

**DIMENSIONAMENTO E VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE PROJETOS FOTOVOLTAICOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO*****DIMENSIONING AND TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY OF PHOTOVOLTAIC PROJECTS IN SEWAGE TREATMENT PLANTS******DIMENSIONAMIENTO Y VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE PROYECTOS FOTOVOLTAICOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES***Joice Consulín Ribeiro<sup>1</sup>, Virnei Silva Moreira<sup>2</sup>, Juliana Almansa Malagol<sup>3</sup>

e768178

<https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8178>

PUBLICADO: 06/2026

**RESUMO**

Este estudo apresenta uma abordagem viável para o desenvolvimento e avaliação de desempenho de projetos fotovoltaicos aplicados a infraestruturas urbanas de saneamento, tendo como estudo de caso as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) Costeira e Cominense, em Paranaguá-PR. A proposta integra análise técnica, dimensionamento energético e avaliação econômico-financeira como instrumentos estruturados de suporte à tomada de decisão no processo de projeto. A partir de dados de consumo médio mensal de 28.245 kWh/mês e 41.749 kWh/mês, respectivamente, foram dimensionados sistemas *on-grid* de 320,24 kWp e 473,34 kWp, considerando a irradiação local e critérios de compatibilidade elétrica. O estudo incorpora indicadores de desempenho energético e viabilidade econômica, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback*, além de diretrizes de gestão ambiental. Os resultados indicam retorno econômico a partir do sétimo ano e viabilidade financeira ao longo de 25 anos, com redução de custos operacionais e emissões de gases de efeito estufa. Conclui-se que a abordagem utilizada fornece subsídios técnicos e econômicos que podem nortear o desenvolvimento integrado de projetos sustentáveis em concessionárias de saneamento, contribuindo para a gestão da qualidade e para decisões baseadas em desempenho e sustentabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Avaliação de desempenho. Infraestrutura de saneamento. Sistemas fotovoltaicos.

**ABSTRACT**

*This study presents a viable approach for the development and performance evaluation of photovoltaic projects applied to urban sanitation infrastructures, having as a case study the Sewage Treatment Plants (ETE) Costeira and Cominense, in Paranaguá-PR. The proposal integrates technical analysis, energy dimensioning and economic-financial evaluation as structured instruments to support decision-making in the design process. Based on average monthly consumption data of 28,245 kWh/month and 41,749 kWh/month, respectively, on-grid systems of 320.24 kWp and 473.34 kWp were dimensioned, considering local irradiation and electrical compatibility criteria. The study incorporates energy performance and economic feasibility indicators, such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and payback, as well as environmental management guidelines. The results indicate economic return from the seventh year and financial viability over 25 years, with reduced operating costs and greenhouse gas emissions. It is concluded that the approach used provides technical and economic subsidies that can guide the integrated development of sustainable projects in sanitation concessionaires, contributing to quality management and decisions based on performance and sustainability.*

<sup>1</sup> UFPR, bacharel.<sup>2</sup> UFSM, doutor.<sup>3</sup> UFU, doutora.



**KEYWORDS:** *Performance evaluation. Sanitation infrastructure. Photovoltaic systems.*

### **RESUMEN**

*Este estudio presenta un enfoque viable para el desarrollo y evaluación del desempeño de proyectos fotovoltaicos aplicados a infraestructuras de saneamiento urbano, teniendo como caso de estudio las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Costeras y Cominense (ETE), en Paranaguá-PR. La propuesta integra análisis técnico, dimensionamiento energético y evaluación económico-financiera como instrumentos estructurados para apoyar la toma de decisiones en el proceso de diseño. Basándose en datos de consumo mensual medio de 28.245 kWh/mes y 41.749 kWh/mes, respectivamente, se diseñaron sistemas conectados a la red de 320,24 kWp y 473,34 kWp, teniendo en cuenta los criterios de irradiación local y compatibilidad eléctrica. El estudio incorpora indicadores de rendimiento energético y viabilidad económica, como el Valor Neto Presente (VAN), la Tasa Interna de Retorno (IRR) y el retorno del dinero, así como directrices de gestión medioambiental. Los resultados indican un retorno económico del séptimo año y viabilidad financiera a lo largo de 25 años, con costes operativos reducidos y emisiones de gases de efecto invernadero. Se concluye que el enfoque utilizado proporciona subvenciones técnicas y económicas que pueden guiar el desarrollo integrado de proyectos sostenibles en concesionarios de saneamiento, contribuyendo a la gestión de la calidad y a las decisiones basadas en el rendimiento y la sostenibilidad.*

**PALABRAS CLAVE:** *Evaluación del desempeño. Infraestructura sanitaria. Sistemas fotovoltaicos.*

### **INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas têm intensificado o debate global sobre a necessidade de transição para matrizes energéticas mais sustentáveis e resilientes. A crescente demanda por energia elétrica, associada ao crescimento populacional, às exigências ambientais e à adaptação das infraestruturas às novas condições climáticas, impõe desafios significativos ao planejamento energético (GUTIERREZ, 2024).

No Brasil, projeções de longo prazo indicam que o consumo nacional poderá atingir 2.100 TWh/ano até 2050, enquanto no estado do Paraná estima-se um aumento de aproximadamente 93% na demanda em comparação a 2015 (TIEPOLO, 2018; EPE, 2020). Esse cenário reforça a necessidade de diversificação da matriz elétrica e de incorporação de fontes renováveis, de modo a garantir segurança energética, estabilidade tarifária e sustentabilidade ambiental.

Paralelamente, conforme mencionado por Mendes et al. (2020), a escassez hídrica recorrente e o aumento contínuo das tarifas de energia têm estimulado o interesse por sistemas de geração distribuída, especialmente em unidades com elevado consumo energético, como as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Tais infraestruturas urbanas operam continuamente e apresentam perfis de carga estáveis, tornando-se potenciais candidatas à integração de sistemas fotovoltaicos. O Sistema Fotovoltaico (SFV) destaca-se como alternativa tecnológica consolidada para geração de energia elétrica, por meio da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Além de contribuir



para a redução de emissões de gases de efeito estufa, os SFVs apresentam baixa demanda de manutenção e vida útil estimada em 25 anos, o que favorece a redução de custos operacionais no longo prazo (DUARTE e ARAÚJO, 2025).

Entretanto, a implantação de sistemas fotovoltaicos em infraestruturas de saneamento não deve ser tratada apenas como decisão técnica ou econômica isolada. Trata-se de um processo de projeto que envolve etapas de diagnóstico energético, dimensionamento, compatibilização técnica, análise de desempenho e avaliação de viabilidade financeira, demandando abordagem metodológica estruturada e suporte à tomada de decisão (BORGES *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a escassez de abordagens integradas para o desenvolvimento e avaliação de projetos fotovoltaicos aplicados a infraestruturas urbanas de saneamento evidencia uma lacuna no campo da gestão e tecnologia de projetos. O diferencial e a inovação metodológica deste trabalho residem na construção de um modelo integrado, que cruza restrições espaciais reais de infraestruturas existentes, como o sombreamento comum em ETEs verticais ou compactas, com o dimensionamento elétrico de alta eficiência, e a modelagem financeira de longo prazo indexada a cenários de reajuste tarifário real do setor.

Assim, este estudo tem o objetivo de desenvolver e aplicar uma abordagem sistemática que articula análise técnica, dimensionamento energético e avaliação econômico-financeira como instrumentos estruturados de apoio ao processo de projeto, tendo como estudo de caso duas Estações de Tratamento de Esgoto gerenciadas pela companhia privada de saneamento Iguá, no município de Paranaguá, litoral do Paraná.

Para tal, tem-se como objetivos específicos o levantamento do consumo médio de energia elétrica nas estações, o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para atendimento dessa demanda, a estimativa da área necessária para implantação, e a análise da viabilidade técnica e econômica dos sistemas fotovoltaicos.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### Transição energética e infraestrutura urbana

O acesso à energia sustentável e acessível constitui um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas para 2030 (ONU, 2024). A transição energética, fundamentada na ampliação do uso de fontes renováveis, é reconhecida como estratégia central para mitigação das mudanças climáticas e redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IRENA, 2019).



Entre 2019 e 2023, os investimentos globais em energias limpas cresceram aproximadamente 50%, atingindo US\$ 1,8 trilhão (IEA, 2024). Contudo, essa expansão ainda apresenta forte concentração em economias avançadas (SANTANA et al., 2020), revelando assimetrias estruturais na implementação de soluções sustentáveis.

No contexto do Acordo de Paris, o Brasil assumiu metas de redução de emissões de 48,4% até 2025 e 53,1% até 2030, considerando 2005 como ano-base (TALANOA, 2023). Entretanto, projeções indicam risco de não cumprimento dessas metas (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2025), reforçando a necessidade de diversificação da matriz energética.

Embora o Brasil apresente matriz predominantemente renovável, com participação superior a 40% nas últimas duas décadas (EPE, 2023), a dependência hidrelétrica expõe vulnerabilidades associadas à variabilidade hídrica, como evidenciado na crise de 2014 (CRAIDE, 2014; CRUZ, 2014).

Tal cenário evidencia a necessidade de planejamento energético estruturado para infraestruturas urbanas críticas, especialmente aquelas intensivas em consumo elétrico.

Nesse contexto, projetos energéticos aplicados à infraestrutura urbana demandam modelos integrados que articulem viabilidade técnica, econômica e ambiental.

### Sistemas fotovoltaicos como variáveis de projeto

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da radiação solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico (DUFFIE e BECKMAN, 2013). O potencial brasileiro é elevado, com incidência anual superior a 3.000 horas de insolação e irradiação média entre 3.500 e 6.250 Wh/m<sup>2</sup>.dia (PEREIRA et al., 2017). Para fins de projeto, a geração anual estimada pode ser expressa pela Equação 1:

$$E = G \cdot A \cdot \eta \cdot PR \quad ($$

onde:  $E$  é a energia gerada (kWh);  $G$  é a irradiação solar incidente (kWh/m<sup>2</sup>);  $A$  é a área do módulo (m<sup>2</sup>);  $\eta$  é a eficiência do módulo; PR é a performance ratio do sistema, que consiste no fator de desempenho.

Ainda, conforme Araujo et al (2019), a performance pode variar entre 75% e 85%. Então, de forma cautelosa, neste estudo o PR foi estimado em 75%, considerando perdas típicas decorrentes da conversão de energia, degradação dos módulos ao longo do tempo e variabilidade climática.

O dimensionamento adequado depende de variáveis técnicas críticas, como tecnologia do módulo, tipo de sistema (*on-grid* ou *off-grid*) e fator de dimensionamento do inversor (FDI), conforme Equação 2 definida por (CREMASCO et al., 2021; LIMA e NUNES, 2022):

$$FDI = \frac{P_{inv}}{P_{mod}} \quad ($$



onde:  $P_{inv}$  corresponde à potência nominal do inversor e  $P_{mod}$  à potência instalada dos módulos.

O marco regulatório brasileiro, especialmente a Lei 14.300/2022 e a Resolução ANEEL 1059/2023, redefine critérios de compensação de créditos e impacta diretamente a modelagem econômico-financeira dos projetos. Assim, os sistemas fotovoltaicos devem ser analisados não apenas sob perspectiva tecnológica, mas como conjunto de variáveis decisórias interdependentes que influenciam desempenho energético e viabilidade econômica.

### Modelos de avaliação de viabilidade e desempenho

A literatura de gestão de projetos energéticos destaca a importância da análise integrada de desempenho técnico e econômico, especialmente em empreendimentos intensivos em capital e com horizonte de longo prazo (RIBEIRO et al., 2017; BONETTO, et al. 2022).

O Valor Presente Líquido (VPL) é amplamente utilizado como critério de decisão em análise de investimentos, sendo considerado o método mais consistente sob a ótica financeira (RIBEIRO et al., 2017). É expresso pela Equação 3:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad ($$

onde:  $FC_t$  representa o fluxo de caixa no período  $t$ ,  $i$  a taxa de desconto e  $n$  o horizonte de análise. Os projetos são considerados economicamente viáveis quando  $VPL > 0$ . A Taxa Interna de Retorno (TIR) corresponde à taxa que zera o VPL, conforme a Equação 4 (BONETTO, et al. 2022):

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i^*)^t} \quad ($$

A TIR representa a taxa de retorno implícita do investimento, sendo aceitável quando superior à taxa mínima de atratividade estabelecida. O *payback*, por sua vez, mede o tempo necessário para recuperação do investimento inicial, sendo amplamente utilizado como indicador complementar de risco e liquidez (Equação 5) (RIBEIRO et al., 2017):

$$\sum_{t=1}^T FC_t = I_0 \quad ($$

onde:  $I_0$  é o investimento inicial e  $T$  o período necessário para que o fluxo de caixa acumulado iguale o capital investido.

Em análises de projetos energéticos, recomenda-se ainda a avaliação pelo Custo do Ciclo de Vida (LCC) conforme Equação 6, que incorpora custos de instalação, operação e manutenção ao longo da vida útil do sistema (BONETTO, et al. 2022):



$$LCC = C_{inst} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{op,t} + C_{man,t}}{(1+i)^t} \quad ($$

onde:  $C_{inst}$  representa o custo de instalação,  $C_{op,t}$  os custos operacionais no período e  $C_{man,t}$  os custos de manutenção.

Complementarmente, indicadores energéticos como o Performance Ratio (PR) e fatores de disponibilidade operacional são utilizados para avaliar o desempenho técnico do sistema, permitindo relacionar geração real e geração teórica esperada (CARNEIRO e SCHRÖDER, 2024).

Entretanto, observa-se que grande parte dos estudos trata desempenho energético e viabilidade econômica de forma isolada, carecendo de abordagens metodológicas integradas aplicadas a infraestruturas urbanas específicas. Tal insuficiência reforça a necessidade de modelos estruturados que articulem indicadores técnicos e financeiros para suporte à tomada de decisão em projetos públicos de geração distribuída.

### Projetos fotovoltaicos em infraestrutura de saneamento

As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) constituem infraestruturas urbanas essenciais destinadas ao tratamento de águas residuais urbanas e industriais antes de sua devolução ao meio ambiente. O processo é fundamental para a proteção da saúde pública e para a preservação ambiental, promovendo a remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos presentes no esgoto (ABTS, 2023).

O tratamento convencional em ETEs ocorre, de modo geral, em quatro etapas sequenciais. O tratamento preliminar realiza a remoção de sólidos grosseiros e areia; o tratamento primário promove a separação de materiais sedimentáveis e flutuantes por processos físicos; o tratamento secundário concentra-se na degradação biológica da matéria orgânica; e o tratamento terciário emprega processos físico-químicos ou biológicos avançados para remoção de nutrientes e microrganismos patogênicos (ÁGUA E EFLUENTES, 2020).

No contexto brasileiro, destaca-se a tecnologia de lodos ativados, amplamente empregada devido à sua eficiência na remoção de carga orgânica. Esse processo utiliza aeração mecânica para estimular a atividade de microrganismos aeróbios responsáveis pela degradação da matéria orgânica, configurando-se como etapa de elevada demanda energética (SILVA, et al. 2007). Outras configurações operacionais combinam processos físico-químicos, como coagulação e floculação, com sistemas biológicos complementares (AZEVEDO et al., 2020).

Em razão da necessidade contínua de bombeamento, aeração e recirculação de lodo, as ETEs apresentam perfil de carga elétrica estável e previsível, com consumo energético significativo e



operação ininterrupta. Essa característica as posiciona como candidatas estratégicas à implementação de sistemas de geração distribuída, especialmente fotovoltaica.

No município de Paranaguá, no estado do Paraná, a cobertura de esgotamento sanitário atinge aproximadamente 97%, sendo o serviço operado pela Paranaguá Saneamento, empresa do grupo Iguá Saneamento (IGUÁ, 2024). A elevada cobertura implica infraestrutura operacional de grande porte e, conseqüentemente, relevante demanda energética.

Estudos recentes indicam que a implantação de sistemas fotovoltaicos em ETEs pode suprir mais de 50% da demanda energética dessas unidades, reduzindo custos operacionais e emissões associadas ao consumo de eletricidade da rede (CARNEIRO e SCHRÖDER, 2024). Além do impacto econômico, a geração solar contribui para maior autonomia energética frente a oscilações tarifárias e instabilidades do sistema elétrico, fortalecendo a resiliência operacional do serviço de saneamento.

Todavia, embora a literatura aborde de forma consistente os aspectos técnicos do tratamento de esgoto, bem como a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos, observa-se que tais dimensões são frequentemente analisadas de maneira segmentada. Ainda há carência de modelos metodológicos integrados voltados à estruturação e avaliação de projetos fotovoltaicos aplicados especificamente à infraestrutura urbana de saneamento.

Essa limitação fundamenta a relevância do presente estudo, que propõe uma abordagem estruturada de análise técnico-econômica aplicada a ETEs como suporte à tomada de decisão em investimentos públicos de geração distribuída.

## **METODOLOGIA**

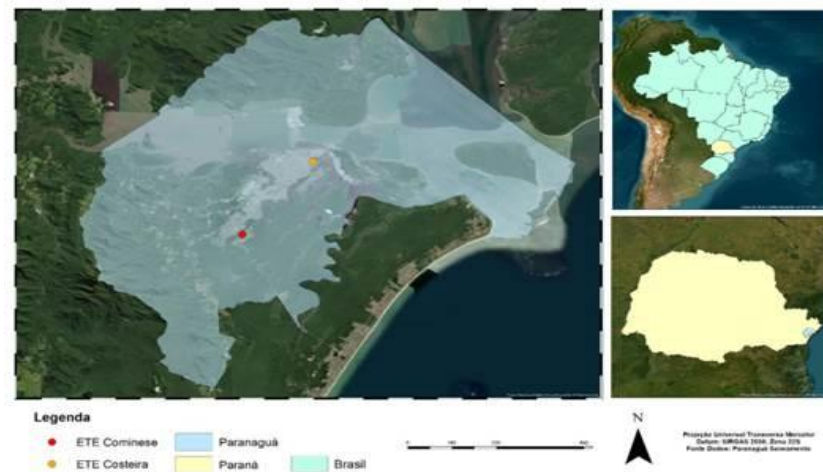
### **Área de estudo**

O presente estudo foi desenvolvido em duas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), denominadas ETE Costeira e ETE Cominese, localizadas no município de Paranaguá, no estado do Paraná, Brasil. As unidades encontram-se nas coordenadas geográficas 25°34'57.2"S 48°33'47.8"W e 25°30'47.0"S 48°30'10.1"W, respectivamente.

Ambas as estações são operadas pela concessionária Paranaguá Saneamento, pertencente ao grupo Iguá Saneamento, responsável pelos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário do município por meio de concessão plena válida até o ano de 2045 (IGUÁ, 2024).

A localização das unidades analisadas no município é apresentada na Figura 1, que ilustra a distribuição espacial das estações dentro do sistema urbano de saneamento.

**Figura 1.** Localização das ETEs no município de Paranaguá



Fonte: Os autores (2026).

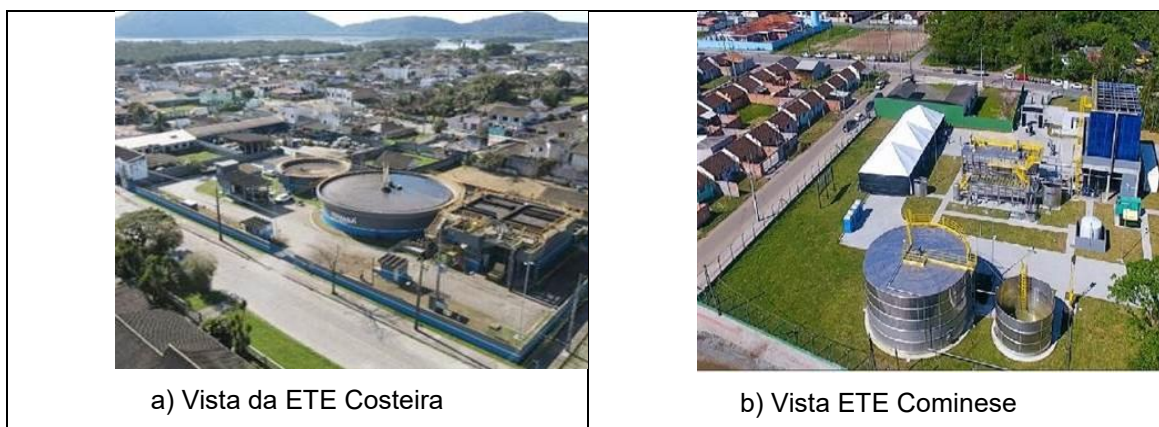
### **Caracterização das estações analisadas**

Os dados operacionais utilizados no estudo foram fornecidos pela concessionária responsável pelas unidades e correspondem ao período de dezembro de 2023 a dezembro de 2024, contemplando registros de consumo de energia elétrica e parâmetros operacionais das estações.

A ETE Costeira possui capacidade de tratamento de aproximadamente 100 L/s e utiliza o processo biológico de lodos ativados, tecnologia amplamente consolidada no tratamento de esgoto sanitário. Já a ETE Cominesse apresenta capacidade de tratamento de aproximadamente 70 L/s e adota uma configuração mais compacta baseada na combinação de processos físico-químicos e filtragem biológica.

As duas unidades foram selecionadas para o estudo por apresentarem vazões de chegada semelhantes, porém tecnologias de tratamento distintas, permitindo avaliar o comportamento energético em diferentes configurações operacionais. A Figura 2 - a e b, apresenta imagens das estações analisadas.

**Figura 2.** Vista das estações de tratamento de esgoto



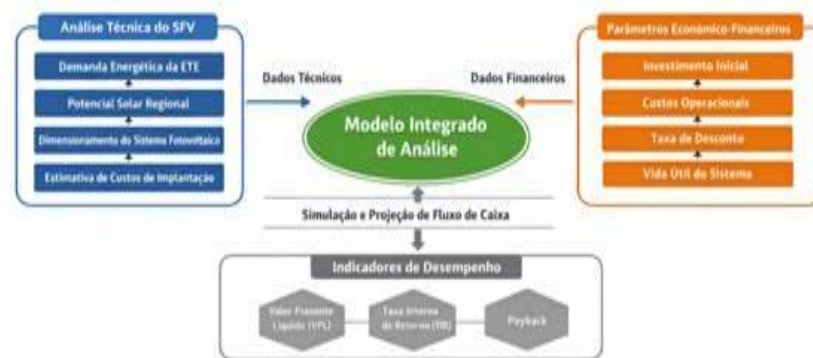
### **Estrutura do procedimento de análise técnica e econômica**

A avaliação da viabilidade de implantação de sistemas fotovoltaicos em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) foi conduzida a partir de uma abordagem sistemática de análise integrada. Essa estrutura organiza o processo de avaliação em etapas sequenciais que conectam a caracterização energética das unidades, o dimensionamento do sistema e a análise da viabilidade financeira do investimento.

O percurso metodológico fez uso combinado do *Microsoft Excel*, utilizado para a modelagem econômico-financeira determinística e compilação do fluxo de caixa; o software *ArcGIS* foi empregado para o processamento de imagens de satélite e vetorização espacial das áreas; e a plataforma web *SunData* versão 3.0, acessada para a extração do banco de dados de irradiação solar da localidade.

A estrutura metodológica adotada baseia-se em um modelo integrado de análise técnico-econômica, organizado em três blocos principais: (i) análise técnica do sistema fotovoltaico, (ii) parâmetros econômico-financeiros e (iii) indicadores de desempenho do investimento. A Figura 3 apresenta o fluxograma metodológico da pesquisa, sintetizando as etapas que compõem o estudo.

**Figura 3.** Modelo integrado de análise técnico-econômica para avaliação de sistemas fotovoltaicos em ETEs



Fonte: Os autores (2026).

O primeiro bloco corresponde à análise técnica do SFV. Nessa etapa são considerados os dados relacionados à demanda energética das estações de tratamento de esgoto (ETEs), bem como o potencial de irradiação solar da região. A partir dessas informações, realiza-se o dimensionamento do sistema, incluindo a estimativa da potência instalada necessária, a definição da quantidade de módulos fotovoltaicos e a avaliação dos parâmetros técnicos do sistema.

O segundo bloco refere-se aos parâmetros econômico-financeiros do projeto, que incluem a estimativa do investimento inicial necessário para implantação, os custos operacionais e de manutenção ao longo da vida útil do sistema, bem como a definição da taxa de desconto utilizada na análise econômica.

Com base nesses dados técnicos e financeiros, realiza-se a simulação e projeção do fluxo de caixa do projeto, considerando a economia gerada pela redução do consumo de energia elétrica das unidades analisadas.

Por fim, o terceiro bloco corresponde à avaliação dos indicadores de desempenho do investimento, na qual são aplicados indicadores amplamente utilizados em análise de viabilidade econômica, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de retorno do investimento (*payback*). Esses indicadores permitem avaliar a atratividade econômica da implantação do SFV nas ETEs estudadas.

Essa estrutura metodológica permite integrar parâmetros técnicos de dimensionamento com indicadores econômicos de investimento, proporcionando uma análise sistemática da viabilidade de implantação de sistemas fotovoltaicos em infraestruturas de saneamento.



### Dimensionamento

O dimensionamento foi realizado a partir da demanda energética média das estações, calculada com base no consumo mensal de energia elétrica registrado no período analisado.

Inicialmente, determinou-se o consumo médio mensal de energia elétrica, conforme a Equação 7:

$$E_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad ($$

onde:  $E_m$  é o consumo médio mensal de energia elétrica (kWh);  $E_i$  é o consumo de energia elétrica no mês;  $n$  é o número de meses analisados.

A partir do consumo médio mensal, foi estimada a demanda energética diária das estações, conforme a Equação 8:

$$E_d = \frac{E_m}{30} \quad ($$

onde:  $E_d$  é a demanda energética diária (kWh/dia);  $E_m$  é o consumo médio mensal de energia elétrica (kWh).

Com base na demanda energética diária, foi estimada a potência necessária do SFV, considerando o recurso solar disponível na região e o desempenho médio do sistema. A potência instalada pode ser estimada pela Equação 9:

$$P_{SFV} = \frac{E_d}{HSP \times PR} \quad ($$

onde:  $P_{SFV}$  é a potência necessária do SFV (kWp);  $E_d$  é a demanda energética diária (kWh/dia); HSP é a hora de sol pleno (h/dia); PR é o fator de desempenho do SFV.

Com base na potência instalada estimada, determinou-se o número de módulos fotovoltaicos necessários, conforme a Equação 10:

$$N = \frac{P_{SFV}}{P_{mod}} \quad (1$$

onde:  $N$  é o número de módulos fotovoltaicos;  $P_{SFV}$  é a potência total requerida do sistema (kWp);  $P_{mod}$  é a potência nominal do módulo fotovoltaico (kWp).

As equações utilizadas no processo de dimensionamento são fundamentadas no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, elaborado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito em conjunto com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (PINHO e GALDINO, 2014).

### Estimativa de custos de implantação



A estimativa de custos para implementação do sistema foi realizada a partir da identificação dos principais componentes necessários para a instalação, incluindo: módulos fotovoltaicos, inversores e *string boxes*.

Esses equipamentos representam a maior parcela do investimento inicial do sistema. Os valores considerados foram obtidos a partir de dados técnicos e especificações de fabricantes disponíveis no mercado, sendo utilizados como referência para a estimativa do custo total de implantação.

### **Avaliação de viabilidade econômica**

A viabilidade econômica do investimento foi analisada por meio de indicadores financeiros amplamente utilizados na avaliação de projetos de geração de energia renovável. Foram aplicados os seguintes métodos: Valor Presente Líquido (VPL); Taxa Interna de Retorno (TIR); *Payback* simples.

O Valor Presente Líquido (VPL) permite avaliar o retorno financeiro do investimento considerando o valor do dinheiro no tempo. Além disso, a Taxa Interna de Retorno (TIR) representa a taxa de desconto que iguala o valor presente das receitas ao valor do investimento inicial. E o *payback* indica o tempo necessário para recuperação do capital investido.

A utilização desses indicadores é recorrente em estudos de viabilidade econômica de projetos de geração distribuída e energia renovável (RIBEIRO et al., 2017; BONETTO, et al. 2022). A aplicação conjunta desses métodos possibilita avaliar a rentabilidade econômica da implantação nas ETEs analisadas, considerando os benefícios decorrentes da redução do consumo de energia elétrica da rede.

### **Premissas econômicas adotadas**

A modelagem econômico-financeira foi projetada dinamicamente no *Microsoft Excel* adotando a abordagem de fluxos de caixa nominais, atualizados ano a ano através da taxa de desconto ajustada sobre um horizonte temporal de 25 anos.

A projeção tarifária foi calculada conforme a Equação 11:

$$Tarifa_n = Tarifa_o \cdot (1 + IE)^n \quad (1)$$

onde  $Tarifa_n$  representa o valor da tarifa de energia elétrica projetada para o ano  $n$ ;  $Tarifa_o$  consiste no valor da tarifa média da concessionária praticada no período base, que é de R\$ 0,63/kWh;  $IE$  representa a taxa anual de Inflação Energética, fixada em 8,65% a.a. com base na média dos reajustes históricos reais aplicados no estado nos últimos 10 anos.

A geração anual estimada (kWh) decresce de forma linear à taxa de 0,75% a.a. que representa a degradação dos painéis. E a economia com a adoção do sistema reflete o faturamento



mitigado com base na tarifa referencial de R\$ 0,63/kWh, reajustada de forma contínua pela IE e considerando o rendimento da usina a cada ano (-0,75% a.a. devido à degradação).

As despesas de operação e manutenção foram estimadas inicialmente em 0,50% do CAPEX de equipamentos, sendo corrigidas monetariamente de forma contínua com base nas metas de inflação pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA, fixado em 4,90% a.a.).

O fluxo de caixa anual foi determinado através da diferença entre os recursos financeiros que entram e os que saem da conta do projeto ao longo do horizonte temporal. No período inicial (ano 0), o saldo é negativo pois reflete o aporte de capital necessário para a aquisição do sistema, abatido da economia imediata no início da operação. Nos anos subsequentes o fluxo de caixa passa a ser positivo, sendo calculado deduzindo as despesas anuais com operação e manutenção, da economia gerada.

O procedimento metodológico utiliza o Valor Presente Líquido (VPL) para trazer todas as economias de energia projetadas ao longo dos 25 anos para o valor atual, aplicando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) como taxa de desconto e subtraindo o custo do investimento inicial. A TMA, por sua vez, é fixada em 14,75% (taxa Selic). Esse cálculo funciona em conjunto com a Taxa Interna de Retorno (TIR), que identifica a taxa real de rendimento do próprio projeto. Na estrutura da modelagem, a regra para a aceitação do investimento estabelece que o sistema é classificado como economicamente viável sempre que a TIR for maior do que a TMA, uma relação matemática que garante um VPL maior que zero e demonstra que a aplicação do capital na infraestrutura traz mais retorno do que manter o recurso aplicado na taxa Selic.

### **Limitações do estudo e perspectiva de pesquisa**

Com relação a consistência do modelo integrado desenvolvido, cumpre registrar de forma transparente as limitações metodológicas inerentes às simplificações adotadas na pesquisa:

Escopo orçamentário restrito do CAPEX: O investimento inicial tomou como base um orçamento simplificado focado estritamente na aquisição dos equipamentos principais do Kit fotovoltaico. Custos correlatos fundamentais de engenharia, como a contratação de mão de obra especializada para montagem, aquisição e fixação de estruturas metálicas de suporte, execução de obras civis e movimentação de terra (terraplenagem/fundações), taxas de homologação e licenciamento ambiental, além de eventuais adequações físicas na subestação de entrada da concessionária elétrica não foram quantificados. Estima-se que a incorporação dessas variáveis de campo eleve o CAPEX real, deslocando ligeiramente o *payback* das ETEs.

Abordagem determinística e sensibilidade: A modelagem financeira assumiu taxas lineares fixas para variáveis macroeconômicas (Selic e IPCA). A ausência de uma análise de sensibilidade



global impede a avaliação do impacto de cenários econômicos de estresse, como a queda abrupta do preço da energia de compensação ou a elevação extraordinária dos custos de manutenção corretiva.

Resolução temporal e sazonalidade da geração: O dimensionamento técnico utilizou valores médios anuais consolidados de radiação (HSP) e consumo. O que possivelmente pode omitir a sazonalidade meteorológica local, como cobertura de nuvens e episódios de chuva persistente, impossibilitando o mapeamento exato de picos de injeção ou gargalos de geração em curto prazo.

Como perspectiva, propõe-se o desenvolvimento de um inventário detalhado de custos de engenharia civil e de infraestrutura local para compor um CAPEX integralizado em estudos futuros. Isso permitirá consolidar um modelo de viabilidade financeira mais aderente à realidade prática de implantação.

Além disso, com a evolução do modelo atual para uma abordagem de análise de sensibilidade probabilística em pesquisas subsequentes tornará possível mensurar o risco do investimento frente às oscilações regulatórias e tarifárias do setor.

Para investigações futuras, projeta-se a modelagem computacional em regime horário refinado a fim de capturar as particularidades microclimáticas da região. Essa resolução temporal permitirá otimizar o balanço energético instantâneo entre a demanda energética e o perfil real de geração fotovoltaica.

Destaca-se, por fim, que esta análise não considerou impactos decorrentes de financiamentos ou medidas de incentivo fiscal ou tributária que eventualmente possam ser estabelecidas.

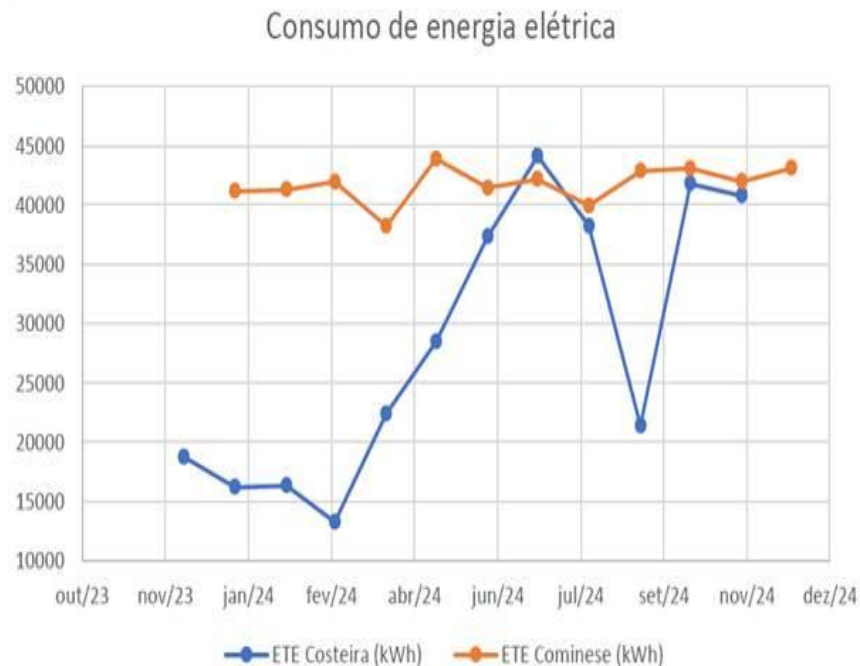
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização da demanda energética

A análise do consumo de energia elétrica das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) constitui etapa fundamental para estimar a demanda energética das unidades e subsidiar o dimensionamento do SFV.

Para este estudo, foram analisados os dados históricos de consumo de energia elétrica das ETEs Costeira e Cominense ao longo do período de estudo (Figura 4), permitindo identificar o comportamento mensal da demanda energética e determinar o consumo médio utilizado como referência para o dimensionamento do sistema.

**Figura 4.** Consumo mensal de energia elétrica das ETEs durante o período analisado



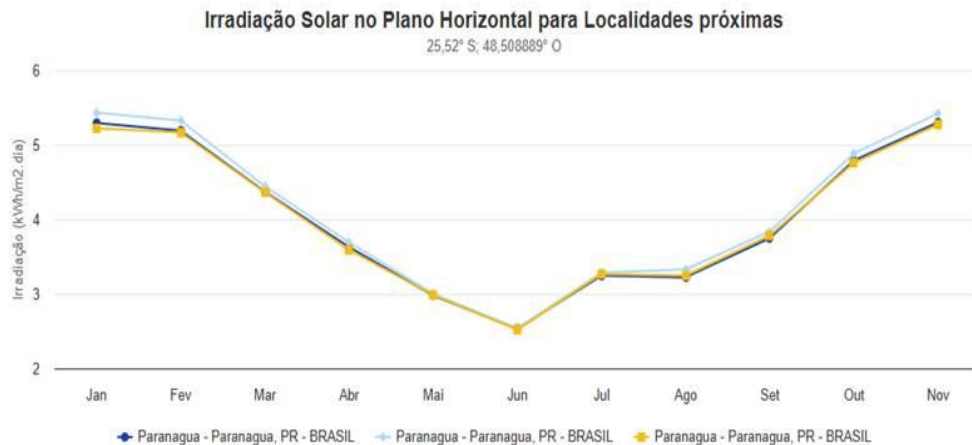
Fonte: Os autores (2026).

Observa-se que o consumo energético apresenta variações ao longo do período analisado, possivelmente associadas a fatores operacionais, como oscilações na vazão de esgoto afluente, variações na carga orgânica tratada e ciclos de operação de equipamentos eletromecânicos. Apesar dessas variações, o consumo apresenta comportamento relativamente estável, permitindo a utilização do valor médio mensal como parâmetro representativo da demanda energética.

O consumo médio mensal estimado foi de 28.245 kWh para a ETE Costeira e 41.749 kWh para a ETE Cominese. A partir desses valores, determinou-se o consumo médio diário de energia elétrica, utilizado como base para o dimensionamento do sistema.

A avaliação do potencial solar da região foi realizada com base nos dados do SunData v3.0, atualizados com o Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª edição. Para o município de Paranaguá-PR, a irradiação solar média no plano horizontal é de aproximadamente 3,92 kWh/m<sup>2</sup>. dia, valor equivalente a cerca de 3,92 horas de sol pleno por dia (Figura 5).

**Figura 5.** Irradiação solar média anual no município de Paranaguá – PR



Fonte: Os autores (2026).

Para maximizar a captação da radiação solar, considerou-se a instalação dos módulos fotovoltaicos com inclinação de aproximadamente 30°, valor próximo à latitude local, e orientação para o norte geográfico, condição recomendada para sistemas instalados no hemisfério sul.

Adotou-se ainda eficiência global do sistema de 75%, contemplando perdas associadas à conversão de energia, eficiência do inversor, perdas elétricas e degradação dos módulos ao longo do tempo.

Os parâmetros energéticos utilizados para o dimensionamento são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetros energéticos das ETEs e potência de pico estimada

ETE	Consumo Médio Mensal (kWh)	Consumo Médio Diário (kWh)	Potência de pico (kWp)
Costeira	28245	941,50	320,24
Cominese	41749	1391,63	473,34

Fonte: Os autores (2026).

Observa-se que a ETE Cominese apresenta maior demanda energética média, refletindo diretamente na maior potência de pico. A partir desses resultados, procede-se ao dimensionamento dos componentes do sistema, considerando as tecnologias disponíveis e as características operacionais de cada unidade.



## DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O modelo de módulo fotovoltaico foi selecionado considerando critérios de potência e desempenho. O painel Tiger Neo N-type 72HL4-(V) apresenta potência de pico de 0,585 kWp, sendo produzido pela empresa (JINKO SOLAR, 2022).

As células do tipo N-Type, têm maior tolerância a impurezas e menos defeitos devido à sua composição, utilizando fósforo ao invés de boro. A combinação boro-oxigênio é, em grande parte, responsável por causar a perda de energia devido à degradação do efeito LID (*Light Induce Degradation*) (PICARD, 2021).

Sendo assim, células tipo N-Type oferecem maior desempenho e eficiência geral, alcançado mais potência sem ampliar a superfície do módulo. Com base nessa potência nominal, foi possível determinar a quantidade de módulos necessária para suprir a demanda energética das estações. Dessa forma, foram estimados 548 módulos fotovoltaicos para a ETE Costeira e 810 módulos para a ETE Cominese.

Em seguida, foi definido o modelo de inversor, priorizando a potência, o HSHV385K-G02 é um inversor indicado para grandes usinas fotovoltaicas conectadas à rede, permitindo o uso de muitos painéis em um único equipamento, o que simplifica a instalação e reduz a necessidade de múltiplos inversores (HOPEWIND, 2025). Sua eficiência máxima de 99,01% e potência de 385kW o torna ideal para aplicações industriais de grande escala. Como apontado por Rosso et al. (2022), inversores de alta eficiência garantem melhor aproveitamento da geração, mesmo em cenários com relação FDI >1.

Considerando que esse modelo suporta até 166 módulos conectados, foram necessários 4 inversores para o sistema da ETE Costeira e 5 inversores para a ETE Cominese. O arranjo foi dividido em 32 *strings*, garantindo que cada *string* não excedesse o limite de 34 módulos.

Após a definição do inversor, foi possível calcular o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI). Os valores obtidos foram 1,2 para a ETE Costeira e 0,8 para a ETE Cominese. Um FDI de 0,8 indica que a capacidade do inversor corresponde a 80% da potência máxima do arranjo fotovoltaico (PEREIRA e GONÇALVES, 2008). Por outro lado, um FDI de 1,2 significa que os módulos solares podem gerar até 20% mais potência do que o inversor consegue processar continuamente. Entretanto, como os módulos raramente operam em sua potência máxima devido às perdas do sistema, esse *oversizing* é prática comum, pois aumenta a geração energética sem comprometer a operação do inversor.

Para atender à demanda diária máxima estimada de 1.391,63 kWh/dia, foi selecionada uma *string box* capaz de suportar essa capacidade de geração. O equipamento escolhido foi a *String Box 2 Entradas e 2 Saídas 1040Vcc/32A/40kA*, da marca Clamper, fabricada em policarbonato com proteção

UV e destinada à proteção de circuitos fotovoltaicos contra sobrecargas, curtos-circuitos e surtos elétricos (CLAMPER, 2025). O invólucro em policarbonato com proteção UV assegura a integridade do sistema contra a corrosão salina característica da área de estudo.

Quanto à estrutura de fixação, esta deve ser dimensionada de acordo com o número de módulos instalados, mantendo a inclinação de  $30^\circ$ , a fim de maximizar a captação da radiação solar.

O sistema adotado neste estudo é do tipo *on-grid*, conectado à rede de distribuição elétrica local. Dessa forma, para realizar a conexão do sistema à rede, é necessária autorização prévia da concessionária de energia. Após a aprovação, o medidor convencional é substituído por um medidor bidirecional, responsável por registrar tanto a energia consumida quanto a energia injetada na rede. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), essa substituição é de responsabilidade da concessionária e não implica custos adicionais ao consumidor.

Também foi determinada a área necessária para a instalação dos sistemas. Para a ETE Costeira, estimou-se uma área de  $1.416 \text{ m}^2$ , enquanto para a ETE Cominesse seriam necessários aproximadamente  $2.093 \text{ m}^2$ . Considerando a área disponível nas unidades, verificou-se a possibilidade de implantação do SFV na ETE Costeira. Nas proximidades da unidade existe um espaço utilizado como almoxarifado, com disponibilidade aproximada de  $1.650 \text{ m}^2$ , conforme ilustrado na Figura 6. A área destacada em amarelo representa o espaço disponível, suficiente para acomodar o sistema dimensionado.

**Figura 6.** Área disponível para implantação do sistema fotovoltaico na ETE Costeira



Fonte: Os autores (2026).

Por outro lado, na ETE Cominesse não foi identificada área suficiente para a instalação completa do sistema dimensionado. As áreas livres existentes apresentam sombreamento causado pela altura das estruturas da estação, conforme apresentado na Figura 7.

**Figura 7.** Área disponível na ETE Cominesse e interferência por sombreamento



Fonte: Os autores (2026).

Observou-se que a única área sem sombreamento possui aproximadamente 2.000 m<sup>2</sup>, valor inferior ao necessário para instalação do sistema dimensionado.

## ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA

Para avaliar a viabilidade econômica do projeto, foram levantados valores aproximados dos principais equipamentos necessários para a implantação da usina fotovoltaica. Ressalta-se que os valores apresentados correspondem a uma estimativa simplificada, considerando apenas os componentes principais do sistema. Os custos adicionais, como mão de obra, estruturas metálicas e componentes auxiliares, não foram incluídos na simulação. A Tabela 2 apresenta o orçamento estimado, com base em valores observados no primeiro semestre de 2025.

**Tabela 2.** Estimativa de investimento para implantação do sistema fotovoltaico

	VALOR (R\$)	ETE	COSTEIRA	ETE COMINESE	
		QUANTIDADE	VALOR TOTAL (R\$)	QUANTIDADE	VALOR TOTAL (R\$)
Placa solar Tiger Neo N-type 72HL4-(V)	1199,13	548	657123,24	810	971295,30
Inversor HSHV385K-G02 ou semelhante	14399,10	4	57596,40	5	71995,50
String Box 1040Vcc/32A/40k	508,72	32	16279,04	32	16279,04
<b>TOTAL (R\$)</b>			<b>730.998,68</b>		<b>1.059.569,84</b>

Fonte: Os autores (2026).

Para a elaboração do fluxo de caixa, foram considerados o investimento inicial e o retorno financeiro obtido por meio da economia de energia elétrica ao longo do tempo. A projeção da inflação anual foi baseada no Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), projetada em 4,90% a.a. (ERLICH, 2025). Enquanto a inflação energética foi projetada a partir da média aritmética simples dos reajustes tarifários históricos implementados pela concessionária, fixando-se a taxa média em 8,65% a.a. Também foram considerados: degradação anual dos módulos fotovoltaicos de 0,75% a.a. e custo de manutenção anual equivalente a 0,50% do investimento inicial.

A adoção da taxa de degradação dos módulos está alinhada às premissas técnicas da ABINEE (2012), que estabelece esse patamar como o padrão normativo para estimar o envelhecimento e a perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos ao longo de sua vida útil.

Os fluxos de caixa estimados para os projetos das duas ETEs estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, incluindo a geração anual de energia, economia financeira, custos operacionais e fluxo de caixa acumulado.

**Tabela 3.** Fluxo de caixa estimado para a ETE Costeira

TEMPO (ANO)	GERAÇÃO ANUAL ESTIMADA (KWH)	ECONOMIA (R\$)	GASTOS(R\$)	FLUXO DE CAIXA (R\$)	TOTAL ACUMULADO (R\$)
0	344014	6732,51	34757,22	18024,71	18024,71
1	341434	3713,77	12596,59	1117,18	36907,53
2	338854	2011,15	22192,42	9818,73	37088,80
3	336274	1725,26	32611,24	9114,02	27974,78
4	333693	2964,31	43923,90	9040,41	3934,37



5	331113	5844,60	56207,35	9637,25	702,88
6	328533	0491,14	39545,19	0945,95	1648,83
7	325953	7038,31	34028,22	3010,09	4658,92
8	323373	5630,50	39755,08	5875,42	0534,34
9	320793	6422,86	16832,93	9589,93	<b>0124,27*</b>
10	318213	9582,10	35378,17	4203,93	64328,20
11	315633	5287,28	55517,23	9770,04	04098,24
12	313053	3730,75	32047,07	1683,68	45781,92
13	310472	5119,07	31138,17	3980,91	19762,83
14	307892	9674,07	26931,35	2742,72	12505,55
15	305312	7633,91	54943,13	2690,77	25196,32
16	302732	9254,23	35364,82	3889,41	59085,73
17	300152	4809,47	18404,21	6405,26	15490,99
18	297572	4594,12	54287,07	0307,05	95798,04
19	294992	8924,20	33258,66	5665,55	01463,59
20	292412	8138,75	35585,40	2553,35	34016,94
21	289832	42601,43	31556,73	1044,70	95061,64
22	287252	22702,30	31487,10	1215,20	86276,83
23	284671	08859,62	35718,11	3141,51	09418,34
24	282091	01521,81	44620,86	6900,95	66319,29
25	279511	01169,57	38598,52	2571,05	58890,34

\*payback

Fonte: Os autores (2026).

Tabela 4. Fluxo de caixa estimado para a ETE Cominese

TEMPO (ANO)	GERAÇÃO		GASTOS (R\$)	FLUXO DE CAIXA (R\$)	TOTAL ACUMULADO (R\$)
	ANUAL ESTIMADA (KWH)	ECONOMIA (R\$)			
0	508488	315054,95	-1164971,24	-844618,44	-844618,44
1	504675	339895,40	-114319,95	231132,89	-613485,55
2	500861	366668,47	-124000,22	248498,01	-364987,54
3	497047	395522,29	-134507,62	267130,08	-97857,45



---

4	493234	426616,12	-145913,21	287117,99	189260,53
5	489420	460121,18	-158294,13	308556,46	497816,99
6	485606	496221,55	-171734,22	331546,48	829363,47
7	481793	535115,08	-186324,51	356195,61	<b>1185559,09*</b>
8	477979	577014,41	-202163,90	382618,41	1568177,49
9	474165	622148,04	-219359,78	410936,79	1979114,28
10	470352	670761,50	-238028,83	441280,48	2420394,76
11	466538	723118,57	-258297,78	473787,43	2894182,19
12	462724	779502,58	-294963,86	493944,73	3388126,92
13	458911	840217,86	-304197,88	545886,88	3934013,80
14	455097	905591,22	-330140,99	585800,62	4519814,41
15	451283	975973,59	-358310,05	628521,09	5148335,50
16	447470	1051741,68	-388896,71	674234,55	5822570,05
17	443656	1133299,91	-422109,16	723138,41	6545708,46
18	439842	1221082,30	-458173,57	775441,83	7321150,29
19	436029	1315554,61	-497335,59	831366,24	8152516,53
20	432215	1417216,57	-539862,10	891145,90	9043662,43
21	428402	1526604,24	-586042,99	955028,46	9998690,89
22	424588	1644292,62	-636193,19	1023275,54	11021966,43
23	420774	1770898,31	-690654,80	1096163,25	12118129,68
24	416961	1907082,44	-749799,45	1173982,79	13292112,47
25	413147	2053553,73	-814030,81	1257040,96	14549153,43

---

\*payback

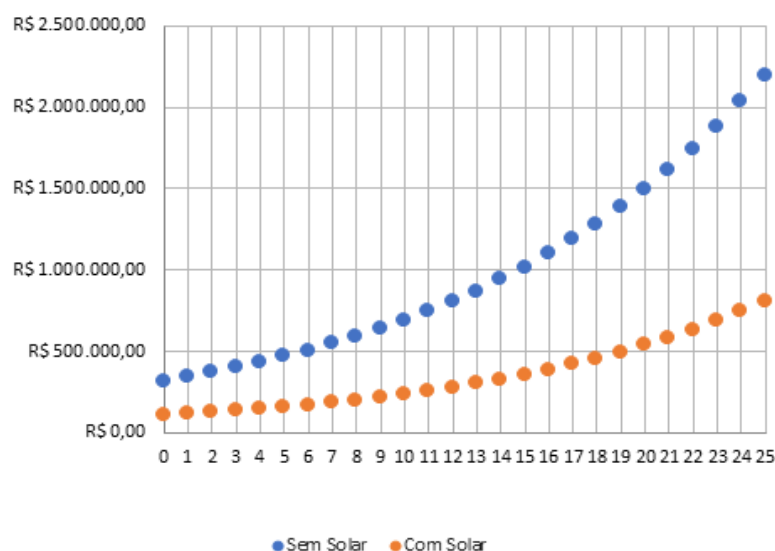
Fonte: Os autores (2026).

Ademais, foi utilizada a taxa básica de juros (Selic) de 2025 como Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que é utilizada como a taxa de juros comparativa para o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL). A Selic em 2025 é igual a 14,75%, conforme o relatório Focus do Banco Central do Brasil (BCB, 2025). Sendo assim, o VPL final é igual a R\$ 574.088,00 para a ETE Costeira, chegando a R\$ 1.479.167,56 para a ETE Cominese. Portanto, como os valores são positivos, ambos os projetos são considerados economicamente viáveis.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) foi de 25,87% para a ETE Costeira e 34,71% para a ETE Cominese, valores superiores à TMA adotada (14,75%), confirmando a atratividade financeira dos investimentos. Além disso, o tempo de retorno do investimento (*payback*) foi estimado em 9 anos para a ETE Costeira e 7 anos para a ETE Cominese, indicando recuperação do capital investido em um período considerado adequado para projetos de geração fotovoltaica.

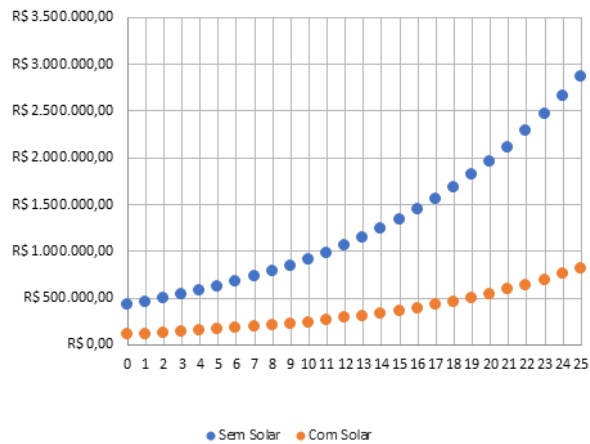
Com o objetivo de evidenciar o potencial econômico da implantação dos sistemas fotovoltaicos, foi realizada uma análise comparativa entre os custos projetados com energia elétrica da concessionária e a economia gerada pela produção de energia solar ao longo de um horizonte de 25 anos. Os resultados dessa comparação são apresentados nos Gráficos 1 e 2, que ilustram a evolução dos valores associados ao consumo de energia convencional e à economia proporcionada pela geração fotovoltaica nas ETEs analisadas.

**Gráfico 1.** Comparação entre custo de energia e economia acumulada – ETE Costeira



Fonte: Os autores (2026).

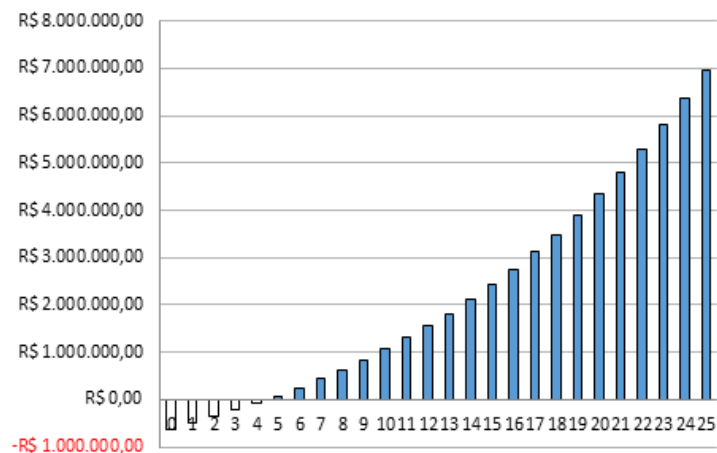
**Gráfico 2.** Comparação entre custo de energia e economia acumulada – ETE Cominese



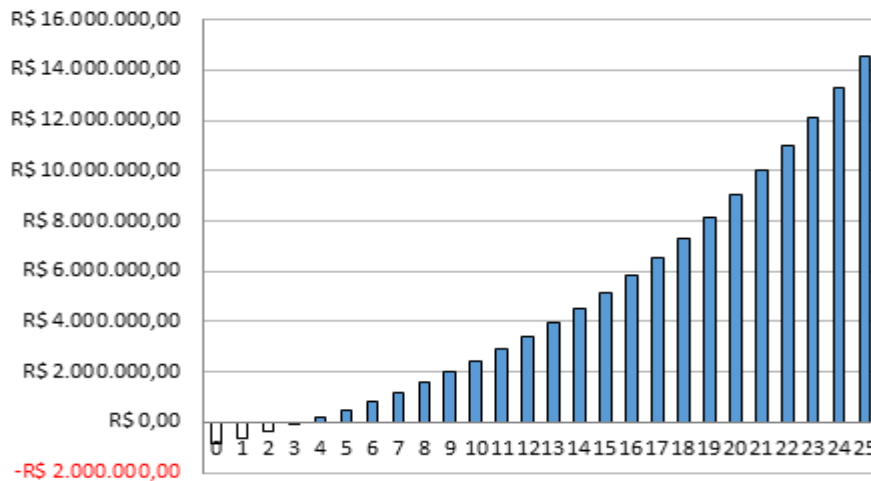
Fonte: Os autores (2026).

Adicionalmente, os Gráficos 3 e 4 apresentam o retorno financeiro acumulado ao longo do mesmo período, considerando a implantação dos sistemas fotovoltaicos nas unidades. Ao final de 25 anos de operação, estima-se um retorno financeiro total de R\$ 21.508.043,77, sendo R\$ 6.958.890,34 referente à ETE Costeira e R\$ 14.549.153,43 à ETE Cominese.

**Gráfico 3.** Retorno financeiro acumulado – ETE Costeira



Fonte: Os autores (2026).

**Gráfico 4.** Retorno financeiro acumulado – ETE Cominese

Fonte: Os autores (2026).

Nota-se que ao comparar as duas ETEs considerando a demanda energética necessária para operação e o investimento em energia solar, observa-se que a ETE Costeira apresenta melhor custo-benefício inicial, principalmente devido à possibilidade de instalação da usina fotovoltaica em área adjacente à unidade e ao menor investimento inicial, associado ao seu menor consumo energético. Destaca-se também que essa unidade demanda menores custos com produtos químicos em comparação à ETE Cominese, uma vez que o tratamento ocorre por meio de lodos ativados. Por outro lado, a demanda energética da ETE Cominese é aproximadamente 67% superior à da ETE Costeira, fator que contribui para um tempo de *payback* menor, devido ao elevado gasto atual com energia elétrica. Assim, embora a ETE Costeira apresente melhor custo-benefício imediato, no horizonte de 25 anos a ETE Cominese tende a gerar um retorno financeiro acumulado cerca de 47% maior.

## DISCUSSÃO COMPARATIVA COM ESTUDOS DA LITERATURA

A adoção de sistemas fotovoltaicos no setor de saneamento tem se mostrado uma alternativa promissora para a redução de custos operacionais e promoção da sustentabilidade energética. Diversas concessionárias brasileiras já vêm implementando projetos desse tipo, demonstrando a eficiência operacional e o retorno financeiro da geração distribuída em estações de tratamento.



Um exemplo relevante é o projeto desenvolvido pela SESAMM (Serviços de Saneamento de Mogi Mirim), considerado pioneiro na aplicação de energia solar no setor. A concessionária investiu aproximadamente R\$ 1,8 milhão na instalação de uma usina fotovoltaica na ETE de Mogi Mirim, composta por 1.066 módulos e potência instalada de 400 kWp, capaz de gerar cerca de 612 mil kWh por ano e proporcionar economia aproximada de R\$ 270 mil anuais (ARAUJO, 2019; BONANI et al., 2020). Em comparação com o presente estudo, a ETE Costeira, com capacidade de tratamento de 100 L/s, representa aproximadamente 66% da capacidade da ETE de Mogi Mirim. O investimento estimado para sua implantação (R\$ 730.998,68) é cerca de 60% menor, mesmo apresentando geração anual estimada de aproximadamente 339 mil kWh.

No estado do Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) também tem investido em projetos de geração renovável. Um exemplo é a usina fotovoltaica flutuante instalada no reservatório do sistema Passaúna, composta por 396 módulos e investimento aproximado de R\$ 1,7 milhão, em operação desde 2019. É um projeto inédito no setor de saneamento ambiental brasileiro (SANEPAR, 2024; PARANÁ, 2019), reforçando o argumento de que essa tecnologia ainda está emergindo, mas tem crescimento exponencial.

Enquanto este estudo desenvolve um modelo focado na otimização energética de plantas terrestres sobre áreas operacionais adjacentes e subutilizadas, o projeto do Passaúna consistiu em uma usina flutuante. Essa distinção metodológica impacta diretamente o balanço financeiro, pois a complexidade civil exigida para a ancoragem e flutuação dos módulos sobre o espelho d'água elevou o investimento inicial, gerando um custo específico substancialmente superior ao estimado para Paranaguá. Contudo, os objetivos primários das modelagens divergem significativamente, visto que o arranjo em Paranaguá busca suprir diretamente a demanda energética de processos de tratamento, já a usina flutuante da Sanepar priorizou a redução da evaporação do manancial em paralelo com a produção elétrica. Assim, o confronto metodológico demonstra que, para fins de replicabilidade em contratos de concessão, os sistemas terrestres em estações de tratamento eliminam os custos periféricos da engenharia aquática, maximizando a eficiência do capital investido.

No que diz respeito à eficiência operacional, o fator de desempenho de 75% adotado metodologicamente neste estudo converge com dados históricos globais de monitoramento da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency-IEA*). Amostragens realizadas entre os anos de 2001 a 2005 sobre o comportamento operacional de 527 sistemas conectados à rede, em sua maioria situados na Alemanha, revelaram que a maior parte dos ativos estabilizou sua taxa média de desempenho em um patamar situado entre 70% e 75% (IEA, 2007). Sob o cenário de radiação solar do Brasil, sistemas bem ventilados e livres de sombreamento conseguem registrar um desempenho na faixa de 70 a 80%. Apesar disso, a eficiência energética do arranjo é fortemente influenciada pela



temperatura local e tipo de tecnologia fotovoltaica utilizada. No caso dos módulos, o aumento da eficiência implica menor área ocupada, e para os inversores, a maior eficiência implica menos perdas na conversão c.c.-c.a. (PINHO e GALDINO, 2014).

Essa dependência climática justifica a escolha dos componentes do sistema para as estações de Paranaguá, agindo para blindar o sistema contra as perdas por temperatura típicas do litoral.

Além dos benefícios econômicos, a implantação de sistemas fotovoltaicos em estações de tratamento contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, diversificação da matriz energética e promoção da sustentabilidade ambiental no setor de saneamento. Considerando que o contrato de concessão da empresa Iguá Saneamento em Paranaguá é válido até 2045, e supondo a implantação do sistema entre 2026 e 2027, o período de retorno estimado permitiria aproximadamente dez anos de operação com economia líquida antes do término da concessão. Adicionalmente, módulos fotovoltaicos apresentam vida útil superior a 25 anos, com garantias que frequentemente ultrapassam duas décadas, reforçando o potencial de retorno econômico e ambiental desse tipo de investimento.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Diante dos desafios associados à transição energética e à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, a ampliação do uso de fontes renováveis tem se consolidado como uma estratégia fundamental para promover sistemas energéticos mais sustentáveis. Nesse contexto, a tecnologia solar fotovoltaica destaca-se como uma alternativa promissora, apresentando avanços significativos em eficiência, redução de custos e ampliação de aplicações em diferentes setores da infraestrutura urbana.

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a viabilidade técnica e financeira da implantação de sistemas fotovoltaicos nas estações de tratamento de esgoto analisadas. O dimensionamento realizado indicou que os sistemas propostos são capazes de atender parcela significativa da demanda energética das unidades, contribuindo para a redução dos custos operacionais associados ao consumo de energia elétrica. Embora o investimento inicial para implantação seja relativamente elevado, os indicadores econômicos obtidos evidenciam que o retorno financeiro ocorre em prazos compatíveis com a vida útil dos sistemas, tornando a tecnologia atrativa no médio e longo prazo.

Além dos benefícios econômicos, a adoção de sistemas fotovoltaicos em infraestrutura de saneamento contribui para a diversificação da matriz energética, redução da dependência de fontes convencionais e diminuição dos impactos ambientais associados à geração de energia elétrica. Dessa



forma, a integração entre geração distribuída e serviços de saneamento pode representar uma estratégia relevante para aumentar a eficiência energética e a sustentabilidade das operações.

A principal inovação deste trabalho concentrou-se no desenvolvimento de uma abordagem combinada, que unificou o diagnóstico espacial geométrico de área ao dimensionamento elétrico e econômico-tarifário clássico. O estudo de caso demonstrou que a viabilidade locacional é um fator limitante crítico: embora a ETE Cominese manifestasse a melhor rentabilidade nominal teórica devido ao seu maior consumo energético, a sua limitação geométrica e sombreamento civil inviabilizam o projeto nos moldes convencionais.

Os resultados obtidos também indicam que a implementação desse tipo de sistema pode ser replicada em outras unidades do setor, especialmente em estações que apresentam disponibilidade de área e perfil de consumo energético compatível com a geração fotovoltaica. Assim, a adoção dessa tecnologia pode contribuir para a modernização da gestão energética no setor de saneamento, além de colaborar para o atendimento de metas de sustentabilidade e desenvolvimento energético.

Por fim, iniciativas desse tipo estão alinhadas com os princípios da Agenda 2030 das Nações Unidas, especialmente com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 – Energia Limpa e Acessível, reforçando o papel das energias renováveis na construção de infraestruturas mais resilientes e ambientalmente responsáveis.

## REFERÊNCIAS

ABINEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. São Paulo: ABINEE, 2012.

ABTS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE. **A importância do tratamento de efluentes para a preservação do meio ambiente e da saúde pública**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.abts.org.br/blog/tratamentos-de-superficie/a-importancia-do-tratamento-de-efluentes-para-a-preservacao-do-meio-ambiente-e-da-saude-publica>. Acesso em: 19 mar. 2025.

ÁGUA E EFLUENTES. **Etapas de tratamento do esgoto sanitário**. [s. l.], 3 nov. 2020. Disponível em: <https://www.aguaeefluentes.com.br/post/etapas-de-tratamento-do-esgoto>. Acesso em: 22 mar. 2025.

ARAUJO, Danielly N.; CARVALHO, Paulo C. M.; DUPONT, Ivonne M. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. **Revista Tecnologia**, v. 40, n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5020/23180730.2019.9414>

AZEVEDO, Paulo G. F. et al. Processos físicos e químicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 7, n. 17, p. 1667-1678, 2020. DOI: [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071740](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071740).

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Focus: Relatório de Mercado**. Brasília, DF: BCB, maio de 2025. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/content/focus/focus/R20250530.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025.



BONETTO, Vinicius et al. Viabilidade econômica sobre o investimento de energia fotovoltaica para um comércio. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, RS, v.10, esp, p.44-51, dez. 2022.

BORGES, Jacks L. et al. Análise técnica e financeira para implantação de um sistema fotovoltaico no Hospital São Sebastião no município de Turvo/SC. **Revista Unicrea**, Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 17-51, maio/ago. 2023.

CARNEIRO, Elison C.; SCHRÖDER, Luis G. **Viabilidade de implantação de usina solar do tratamento da ETE Bicas**. Juiz de Fora: Faculdade Unificada Doctum, 2024.

CLAMPER. **String Box 2 entrada/2 saídas 1040V 32A 40kA 20008 CLAMPER**. Disponível em: <https://www.lojaclamper.com.br/clamper-solar-string-box-1040v-32a-1-2e-2s/p>. Acesso em: 10 maio 2025.

CRAIDE, Sabrina. Nível dos reservatórios está em 38% no Sudeste e Centro-Oeste. **Agência Brasil**, Brasília, DF, 6 fev. 2014. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2014-02/nivel-dos-reservatorios-no-sudeste-e-centro-oeste-esta-mais-baixo>. Acesso em: 3 nov. 2025.

CREMASCO, Nicole P. et al. Estudo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, [s. l.], v. 12, n. 31, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3895/recit.v12.n31.15052>.

CRUZ, Fernanda. São Paulo sofreu pior crise de água de sua história em 2014. **Agência Brasil**, Brasília, DF, 24 dez. 2014. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-12/sao-paulo-sofreu-pior-crise-de-agua-da-sua-historia-em-2014>. Acesso em: 3 nov. 2025.

DUARTE, Carlos H. C.; ARAÚJO, Bruno P. Geração de energia solar fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento da cadeia local de fornecedores. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 59, p. 57-118, mar. 2025.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4th ed. New York: Wiley, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**: relatório final. Brasília, DF: MME/EPE, 2020.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 3 nov. 2025.

ERLICH, F. Banco Central projeta inflação de 4,9% em 2025, acima do teto da meta. **Veja Negócios**. 26 jun 2025. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/banco-central-projeta-inflacao-de-49-em-2025-acima-do-teto-da-meta/>. Acesso em: 02 fev. 2026.

GUTIERREZ, Maria B. G. P. S. **As mudanças climáticas e seus impactos sobre o setor de energia elétrica no Brasil**: a necessidade de aprimorar o planejamento energético. Rio de Janeiro: IPEA, 2024. (Boletim Regional, Urbano e Ambiental - Artigos). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/16393>. Acesso em: 17 maio 2025.



HOPEWIND. **HSHV320/330/350/385K-G02**. Disponível em: <https://pt.hopewind.com/products-info/320-385kW>. Acesso em: 10 maio 2025.

IEA - *International Energy Agency*. **Cost and performance trends in grid-connected photovoltaic systems and case studies**. Paris: IEA, 2007.

IEA - *International Energy Agency*. **Clean Energy Market Monitor, March 2024**. Paris: IEA, 2024.

IGUÁ. **Nossas operações**. Paranaguá: Iguá. Disponível em: <https://igua.com.br/paranagua/nossas-operacoes>. Acesso em: 19 jun. 2024.

IRENA - *International Renewable Energy Agency*. **Renewable Power Generation Costs in 2018**. Abu Dhabi:IRENA, 2019.

JINKO SOLAR. **Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575 Watt**. [s. l.]: Jinko Solar, 2022. Disponível em: [https://jinkosolarcdn.shwebospace.com/uploads/JKM555-575N-72HL4-\(V\)-F1-PT.pdf](https://jinkosolarcdn.shwebospace.com/uploads/JKM555-575N-72HL4-(V)-F1-PT.pdf). Acesso em: 20 jun. 2024.

LIMA, Jacira R.; NUNES, Luciana A. S. **Geração de energia fotovoltaica on-grid e off-grid**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022.

MENDES, Luiz F. R.; STHEL, Marcelo S.; LIMA, Marcenilda A. O crescimento da geração distribuída no contexto da crise hidroenergética na região Sudeste do Brasil: aspectos ambientais e socioeconômicos. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 22, n. 3, p. 626-647, set./dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.19180/1809-2667.v22n32020p626-647>.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Emissões do Brasil têm a maior queda em 15 anos. **Observatório do Clima**, [s. l.], 3 nov. 2025. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/emissoes-do-brasil-tem-a-maior-queda-em-16-anos/>. Acesso em: 13 nov. 2025.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Brasília, DF: Nações Unidas Brasil, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>. Acesso em: 18 ago. 2024.

PARANÁ (Estado). **Estado inaugura obras de saneamento em Curitiba**. Curitiba: Agência Estadual de Notícias, 4 dez. 2019. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Estado-inaugura-obras-de-saneamento-em-Curitiba>. Acesso em: 2 fev. 2026.

PEREIRA, Enio B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. DOI: <https://doi.org/10.34024/978851700089>.

PEREIRA, Osvaldo L. S.; GONÇALVES, Felipe F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de Tubarão – SC. **Revista Brasileira de Energia**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008.

PICARD, Jean, F. As muitas vantagens da célula N-Type. **Canal Solar**, 26 de novembro de 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/as-muitas-vantagens-da-celula-n-type/>. Acesso em: 28 jan. 2026.



PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014.

RIBEIRO, Renata G. A., et al. Proposição de uma metodologia para análise de viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica. **Revista Principia**: divulgação científica e tecnológica do IFPB, João Pessoa, n. 34, p. 77-85, maio 2017. DOI: <https://doi.org/10.18265/1517-03062015v1n34p84-92>

ROSSO, André, P. et al. **Influência do fator de dimensionamento de inversor no desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em operação no sul do Brasil**. In: IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis, 23 a 27 de maio de 2022. DOI: <https://doi.org/10.59627/cbens.2022.1118>.

SANEPAR - COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Relato Integrado 2024**. Curitiba: Sanepar, 2024. Disponível em: <https://ri.sanepar.com.br/docs/Sanepar-2024-12-31-768DDfgK.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SANTANA, Julie Catherine Siqueira et al. O uso e produção da energia limpa como método de preservação ambiental sustentável. **Revista Portos**: por um mundo mais sustentável. Rio de Janeiro: Epitaya, 2020. v. 1, n. 12, cap. 1, p. 99–111. DOI: <https://doi.org/10.47879/ed.ep.2020144p99>.

SILVA, Alessandra V. Á.; VON SPERLING, Marcos; OLIVEIRA FILHO, José M. Avaliação das unidades de tratamento do lodo em uma ETE de lodos ativados convencional submetida a distintas estratégias operacionais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Belo Horizonte, v. 12, n. 2, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000200003>.

TALANOIA. **NDC brasileira com metas corrigidas para 2025 e 2030**. Nota Técnica, 4. Série “NDC brasileira”. Rio de Janeiro: Talanoia, 2023. Disponível em: <http://www.institutotalanoia.org/publicacoes>. Acesso em: 10 jun. 2025.

TIEPOLO, Gerson M. et al. **Atlas de energia solar do estado do Paraná – Resultados**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 17 a 20 de abril de 2018. DOI: <https://doi.org/10.59627/rbens.2018v9i1.229>.