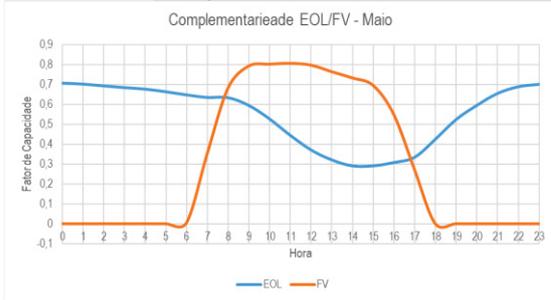


FIGURA 6 – Complementariedade das fontes Jun.

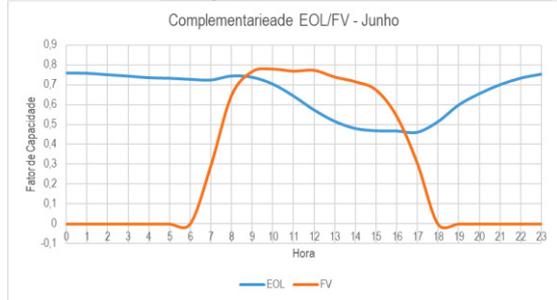


FIGURA 7 – Complementariedade das fontes Jul.

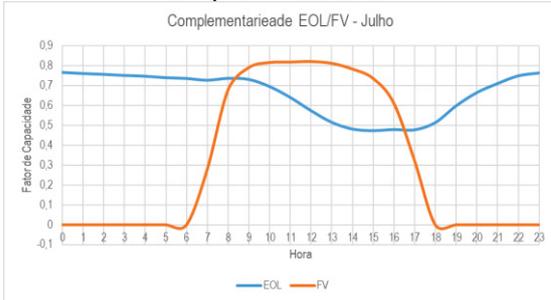


FIGURA 8 – Complementariedade das fontes Ago.

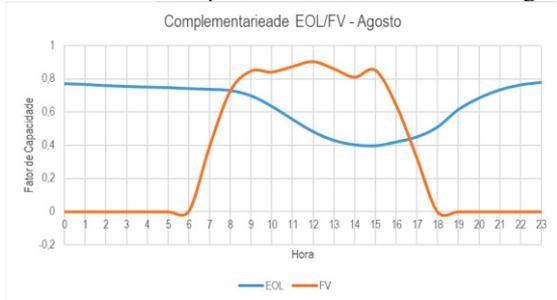


FIGURA 9 – Complementariedade das fontes Jul.

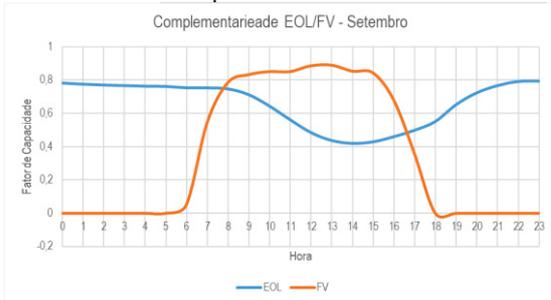
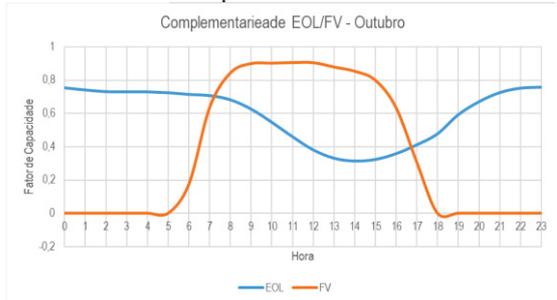


FIGURA 10 – Complementariedade das fontes Jul.



Fonte: O autor (2024).

FIGURA 11 – Complementariedade das fontes Nov.

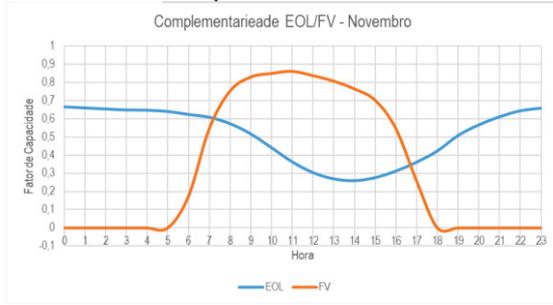
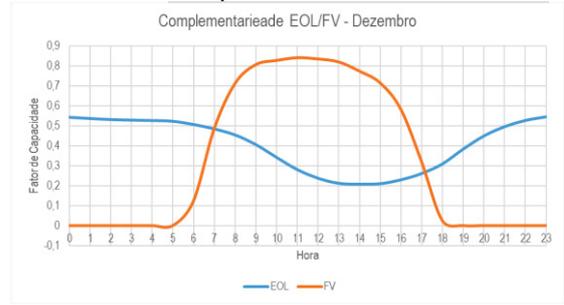


FIGURA 12 – Complementariedade das fontes Dez.



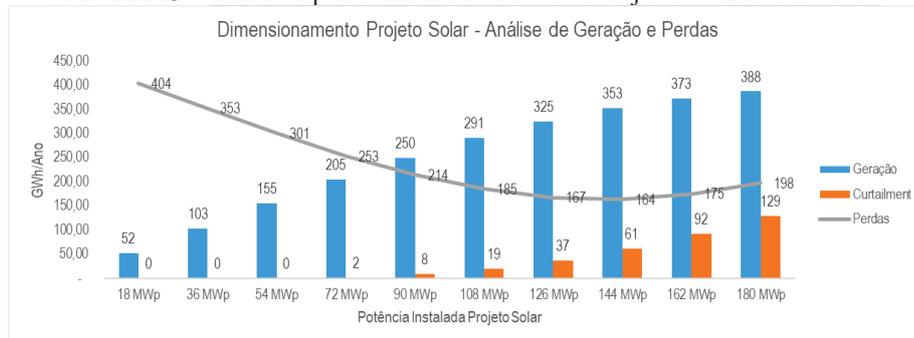
Fonte: O autor (2024).

Nota-se que ao longo de cada mês típico existem períodos em que a geração solar fotovoltaica complementarizará a geração eólica para que o Fator de Capacidade se mantenha o mais alto possível ao longo do período.

### 3.3.2. DIMENSIONAMENTO DO PROJETO SOLAR

Será adotado como premissa que o MUST do Projeto Híbrido será de 180MW, ou seja, o mesmo valor da potência instalada do Projeto Eólico. Este é o limite de potência instantânea a ser injetada no sistema de transmissão. Essa é uma das características já exploradas para a classificação do projeto como híbrido associado – a potência instalada do Projeto Solar Fotovoltaico não deve incrementar o MUST do projeto híbrido. No entanto, ao se adicionar potência instalada no Projeto Híbrido, em alguns momentos, a geração total eólica+solar poderá ultrapassar o MUST e deverá ser reduzida: este fato é conhecido como *curtailment*.

FIGURA 13 – Cenários para dimensionamento do Projeto Solar Fotovoltaico.

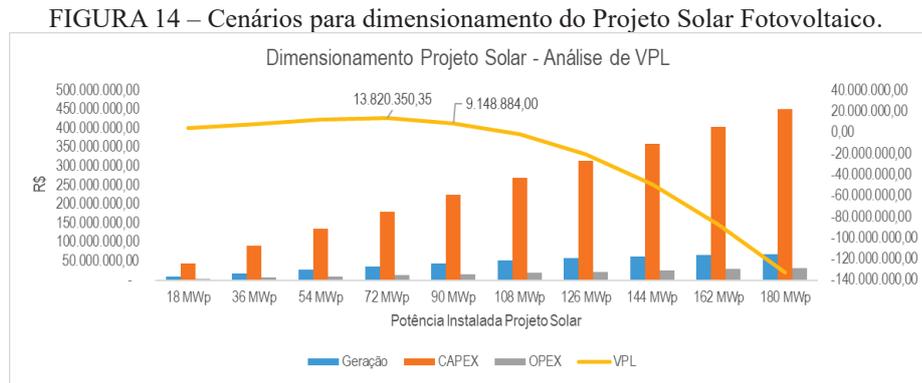


Fonte: O autor (2024).

As perdas apresentadas na Figura 13 não são gerenciáveis pois representam momentos em que existe capacidade de transmissão de energia, no entanto nem a fonte eólica nem a fonte solar tem capacidade de geração. Serão avaliados diversos cenários para a potência instalada

do Projeto Solar Fotovoltaico, de 10MWp até 180MWp, sendo definido o cenário ótimo aquele com menor perda e *curtailment* e maior retorno sobre o capital investido.

Verifica-se através da Figura 13 que o cenário de menor perda de produção de energia é aquele com o projeto solar com 144 MWp de potência instalada e o cenário de menor *curtailment* com 72 MWp. Para a escolha da melhor configuração foi definida como premissa a utilização do VPL como indicador de viabilidade. Os dez cenários foram avaliados e o resultado está apresentado abaixo.



Fonte: o autor (2024).

**QUADRO 6 – Dimensionamento e custos do Projeto Solar Fotovoltaico.**

ITEM	UNIDADE	VALOR
Potência instalada	MW	72
Capex	R\$	180.000.000,00
Desembolso do Capex	anos	1
Opex (O&M)	R\$	3.600.000,00
Opex (Impostos/Encargos)	R\$	9.360.000,00
Opex (Total)	R\$	12.960.000,00
Preço de venda de energia	R\$/MWh	176,44
Vida útil	anos	25

Fonte: O autor (2024).

Com base nos cálculos e estudos apresentados, a potência instalada de 72MWp foi definida para o projeto Solar Fotovoltaico, escolha do melhor retorno sobre o valor investido e menor nível de *curtailment*. Definida a potência do Projeto Solar Fotovoltaico, o Quadro 5 foi feito para refletir os valores totais, sendo estes apresentados na Quadro 6.

### 3.4 PROJETO HÍBRIDO SOLAR-EÓLICO

O Projeto Híbrido Associado toma forma com duas fontes, sendo uma Eólica, principal, com 180MW de potência instalada, e uma segunda fonte, Solar Fotovoltaica, com potência instalada de 72MWp. Na configuração proposta haverá um ganho de 13% no Fator de Capacidade, otimizando o uso do sistema de transmissão. Em outras palavras, o Projeto Solar Fotovoltaico está complementando a produção de energia em 13%, o que representa 204,92 GWh anuais.

FIGURA 15 – Estudo de complementariedade.



Fonte: O autor (2024).

Nota-se ainda pela Figura 15, que existe uma capacidade disponível no MUST de 34% ou 537,6 GWh anuais a qual pode ser aproveitada através de um sistema de armazenamento de energia.

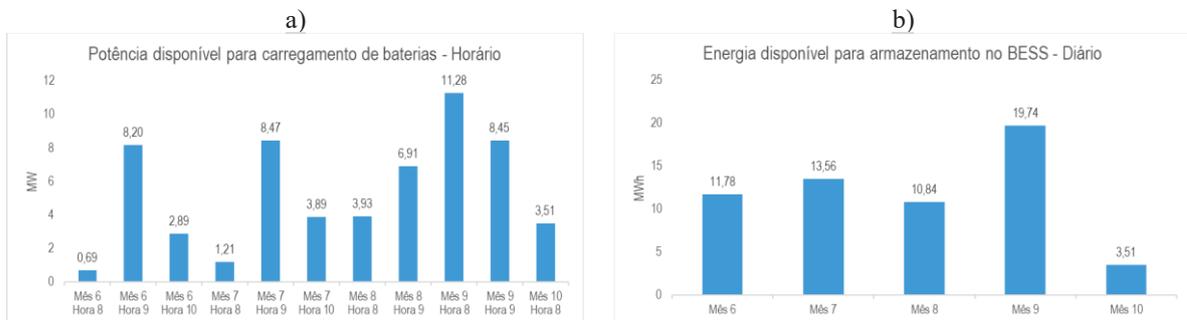
### 3.5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Como pode ser observado na Figura 13, para a configuração proposta para o Projeto Solar Fotovoltaico, haverá por ano um *curtailment* da ordem de 2 GWh além de uma perda não aproveitada na capacidade do sistema de transmissão de 253 GWh. Em outras palavras, existe uma oportunidade de armazenamento de 2 GWh por ano e momentos disponíveis para a transmissão dessa produção – 253GWh livres para escoar 2 GWh possíveis. A proposta deste relatório será de dimensionar um sistema de armazenamento de energia por baterias para uma capacidade máxima de 2GWh por ano e encontrar momentos ao longo do tempo em que essa energia pode ser injetada no SIN.

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) (2022) os sistemas de armazenamento de energia por bateria em escala de rede (BESS) desempenham um papel crucial no armazenamento do excedente de energia gerado por fontes renováveis, como a energia eólica e solar. Tais sistemas possibilitam o carregamento das baterias durante os períodos de baixa demanda de eletricidade e armazenam essa energia para ser liberada durante os picos de demanda ou para suprir lacunas quando as fontes renováveis, como vento e sol, não conseguem atender à demanda necessária.

A capacidade do sistema de baterias foi definida através do estudo de complementariedade e resultou nos dias de cada mês com ocorrência de *curtailment*, que ao invés de serem perdidos serão armazenados no BESS. A capacidade de carga horária representa a potência injetada pelo projeto híbrido no intervalo de uma hora – nesse momento o sistema de baterias está carregado e não pode absorver mais geração. Nas horas seguintes deve haver disponibilidade do sistema para escoar essa energia, permitindo que o BESS fique pronto para receber nova carga.

FIGURA 16 – Dimensionamento do sistema de armazenamento BESS.

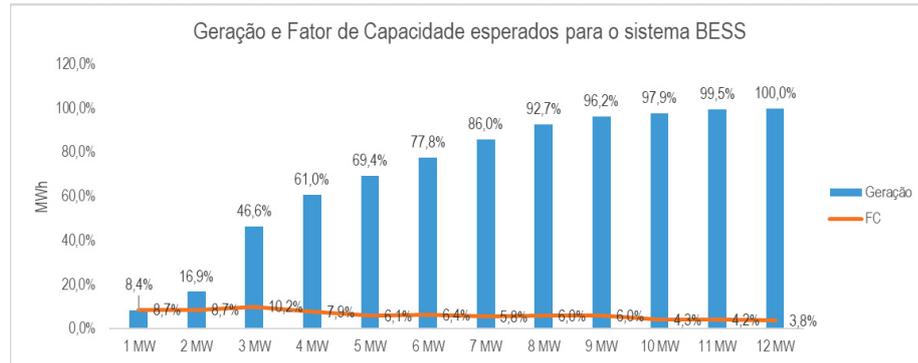


Fonte: O autor (2024).

Conforme mostrado na Figura 16, nota-se que nas primeiras horas do dia haverá o carregamento das baterias e nas horas posteriores o seu descarregamento pela injeção no SIN.

Os sistemas avaliados neste relatório foram baseados em dados divulgados pela fabricante WEG (WEG, 2024). Para avaliar a melhor configuração para o BESS, foram avaliados doze cenários, partindo de um sistema de 1MW até um sistema de 12MW com capacidade de armazenamento de energia entre 1 MWh e 41,3MWh.

FIGURA 17 – Dimensionamento do sistema de armazenamento BESS.



Fonte: O autor (2024).

As referências de custos de Capex e Opex foram obtidas a partir do Caderno de Parâmetros de Custos com Geração e Transmissão do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 divulgado pela EPE (EPE, 2022).

QUADRO 7 – Referências de custos para o sistema de armazenamento BESS.

TIPO DE FONTE	VIDA ÚTIL ECONÔMICA (anos)	CAPEX REFERÊNCIA (R\$/kW)	O&M (R\$/kW/ano)	ENCARGOS E IMPOSTOS (R\$/kW/ano)	TEMPO MÉDIO DE DESEMBOLSO
Armazenamento com baterias	20	6.200	60	270	12

Fonte: Adaptada de EPE (2022).

Conforme mostrado no Quadro 7, a vida útil de um projeto BESS está estimada em 20 anos e o tempo médio para instalação do sistema de 12 meses.

Para a escolha do melhor cenário, assim como feito para o Projeto Solar Fotovoltaico, foi realizada a análise do VPL. No entanto, para este projeto, todos os cenários resultaram em VPLs negativos. Dessa forma, foi escolhido o cenário de menor impacto no fluxo de caixa global do Projeto Híbrido, ou seja, aquele com o maior VPL.

QUADRO 8 – Cenários de VPL para o sistema de armazenamento.

POTÊNCIA (MW)	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO (MWh)	FATOR DE CAPACIDADE (%)	VPL (R\$)
1	1	8,7	- 7.759.178,89
2	2	8,7	- 15.518.357,78
3	6,3	10,2	- 22.791.117,96
4	10,6	7,9	- 30.413.700,87
5	18	6,1	- 38.174.145,49
6	19	6,4	- 45.934.590,11
7	23,3	5,8	- 53.698.691,75
8	24,3	6,0	- 61.498.373,89
9	25,3	6,0	- 69.370.081,37
10	36	4,3	- 77.284.944,62
11	37	4,2	- 85.199.807,87
12	41,3	3,8	- 93.141.841,70

Fonte: O autor (2024).

O sistema escolhido para o sistema de armazenamento terá uma potência instalada de 1 MW, capacidade de armazenamento de 1 MWh o que representa uma utilização de 8,7% da geração disponível do *curtailment* do Projeto Solar Fotovoltaico.

QUADRO 9 – Referências de custos do Sistema de Armazenamento.

ITEM	UNIDADE	VALOR
Potência instalada	MW	1
Capex	R\$	6.200.000,00
Desembolso do Capex	anos	1
Opex (O&M)	R\$	60.000,00
Opex (Impostos/Encargos)	R\$	270.000,00
Opex (Total)	R\$	330.000,00
Preço de venda de energia	R\$/MWh	176,44
Vida útil	anos	20

Fonte: O autor (2024).

Com base no dimensionamento do sistema de armazenamento foram calculadas as estimativas de custo de implantação e operação do sistema de armazenamento os quais estão resumidos no Quadro 9.

### 3.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE INDIVIDUAL E GLOBAL

A análise de viabilidade será realizada primeiramente através do cálculo do Valor Presente Líquido individual de cada projeto. Em seguida será realizada uma análise global, com a apresentação de mais dois indicadores, a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback.

Os valores de VPL para os projetos Solar Fotovoltaico e Armazenamento de Energia já foram calculados para a definição da potência instalada de cada projeto. Apesar do valor negativo para o projeto do Sistema de Armazenamento de Energia, o VPL global manteve-se positivo. A decisão de seguir ou não com a implantação do projeto de armazenamento de energia vai variar de acordo com o perfil do investidor. Para fins de desenvolvimento deste relatório serão considerados os dois cenários, sendo o primeiro na configuração Eólica + Solar Fotovoltaica e o segundo na configuração Eólica + Solar + Armazenamento.

QUADRO 10 – Primeira análise de viabilidade pelo VPL individual.

	DESPESA (R\$)		RECEITA ANUAL (R\$)	VIDA ÚTIL (anos)	VPL (R\$)
Eólica	Capex	787.500.000,00	147.914.564,84	20	29.582.506,14
	Opex Anual	39.000.000,00			
Solar	Capex	180.000.000,00	36.156.498,77	25	13.820.350,35
	Opex Anual	12.960.000,00			
BESS	Capex	6.200.000,00	26.995,54	20	- 7.759.178,89
	Opex Anual	330.000,00			

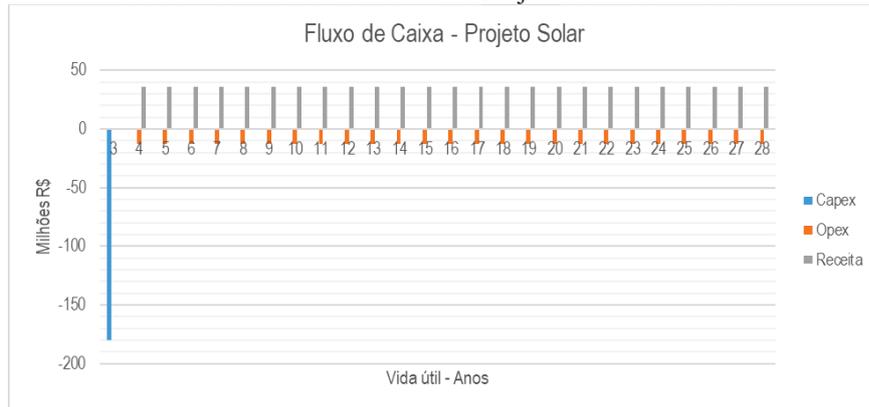
Fonte: O autor (2024).

FIGURA 18 – Fluxo de Caixa do Projeto Eólico.



Fonte: O autor (2024).

FIGURA 19 – Fluxo de Caixa do Projeto Solar Fotovoltaico.



Fonte: O autor (2024).

FIGURA 20 – Fluxo de Caixa do Sistema de Armazenamento BESS.

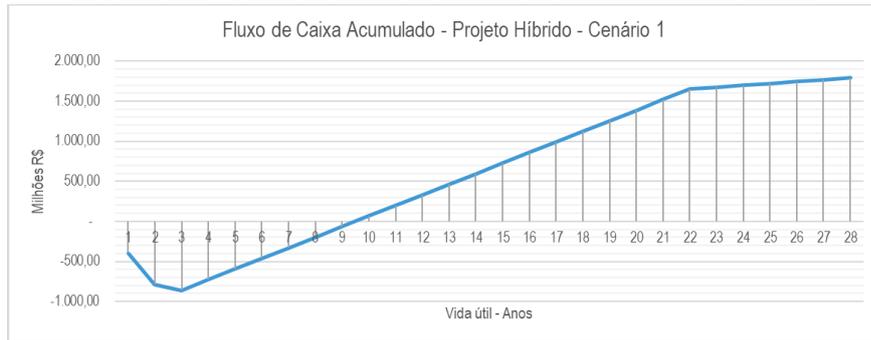


Fonte: O autor (2024).

Com base nos fluxos de caixa individuais mostrados acima foram calculadas as TIRs, sendo 11,62% para o Projeto Eólico e 12,15% para o Projeto Solar Fotovoltaico. Ambos resultados se mostraram superiores à referência de 11,001% estipulada pela ANEEL como referência de remuneração sobre o capital investido em ativos de Geração (ANEEL, 2023). Já o Sistema de Armazenamento apresenta fluxos de caixa sempre negativos.

Considerando os prazos de implantação de cada projeto, para os Fluxos de Caixa Globais foi definido como premissa a construção do Projeto Eólico nos anos 1 e 2 e a construção do Projeto Solar Fotovoltaico no ano 3. A instalação do Sistema de Armazenamento, no Cenário 2, ocorrerá no ano 4. Dessa forma existe um ganho em fluxo de caixa uma vez que no ano 3 já é observado um fluxo positivo de receita do Projeto Eólico.

FIGURA 21 – Fluxo de Caixa do Sistema de Armazenamento BESS.



Fonte: O autor (2024).

FIGURA 22 – Fluxo de Caixa do Sistema de Armazenamento BESS.



Fonte: O autor (2024).

A partir dos fluxos de caixa globais mostrados nas Figuras 21 e 22 foram calculados os demais indicadores resultando no Quadro 11.

QUADRO 11 – Indicadores de viabilidade para o Projeto Híbrido

	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR (%)</b>	<b>PAYBACK (anos)</b>
Cenário 1	40.799.210,41	11,71	9,50
Cenário 2	29.452.627,62	11,51	9,62

Fonte: O autor (2024).

Os indicadores utilizados mostram que ambos os cenários podem ser considerados viáveis pela ótica dos três indicadores utilizados. A diferença entre TIR e Payback são mínimas, no entanto a diferença entre o VPL é substancial, tornando, pela ótica do investimento e retorno o Cenário 1 mais favorável. No entanto, a decisão de investimento deve se basear no perfil e aderência a risco do investidor além das particularidades de cada projeto.

## 4 CONCLUSÃO

Com base na análise realizada, é possível concluir que os projetos híbridos associados de geração de energia na configuração Eólica + Solar Fotovoltaica, aliados ao armazenamento de energia, apresentam indicativos de viabilidade econômico-financeira na área de interesse definida, servindo como base para estudos de viabilidade mais aprofundados e em outras áreas do território brasileiro.

A análise individual dos projetos evidenciou a importância de se considerar apenas técnicos e econômicos para determinar a viabilidade de implementação e a melhor configuração um projeto híbrido associado. Apesar das incertezas do mercado e às condições de limitação do SIN, os resultados obtidos revelaram que projetos híbridos têm potencial para contribuir significativamente para a matriz energética do país.

É crucial ressaltar que a escolha entre diversos cenários deve ser cuidadosamente ponderada, levando em conta não apenas os indicadores de retorno, como VPL, TIR e Payback, mas também o perfil de risco do investidor e as características específicas de cada projeto. Portanto, a decisão final de investimento deve ser baseada em uma análise abrangente que considere tanto os aspectos técnicos quanto os financeiros, visando garantir a eficiência operacional e econômica do projeto.

## REFERÊNCIAS

ABEEólica. **Complementaridade Eólico-Solar para a região Nordeste**. Disponível em <https://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/07/Complementaridade-Eolico-Solar-para-NE-r2.docx>. Acesso em: 10 nov. 2023.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031\\_RevisaoPosCP\\_rvFinal\\_v2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf). Acesso em: 10 nov. 2023.

EPE. **Caderno de Parâmetros de Custos PDE2031**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno%20de%20Par%C3%A2metros%20de%20Custos%20-%20PDE2031.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.

EPE. **Informe - Usinas Híbridas: Conceitos, barreiras à sua viabilização e propostas**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/Informe%20Usinas%20H%C3%ADbridas.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.

EPE;MME. **Usinas Híbridas - Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/Informe%20Usinas%20H%C3%ADbridas.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.

EPE. **LEN A-5 2022 – Informe de Vencedores**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao665/Informe%20Vencedores%20LEN%20A5\\_2022.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao665/Informe%20Vencedores%20LEN%20A5_2022.pdf). Acesso em: 11 jan. 2024.

EPE. **LEN A-4 2022 – Informe Técnico de Vencedores**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-644/Informe%20Habilitados%20e%20Vencedores%20LEN%20A4-2022.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2024.

CCEE. **37º Leilão de Energia Nova A-5. Relatório de Resultados do Leilão**. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/documents/80415/919432/resultado\\_site\\_37len\\_a5.xlsx/980fd1a7-d170-e51e-4743-c19d623a3d48](https://www.ccee.org.br/documents/80415/919432/resultado_site_37len_a5.xlsx/980fd1a7-d170-e51e-4743-c19d623a3d48). Acesso em: 11 jan. 2024.

CCEE. **36º Leilão de Energia Nova A-4. Relatório de Resultados do Leilão.** Disponível em:

[https://www.ccee.org.br/documents/80415/919432/resultado\\_site\\_36LENA4.xlsx/d8b62517-f752-8b07-4885-bcbe32c7b5e8](https://www.ccee.org.br/documents/80415/919432/resultado_site_36LENA4.xlsx/d8b62517-f752-8b07-4885-bcbe32c7b5e8). Acesso em: 11 jan 2024.

BRITTO, C. **Primeiro parque híbrido de energia renovável do país é inaugurado em Tacaratu.** Disponível em: <https://www.carlosbritto.com/primeiro-parque-hibrido-de-energia-renovavel-do-pais-e-inaugurado-em-tacaratu>. Acesso em: 11 jan. 2024.

ABEEÓLICA;ABSOLAR;APINE. **Contribuições para a Consulta Pública no 014/2019.** Disponível em: [https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas-antigas?p\\_p\\_id=participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet&p\\_p\\_lifecycle=2&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_cacheability=cacheLevelPage&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_pos=1&p\\_p\\_col\\_count=2&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_idDocumento=38393&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_tipoFaseReuniao=fase&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp](https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_idDocumento=38393&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp). Acesso em: 16 jan. 2024.

SENA, F., PASSOS, R. **Usinas Híbridas e Associadas: Conceitos e Desafios.** Disponível em: [https://www.headenergia.net/post/usinas-h%C3%ADbridas-e-associadas-conceitos-e-desafios#:~:text=No%20arranjo%20tradicional%20\(usinas%20adjacentes,a%20soma%20das%20pot%C3%A2ncias%20individuais](https://www.headenergia.net/post/usinas-h%C3%ADbridas-e-associadas-conceitos-e-desafios#:~:text=No%20arranjo%20tradicional%20(usinas%20adjacentes,a%20soma%20das%20pot%C3%A2ncias%20individuais). Acesso em: 16 jan. 2024.

EPE. **Geração Eólica e Fotovoltaica: Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos: metodologias e premissas.** Nota técnica, Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-dados-de-entrada-para-modelos-eletricos-e-energeticos-metodologias-e-premissas-nova-versao>. Acesso em: 16 jan. 2024.

ANEEL. **DESPACHO Nº 829, DE 24 DE MARÇO DE 2023.** Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp2023829ti.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2024.

WEG. **BESS Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias.** Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0e/h3c/WEG-ESSW-sistema-de-armazenamento-de-energia-50100243-pt.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2024.

IPEA. **Nova tecnologias e Infraestrutura do Setor Elétrico Brasileiro – Armazenamento de Energia em Baterias.** Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11111/1/td\\_2746.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11111/1/td_2746.pdf). Acesso em: 10 fev. 2024

ANEEL. **Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica**. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221052\\_2.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221052_2.pdf). Acesso em: 17 fev. 2024.

KASSAI, José Roberto. **Retorno de investimento: abordagem matemática e contábil do lucro empresarial**. São Paulo: Ed. Atlas AS, 2000.

DE OLIVEIRA BARBOSA, C. F. **Avaliação tecnológica, operacional e de gestão de sistemas híbridos para geração de eletricidade na região amazônica**. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/handle/2011/3340>. Acesso em: 17 fev. 2024.