

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL

FELIPE LISBOA PERALTA

SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA DA NEUTRALIZAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DE SISTEMAS FOTOVOLTÁICOS: ANÁLISE DE CASO DA USINA FOTOVOLTAICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU).

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2025

FELIPE LISBOA PERALTA

SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA DA NEUTRALIZAÇÃO DA PEGADA DE
CARBONO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: ANÁLISE DE CASO DA USINA
FOTOVOLTAICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU).

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado.
rea de concentração em Gestão e Monitoramento
ambiental, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Fernando Luiz de Paula Santil

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P426S Peralta, Felipe Lisboa, 1997-
2025 Sustentabilidade econômica da neutralização da pegada de carbono de sistemas fotovoltaicos [recurso eletrônico] : análise de caso da usina fotovoltaica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) / Felipe Lisboa Peralta. - 2025.

Orientador: Fernando Luiz de Paula Santil.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.5015>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Qualidade Ambiental. I. Santil, Fernando Luiz de Paula, 1964-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
graduação em Qualidade Ambiental. III. Título.

CDU: 502.175

Nelson Marcos Ferreira
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental
BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 2512-6717 - www.ppgmq.iciag.ufu.br - ppgmq@iciag.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Qualidade Ambiental (PPGMQ)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 11/2025, PPGMQ				
Data:	28 de novembro de 2025	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	12322MQA002				
Nome do Discente:	FELIPE LISBOA PERALTA				
Título do Trabalho:	SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA DA NEUTRALIZAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DE SISTEMAS FOTOVOLTÁICOS: ANÁLISE DE CASO DA USINA FOTOVOLTAICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU)				
Área de concentração:	Meio Ambiente e Qualidade Ambiental				
Linha de pesquisa:	MONITORAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Semiótica, ensino escolar e ação docente na formação profissional do engenheiro geoespacial e afins				

Reuniu-se por meio de web conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), assim composta: Prof. Dr. Fernando Luiz de Paula Santil (Orientador); Prof.^a Dr.^a Tatiane Assis Vilela Meireles (UFU) e Prof. Dr. Arthur Pereira dos Santos (UNESP).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Prof. Dr. Fernando Luiz de Paula Santil apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Luiz de Paula Santil, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tatiane Assis Vilela Meireles, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Pereira dos Santos, Usuário Externo**, em 28/11/2025, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6771146** e o código CRC **7E39E020**.

RESUMO

PERALTA, Felipe Lisboa. **Sustentabilidade econômica da neutralização da pegada de carbono de sistemas fotovoltaicos: análise de caso da usina fotovoltaica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU)**. 2025. 45p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia – MG.¹

Este estudo realiza uma análise da sustentabilidade econômica da usina fotovoltaica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com o objetivo de quantificar sua pegada de carbono por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e analisar a viabilidade financeira de sua neutralização integral. A pesquisa investiga o "Paradoxo Geográfico" da transição energética, evidenciando que a pegada de carbono incorporada (*embodied carbon*) na fase de manufatura pode comprometer os benefícios ambientais obtidos durante a operação. A metodologia compreendeu a quantificação das emissões totais, a estimativa da área de reflorestamento necessária para a compensação no bioma Cerrado e a análise econômica dos custos integrados ao fluxo de caixa do projeto. Os resultados indicam que a pegada de carbono da usina, variando entre 696,47 e 1.511,34 t CO₂eq, demanda uma área de restauração de 1,97 a 10,99 hectares. A monetização desse passivo ambiental demonstra impacto financeiro expressivo, representando de 30,97% a 36,46% do custo operacional (*OpEx*). Fundamentado nos princípios da Economia Ecológica, o estudo conclui que a gestão de projetos de energia limpa deve internalizar os custos da cadeia de suprimentos para garantir a sustentabilidade plena e o alinhamento com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12.

.

Palavras-chave: Sustentabilidade Econômica. Pegada de Carbono. Avaliação do Ciclo de Vida. Bioma Cerrado. Paradoxo Geográfico. Economia Ecológica. ODS 12.

¹ Comitê Orientador: Fernando Luiz de Paula Santil – UFU

ABSTRACT

PERALTA, Felipe Lisboa. **Economic Sustainability of Carbon Footprint Neutralization in Photovoltaic Systems: A Case Study of the Federal University of Uberlândia (UFU) Solar Plant.** 2025. 25p. Dissertation (Master's Degree in Environmental and Environmental Quality) – Federal University of Uberlândia – MG.¹

This study analyzes the economic sustainability of the photovoltaic plant at the Federal University of Uberlândia (UFU), aiming to quantify its carbon footprint through Life Cycle Assessment (LCA) and to evaluate the financial feasibility of its full neutralization. The research examines the "Geographical Paradox" of the energy transition, showing that *embodied carbon* from the manufacturing phase can offset the environmental benefits achieved during operation. The methodology comprised quantification of total emissions, estimation of the reforestation area required in the Cerrado biome for carbon compensation, and an economic analysis of costs integrated into the project's cash flow. The results indicate that the plant's carbon footprint, ranging from 696.47 to 1,511.34 t CO₂eq, requires a restoration area between 1.97 and 10.99 hectares. Monetization of this environmental liability reveals a substantial financial impact, representing 30.97% to 36.46% of total operational expenditure (*OpEx*). Grounded in Ecological Economics principles, the study concludes that clean energy project management must internalize supply chain costs to ensure full sustainability and alignment with Sustainable Development Goal (SDG) 12.

Keywords: Economic Sustainability. Carbon Footprint. Life Cycle Assessment. Cerrado Biome. Geographical Paradox. Ecological Economics. SDG 12.

¹ Supervising committee: Fernando Luiz de Paula Santil – UFU

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Dinâmica da Pegada de Carbono da Energia Solar	3
2.2. Bioma Cerrado para o Sequestro de Carbono em Projetos de Restauração	4
2.3. Pilar econômico da compensação ambiental	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	6
3.1. Área de estudo	6
3.2. Avaliação da Pegada de Carbono do Ciclo de Vida (ACV)	9
2.3. Cálculo da Pegada de Carbono Total e Análise Econômica	9
3.4. Estimativa da Neutralização de Carbono por Reflorestamento no Bioma Cerrado	10
3.4.1. Determinação da Taxa de Sequestro de Carbono no Bioma Cerrado.....	10
3.5 Área de Compensação	12
3.6. Custos de plantio para neutralização.....	12
3.7. Custos de Operação e Manutenção (O&M) para 25 Anos.....	13
3.8 Cenários de Estudo	16
3.8.1 Cenário 1 (Cenário Ideal)	16
3.8.2 Cenário 2 (Cenário Alternativo)	17
3.8.3 Cenário 3 (Cenário Pessimista).....	18
3.8.4 Correlação dos cenários	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Pilar Ambiental: Pegada de carbono e neutralização de carbono	20
4.2. Pilar Econômico: Custo de operação e manutenção (O&M) e Custo de	

neutralização de carbono	23
5. CONCLUSÃO	27
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

A consolidação do conceito de desenvolvimento sustentável representou um marco na governança global ao reconhecer a finitude dos recursos naturais frente ao crescimento econômico. Essa mudança de paradigma foi formalizada em 1987 pelo relatório "Nosso Futuro Comum", elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), presidida por Gro Harlem Brundtland. O documento, conhecido como Relatório Brundtland, definiu o desenvolvimento sustentável como aquele que "satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades" (CMMAD, 1987).

Para traduzir esse conceito em práticas de gestão organizacional, John Elkington propôs, em 1994, a estrutura do Triple Bottom Line (TBL), ou Tripé da Sustentabilidade. Elkington argumentou que a prosperidade de um empreendimento não deve ser mensurada exclusivamente pelo lucro (*profit*), mas pela integração sistêmica de três dimensões: a qualidade ambiental (*planet*), a justiça social (*people*) e a viabilidade econômica (ELKINGTON, 1994). Essa abordagem exige que instituições, inclusive as públicas, contabilizem os impactos de suas atividades para além dos balanços financeiros tradicionais.

No cenário contemporâneo, a urgência climática impulsionou a transição energética como vetor central da sustentabilidade. Relatórios recentes indicam que o investimento global em tecnologias limpas, como a energia solar fotovoltaica, tem superado consistentemente os gastos com combustíveis fósseis, marcando uma reconfiguração da matriz energética mundial (IEA, 2024; WEF, 2025). Contudo, a expansão dessas tecnologias revela o que a literatura denomina "Paradoxo Geográfico" da transição energética. Enquanto o consumo da tecnologia ocorre em locais que buscam a descarbonização, a produção dos equipamentos concentra-se majoritariamente na Ásia, frequentemente em regiões cuja matriz industrial ainda depende intensamente do carvão mineral (HOU *et al.*, 2016; LUO *et al.*, 2024).

Esse fenômeno gera uma "pegada de carbono incorporada" (*embodied carbon*) nos painéis solares. A redução de emissões na fase de operação (uso da energia) pode ser parcialmente anulada pelas altas emissões na fase de manufatura (extração e produção). Nesse contexto, a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), situada no bioma Cerrado,

implementou uma usina fotovoltaica no Campus Santa Mônica. A iniciativa alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, especificamente aos ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (ONU, 2015).

Entretanto, observa-se uma lacuna na gestão desses projetos públicos: o foco predominante no retorno financeiro (*payback*) da conta de energia tende a negligenciar o passivo ambiental oculto na cadeia de suprimentos dos equipamentos. A problemática central deste estudo reside, portanto, na seguinte questão: a economia financeira gerada pela usina fotovoltaica é suficiente para custear a neutralização integral de sua pegada de carbono de ciclo de vida, por meio de projetos de reflorestamento no Cerrado? Responder a essa questão é fundamental para legitimar a sustentabilidade plena do projeto sob a ótica da Economia Ecológica.

Metodologicamente, este trabalho delimita sua análise à interseção das dimensões ambiental e econômica. Embora o pilar social seja intrínseco ao TBL, ele não será objeto de quantificação monetária nesta pesquisa. Essa decisão justifica-se pelas limitações atuais da Avaliação do Ciclo de Vida Social (S-LCA), que ainda carece de métricas padronizadas e de bancos de dados robustos para rastrear as condições laborais em cadeias de suprimentos globais difusas (UNEP, 2020; ZHANG *et al.*, 2022). Dessa forma, o estudo concentra-se na viabilidade técnica e financeira da compensação de emissões.

A hipótese deste trabalho é que a usina fotovoltaica da UFU possui uma pegada de carbono significativa herdada de sua manufatura, mas que sua neutralização via reflorestamento no bioma local é economicamente viável. Ao integrar o custo de compensação ao fluxo de caixa, propõe-se um modelo de gestão que atende à Meta 12.7 do ODS 12 (Compras Públicas Sustentáveis), oferecendo aos gestores públicos ferramentas para decisões que equilibrem responsabilidade fiscal e climática.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Dinâmica da Pegada de Carbono da Energia Solar

A percepção da energia solar fotovoltaica como uma fonte estritamente "limpa" refere-se, tecnicamente, à sua fase de operação, na qual não há emissão direta de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, para uma avaliação de sustentabilidade robusta, é imperativo aplicar a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), normatizada pela ABNT NBR ISO 14040. Essa abordagem contabiliza os fluxos de matéria e energia desde a extração dos recursos (*cradle*, ou berço) até a disposição final (*grave*, ou túmulo) (ISO, 2006; FTHENAKIS; KIM, 2011).

A literatura especializada identifica a fase de manufatura como o principal "ponto crítico" (*hotspot*) ambiental dos sistemas fotovoltaicos. Essa etapa demanda entre 80 % e 95 % da energia total consumida ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento, devido aos processos eletrointensivos de purificação do silício e cristalização dos wafers (IEA PVPS, 2024). Consequentemente, a pegada de carbono incorporada do painel solar depende intrinsecamente da matriz elétrica do país onde ele é fabricado.

Esse cenário dá origem ao que a literatura contemporânea denomina "Paradoxo Geográfico" da transição energética. Enquanto o consumo da tecnologia ocorre em locais que buscam a descarbonização (como o campus da UFU), a produção concentra-se em regiões industriais que, muitas vezes, ainda dependem de combustíveis fósseis. Em 2023 e 2024, a China consolidou sua hegemonia no setor, detendo mais de 80 % da capacidade global de produção de módulos (IEA, 2024).

Embora existam avanços na eficiência produtiva, estudos recentes de Luo *et al.* (2024) e Wang *et al.* (2024) confirmam que a intensidade de carbono da manufatura chinesa permanece significativamente superior à média europeia ou norte-americana, devido à elevada participação do carvão mineral na matriz energética de províncias industriais como Xinjiang e Mongólia Interior.

Nesse contexto, o trabalho de Hou *et al.* (2016) permanece como referência técnica para a modelagem de cenários conservadores. Os autores detalharam o inventário de ciclo de vida da produção chinesa, estabelecendo fatores de emissão que variam de 60 a 90 g CO₂eq/kWh. Em contraste, dados da Agência Internacional de Energia (IEA PVPS, 2024) indicam uma média global próxima de 42,8 g CO₂eq/kWh. Essa discrepância materializa

o fenômeno pelo qual a redução de emissões no Brasil é parcialmente anulada pela importação de um passivo ambiental oculto na cadeia de suprimentos asiática.

Portanto, a análise da sustentabilidade da usina da UFU não pode prescindir da comparação entre esses dois cenários de manufatura (global versus China intensiva), uma vez que a origem do módulo determina a magnitude do passivo ambiental a ser neutralizado.

2.2. Bioma Cerrado para o Sequestro de Carbono em Projetos de Restauração

A quantificação do potencial de sequestro de carbono no bioma Cerrado depende da análise das características específicas de suas fitofisionomias e das condições edáficas locais, fatores determinantes para a alocação de biomassa (HARIDASAN, 2000). A literatura apresenta dados de estocagem de carbono variáveis conforme a metodologia de inventário e o estágio sucessional das áreas em recuperação.

Melo *et al.* (2009) realizaram levantamento em área de restauração de Cerrado com seis anos de idade no município de Assis, São Paulo. O estudo inventariou indivíduos com Diâmetro à Altura do Peito (DAP) igual ou superior a 5 cm, incluindo espécimes plantados e provenientes de regeneração natural. Os dados indicaram estoque de carbono de 15,2 Mg C ha⁻¹, correspondendo a uma taxa média anual de fixação de 2,5 t C ha⁻¹ ano⁻¹.

Em investigações sobre reflorestamentos de matas ciliares em região de Cerrado, Melo e Durigan (2006) observaram taxa média anual de fixação de carbono de 1,5 t C ha⁻¹. Já Bolina e Barreira (2013), utilizando método não destrutivo em uma Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) em Goiás, estimaram estoque de 1,40 t C ha⁻¹ na biomassa do fuste.

A variação do potencial de sequestro conforme a tipologia vegetal foi analisada por Lopes e Miola (2010) em Minas Gerais. Os autores reportaram estoques de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) de 7,70 Mg ha⁻¹ em Mata de Galeria e de até 36,33 Mg ha⁻¹ em áreas de Cerradão. Para a fisionomia de Cerrado *sensu stricto*, o estudo indicou estoque de 14,12 Mg CO₂eq ha⁻¹.

O cenário para a implementação de projetos de restauração no bioma encontra respaldo em instrumentos de políticas públicas recentes, como a 4ª fase do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Bioma Cerrado

(PPCerrado) e a Lei nº 15.042/2024, que regula o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (BRASIL, 2023; BRASIL, 2024).

Com base nos dados levantados, este trabalho adota uma faixa de taxa de sequestro entre 5,50 e 14,12 t CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹. O limite inferior (5,50 t CO₂eq) resulta da conversão estequiométrica da taxa de 1,5 t C ha⁻¹ apresentada por Melo e Durigan (2006), utilizando o fator 3,67 (relação molecular CO₂/C). O limite superior corresponde ao valor direto observado para Cerrado *sensu stricto* por Lopes e Miola (2010).

2.3. Pilar econômico da compensação ambiental

A valoração econômica da compensação ambiental por meio da restauração florestal fundamenta-se, metodologicamente, na abordagem do custo de reposição. Essa abordagem traduz o passivo ambiental — neste caso, a pegada de carbono — em um custo financeiro tangível, com base no valor de mercado necessário para restabelecer os serviços ecossistêmicos perdidos, como o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade.

O relatório "Restauração da Vegetação Nativa no Brasil" (TNC; IPEA; EMBRAPA, 2018) atua como referencial técnico primário para essa valoração. O documento detalha os custos de implementação por fitofisionomia e técnica, demonstrando que o investimento varia substancialmente conforme as condições locais, como a qualidade do solo e a presença de vetores de degradação. Para a técnica de “plantio total” em formações savânicas do Cerrado, sob condições ambientais desfavoráveis, o estudo estimou custo base de R\$ 27.279,00 por hectare (valores de referência de 2018).

Para a atualização e validação desses valores no cenário regulatório atual, utiliza-se a Portaria IBAMA nº 118, de 3 de outubro de 2022. Essa normativa instituiu o Procedimento Operacional Padrão (POP) para a estimativa de custos em projetos de recuperação, estabelecendo valores de referência para a reparação de danos em processos administrativos federais. Para o bioma Cerrado, a portaria fixa o valor de referência para a técnica de “plantio total de mudas” em R\$ 28.200,00 por hectare (base 2022).

Entretanto, a análise do pilar econômico seria incompleta se restrita apenas aos custos (passivos). É imperativo considerar o arcabouço de políticas públicas que viabilizam o financiamento dessas iniciativas, transformando a compensação em um potencial ativo econômico. No âmbito federal, a sanção da Lei nº 15.042, de 11 de

dezembro de 2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), cria um mercado regulado no qual projetos de remoção de carbono podem gerar Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE). Simultaneamente, a Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021, que instituiu a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), fornece segurança jurídica para contratos de remuneração a provedores de serviços ambientais, operacionalizados por programas como o Floresta+.

No contexto estadual de Minas Gerais, destaca-se a inovação trazida pela Lei Estadual nº 24.944, de 2 de agosto de 2024, regulamentada pelo Decreto nº 48.994, de 10 de fevereiro de 2025. Esses instrumentos permitem a conversão de até 50 % de multas ambientais em serviços de preservação e recuperação da qualidade do meio ambiente. Essa política cria fonte direta de financiamento (conversão de passivos punitivos em ativos de restauração) que pode ser acessada para custear projetos em áreas públicas ou privadas, aumentando a viabilidade financeira de iniciativas como a proposta para a UFU.

A integração desses mecanismos reflete a moderna concepção de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Conforme destacam Ribeiro e Wunder (2022), um esquema de PSA eficiente deve garantir que os incentivos superem os custos de provisão do serviço e o custo de oportunidade da terra. Ao alinhar o projeto da usina fotovoltaica a essas políticas — seja gerando créditos no mercado voluntário, seja acessando recursos de conversão de multas —, a compensação ambiental transita de um mero centro de custo operacional (*OpEx*) para uma estratégia de investimento em infraestrutura ecológica, alinhada aos critérios de governança e sustentabilidade (ESG) exigidos na gestão pública contemporânea.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizado no município de Uberlândia, Minas Gerais (coordenadas aproximadas 18°55'08"S e 48°16'37"O), com altitude média de 863 m (IBGE, 2023). A região apresenta clima do tipo Aw (tropical com inverno seco), segundo a classificação de Köppen atualizada por Alvares *et al.* (2013), caracterizado por alta sazonalidade pluvial, condição que favorece a geração fotovoltaica nos meses de céu claro.

Dados do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais indicam irradiação global horizontal média de 5,1 kWh/m²/dia para a localidade (CEMIG, 2012). A usina fotovoltaica objeto da análise ocupa aproximadamente 0,4 ha dentro do perímetro do campus, enquanto o Campus Santa Mônica possui área total de 28 ha. O campus está inserido no contexto do bioma Cerrado, cuja presença de remanescentes de vegetação nativa na malha urbana reforça a relevância de estratégias de compensação ecológica. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo.

FIGURA 1 – Localização da Usina Fotovoltaica da UFU no Campus Santa Mônica, Uberlândia (MG).



Fonte: UFU 2021, IBGE 2024. Elaboração: Os autores.

3.2. Avaliação da Pegada de Carbono do Ciclo de Vida (ACV)

A quantificação da pegada de carbono da Usina Fotovoltaica da UFU fundamenta-se na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), padronizada pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e ISO 14044. Essa abordagem examina os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até a disposição final. A ACV permite identificar e mensurar as emissões incorporadas (*embodied carbon*) que ocorrem fora do local de operação da usina, sobretudo durante a fase industrial de manufatura dos componentes, evitando a premissa equivocada de que a geração solar seria isenta de impactos ambientais.

Para a quantificação da pegada de carbono, este estudo adota como fonte principal o relatório "*Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV systems – 2023 data update*", publicado pelo IEA PVPS (2024). O documento utiliza dados de produção e mercado de 2022–2023, refletindo a evolução tecnológica e as melhorias nos processos de fabricação. Conforme o IEA PVPS, o fator de emissão de GEE para um sistema fotovoltaico de silício policristalino (multi-Si) é de 42,8 g CO₂eq/kWh. Nesse total, os módulos respondem por 64% da pegada, os inversores por 23% e as demais etapas e componentes por 13%.

Outros trabalhos, como Hou *et al.* (2016), indicam que, para sistemas fotovoltaicos produzidos na China, a pegada de carbono pode variar de 60,1 a 87,3 g CO₂eq/kWh. Essa análise é particularmente relevante, uma vez que, segundo relatório da IEA de 2023 sobre sistemas de energia fotovoltaica, a China produziu 85% dos painéis solares do mundo. Para representar uma pegada associada à aquisição de componentes provenientes da China, adotou-se o valor de 73,7 g CO₂eq/kWh (média do intervalo reportado por Hou *et al.*, 2016).

2.3. Cálculo da Pegada de Carbono Total e Análise Econômica

A pegada de carbono total do ciclo de vida foi calculada utilizando-se os fatores de emissão de GEE do IEA PVPS (2024) e de Hou *et al.* (2016). A pegada de carbono total foi obtida pela Equação (1):

$$P_{\text{carbono Total}} = \frac{G_{\text{anual}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right) \times V_{\text{útil}} (\text{anos}) \times P_{\text{carbono}} \left(\frac{\text{CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \right)}{1.000.000} \quad \text{Equação 1.}$$

Nesta modelagem, *G_{anual}* corresponde à geração anual de energia da usina no Campus Santa Mônica, fixada em 525.360 kWh/ano, enquanto *V_{útil}* representa a vida útil estimada do sistema, de 25 anos. O fator de intensidade de carbono (*P_{carbono} (kWh)*) assume dois cenários para análise comparativa: (i) o valor referencial global de 42,8 g CO₂eq/kWh, reportado pelo International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS, 2024); e (ii) o fator de 73,7 g CO₂eq/kWh, que reflete a média para componentes oriundos de cadeias produtivas intensivas em carbono, conforme Hou *et al.* (2016). O denominador (1.000.000) é utilizado para converter gramas em toneladas.

A análise econômica subsequente integra esses resultados ao fluxo de caixa do projeto, utilizando método comparativo entre o custo de neutralização ambiental e a economia financeira gerada. A base para essa comparação é a economia anual de R\$ 262.680,00 na conta de energia da instituição. Esse procedimento visa testar a hipótese de que a rentabilidade da usina é capaz de internalizar as externalidades negativas de sua manufatura. Ao adotar essa estrutura, o estudo fornece subsídios para uma gestão pública orientada pela transparência da cadeia de valor, alinhando-se à Meta 12.7 do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, que promove a implementação de práticas de compras públicas sustentáveis.

3.4. Estimativa da Neutralização de Carbono por Reflorestamento no Bioma Cerrado

3.4.1. Determinação da Taxa de Sequestro de Carbono no Bioma Cerrado

A literatura sobre reflorestamento no bioma Cerrado apresenta ampla variedade de dados sobre potencial de sequestro de carbono, refletindo a diversidade de fitofisionomias do bioma. A Tabela 1 apresenta uma compilação de estudos que quantificam a taxa de acúmulo de carbono em projetos de restauração e reflorestamento com espécies nativas.

TABELA 1 - Taxa de sequestro de carbono encontrada na literatura.

Autores	Taxa de Sequestro	Tipo de Estudo/Manejo
Oliveira (2018)	0,40 a 0,61 Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹	Pastagens recuperadas/gerenciadas
Bolina e Barreira (2013)	1,40 tC. ha ⁻¹	Reflorestamento (Cerrado)
Melo e Durigan (2006)	1,5 t. ha ⁻¹ .ano ⁻¹	Reflorestamento de matas ciliares (Cerrado)
Melo <i>et al.</i> (2009)	2,5 t ha ⁻¹ ano ⁻¹	Restauração florestal (biomassa arbórea)
Embrapa (2020)	3.47 Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹	Sistema Plantio Direto (SPD)
Lopes & Miola (2010)	2,10 a 9,90 Mg C ha ⁻¹	Mata de Galeria, Cerrado sensu stricto e Cerradão

Fonte: Oliveira (2018), Bolina e Barreira (2013), Melo e Durigan (2006), Melo *et al.* (2009), Embrapa (2020), Lopes & Miola (2010), CCARBON/USP.
Elaboração: Os autores.

Como estudos de biomassa frequentemente reportam estoques em massa de carbono (C), procedeu-se à conversão para dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), de modo a permitir comparação direta com a pegada de carbono da usina. Utilizou-se o fator estequiométrico 3,67, adotado como padrão metodológico pelo IPCC. Esse índice decorre da razão entre a massa molecular do CO₂ (44 u) e a massa atômica do C (12 u); assim, a relação 44/12 indica que, para cada tonelada de carbono fixada na biomassa vegetal, removem-se da atmosfera aproximadamente 3,67 t de CO₂. A aplicação desse fator assegura a padronização dos resultados e a consistência da análise de neutralização.

Embora a literatura contenha valores mais elevados, como a taxa de 36,33 t CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ verificada para a fitofisionomia de cerradão (LOPES; MIOLA, 2009), esse valor é desconsiderado por não ser representativo de projetos de restauração. Taxas elevadas de sequestro em fitofisionomias mais complexas, como o cerradão, não dependem exclusivamente do plantio, mas de múltiplos fatores, como características do solo e interações entre vegetação e ambiente ao longo do tempo (HARIDASAN, 2000; MARACAHIPES-SANTOS *et al.*, 2017). Da mesma forma, valores de sequestro em monoculturas comerciais, como *Pinus* e *Eucalyptus* (CCARBON/USP), ou em pastagens e áreas agrícolas (OLIVEIRA, 2018; EMBRAPA, 2020), foram excluídos por não se alinharem à abordagem

de restauração ecológica de vegetação nativa no Cerrado, que constitui o objetivo principal deste estudo.

A faixa selecionada baseia-se em trabalhos que investigaram fisionomias mais comuns do Cerrado, como Cerrado sensu stricto e mata de galeria, as quais apresentam taxas de sequestro compatíveis com projetos de restauração (LOPES; MIOLA, 2009). Dessa forma, adota-se, para os cálculos de neutralização, o intervalo de 5,50 t CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ a 14,12 t CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, conforme valores reportados por Melo e Durigan (2006), Lopes e Miola (2009), Melo *et al.* (2009) e Bolina e Barreira (2013).

3.5 Área de Compensação

A determinação da área de reflorestamento necessária (*Acompensação*) para a neutralização das emissões constitui a etapa final da modelagem física do estudo. Esse cálculo integra a pegada de carbono total acumulada ao longo do ciclo de vida da usina com a capacidade de absorção biológica do bioma local, sendo realizado por meio da Equação (2):

$$Acompensação = \frac{P_{carbono\ total}}{Sanual \times Tanálise} \quad \text{Equação 2.}$$

Nesta formulação, *Pcarbono total* representa o passivo ambiental em toneladas de dióxido de carbono equivalente (t CO₂eq), calculado previamente para os diferentes cenários de manufatura e falha de componentes. O denominador é composto pelo produto entre a taxa de sequestro anual de carbono (*Sanual*) — assumida no intervalo de 5,50 a 14,12 t CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹, definida na etapa anterior — e o período de análise (*Tanálise*), correspondente à vida útil operacional estimada de 25 anos para a usina da UFU.

Metodologicamente, esse cálculo permite projetar a dimensão do “passivo florestal” assumido pela instituição ao optar pela neutralização integral do ativo. Ao dividir o impacto total pela capacidade acumulada de sequestro ao longo de 25 anos, o modelo estima a área necessária para capturar o volume de gases emitidos nas fases de fabricação e manutenção. Esse procedimento é fundamental para a análise econômica subsequente, pois a área obtida (em hectares) serve de base para a valoração dos custos de implementação e manutenção do projeto de restauração ecológica no Cerrado.

3.6. Custos de plantio para neutralização

A principal referência para a valoração é o relatório Restauração da Vegetação Nativa no Brasil: Caracterização de técnicas e estimativas de custo (TNC; IPEA; EMBRAPA, 2018), que apresenta custos de implementação para a técnica de plantio total em formações florestais e savânicas do Cerrado, com valor de R\$ 27.279,00 por hectare para a técnica de plantio total com sementes em formações florestais (valores de 2018). Com base nos dados de inflação do IBGE, o valor de R\$ 27.279,00 (2018) corresponde a aproximadamente R\$ 39.207,72 em julho de 2025, calculado a partir da inflação acumulada do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) do IBGE para o período de 2019 a julho de 2025. Para fins de estimativa de custos práticos de plantio voltados à compensação de vegetação nativa no bioma Cerrado, adotou-se o valor de R\$ 40.000,00 por hectare.

Outra referência é a Portaria IBAMA nº 118, de 3 de outubro de 2022, que instituiu Procedimento Operacional Padrão (POP) para estimativa de custos de projetos de recuperação, com o objetivo de estabelecer valor mínimo de referência para reparação de danos à vegetação nativa em processos administrativos. Para o bioma Cerrado, o documento estabelece valor de referência de R\$ 28.200,00/ha para a técnica de “plantio total de mudas”. Esse parâmetro corrobora a estimativa adotada neste projeto, considerando o caráter de referência mínima previsto na portaria.

3.7. Custos de Operação e Manutenção (O&M) para 25 Anos

Com base em informações divulgadas pela UFU, a usina fotovoltaica do Campus Santa Mônica tem capacidade de gerar até 525.360 kWh/ano, resultando em economia anual de R\$ 262.680,00 na conta de energia da instituição. Para sua implementação, foram investidos R\$ 2 milhões, montante obtido por meio de recursos extraorçamentários do Ministério da Educação (UFU, 2021).

A análise de viabilidade de longo prazo de um projeto fotovoltaico utiliza conceitos como Capital Expenditure (*CapEx*), que representa o investimento inicial na infraestrutura da usina, e Operational Expenditure (*OpEx*), que corresponde aos custos operacionais recorrentes ao longo da vida útil do projeto.

Para uma análise de ciclo de vida, é relevante conhecer a durabilidade e o perfil de falha de cada componente. A Tabela 2 sintetiza essas informações, detalhando vida útil esperada e respectivas taxas de degradação e falha dos equipamentos do sistema fotovoltaico,

com base em estudos do National Renewable Energy Laboratory (NREL) de 2017 e 2020 e em relatórios da Wood Mackenzie de 2019.

TABELA 2 - Manutenção de componentes do sistema fotovoltaico.

Componente	Vida Útil	Taxa de Degradação (1) ou Falha (2)
Módulos Fotovoltaicos	25 a 30 anos	(1) 0,6%ao ano (2) 0,05% ao ano (média).
Inversores Centrais	10 a 15 anos	Exigem uma a duas substituições completas.
Cabos e Conectores	25 anos ou mais	Baixa necessidade de substituições periódicas.

Fonte: (NREL,2017,2020; Wood Mackenzie, 2019). Elaboração: Os autores.

Os módulos fotovoltaicos apresentam taxa de falha acumulada de 1,24% em 25 anos, equivalente à substituição de 12 unidades (992 placas x 1,24%), conforme índices de confiabilidade e falha reportados pelo NREL (2017) e pela Wood Mackenzie (2019). As taxas de degradação refletem a perda de eficiência dos módulos ao longo do tempo, totalizando 15% em 25 anos (média de 0,6% ao ano), seguindo os parâmetros técnicos de degradação linear estabelecidos pelo NREL (2020), o que implica redução gradual da potência do sistema.

Esse fator é considerado na produção total de energia da usina, de modo que as projeções de 525.360 kWh/ano e a economia de R\$ 262.680,00 sejam ajustadas de forma decrescente ao longo do tempo. Os inversores serão substituídos ao menos uma vez durante a vida útil do sistema, enquanto cabos e conectores não foram considerados para substituição.

Além disso, a estimativa de custos anuais de O&M é realizada como percentual do investimento inicial (CapEx), com valores tipicamente entre 0,5% e 1,5% do investimento inicial (FARIA, 2014). Neste estudo, utiliza-se investimento inicial de R\$ 2.000.000,00, multiplicado por 1% ao ano (valor médio do intervalo de 0,5% a 1,5%), resultando em R\$ 20.000,00 por ano. Essa estimativa refere-se aos custos operacionais recorrentes (por exemplo, monitoramento e limpeza) e não inclui despesas de capital para substituição de componentes, como inversores e módulos.

O estudo do IPEA (2018) indicou que os módulos fotovoltaicos representavam 48% do custo total de um sistema, enquanto o inversor correspondia a 29% do investimento inicial. Em contraste, o Estudo Estratégico da Greener (2023), que reflete cenário mais recente,

aponta mudança significativa nessa proporção, com módulos representando aproximadamente 38% e o inversor 5% do custo total. Para a metodologia deste trabalho, adotaram-se os valores mais atualizados, provenientes da Greener (2023), por refletirem a dinâmica recente do mercado fotovoltaico. A Tabela 3 apresenta o resumo dos valores adotados.

TABELA 3 - Resumo dos valores utilizados para o cálculo econômico da usina solar.

Parâmetro	Valor/Contexto
Dados do Projeto	
Geração Anual de Energia (UFU, 2021)	525.360 kWh/ano
Economia Anual na Conta (UFU, 2021)	R\$ 262.680,00/ano
Custos de Plantio para Neutralização (Adotado)	R\$ 40.000,00 por hectare
Custos de O&M	
Investimento Inicial (<i>CapEx</i>) (UFU, 2021)	R\$ 2.000.000,00
Custo Anual de O&M (<i>OpEx</i>)	R\$ 20.000,00 por ano (1% do <i>CapEx</i>)
Participação de Componentes (Custo Total)	
Placas Fotovoltaicas (Greener, 2023)	38%
Inversor (Greener, 2023)	5%
Placas Fotovoltaicas (IPEA, 2018)	48%
Inversor (IPEA, 2018)	29%
Redução de eficiência das placas	0,6% ao ano

Fonte: UFU,2021; Greener, 2023; IPEA, 2018. Elaboração: Os autores.

3.8 Cenários de Estudo

3.8.1 Cenário 1 (*Cenário Ideal*)

O Cenário 1 estabelece o limite superior de viabilidade econômica e o limite inferior de passivo ambiental do projeto. Trata-se do cenário ideal, no qual os componentes operam conforme as especificações dos fabricantes ao longo dos 25 anos de vida útil do projeto. A modelagem financeira pressupõe o cumprimento integral da garantia de desempenho e a baixa taxa de falha intrínseca do sistema, refletindo a maturidade da tecnologia fotovoltaica de silício cristalino (FTHENAKIS *et al.*, 2011).

A degradação de eficiência ocorre de forma linear (0,6% ao ano), conforme especificações padrão da indústria. O inversor central, por ser o componente eletroeletrônico de menor vida útil, é substituído uma única vez, tipicamente entre o 10º e o 15º ano de operação (NREL, 2020).

A inclusão de falha intrínseca de 1,4% das placas (equivalente a 12 módulos em 992 unidades ao longo de 25 anos) é requisito da modelagem. Essa taxa contempla falhas não relacionadas a eventos externos, como defeitos de fabricação ou degradação acelerada induzida por potencial (*potential-induced degradation* – PID), e assegura um *OpEx* de manutenção minimamente realista. Nesse cenário, são incluídos os valores de operação e manutenção, a substituição de inversores e sua respectiva incorporação à pegada de carbono. Também é considerada a substituição de 12 placas (1,4% em 25 anos) e a compensação da pegada de carbono associada.

Para o Cenário 1, há duas subdivisões: aquisição de componentes com pegada de 42,8 e de 73,7 g CO₂eq/kWh, conforme IEA PVPS (2024) e Hou *et al.* (2016). Essa dualidade é relevante para determinar o custo ambiental de longo prazo, refletindo o Paradoxo Geopolítico do Carbono (ZHAO *et al.*, 2023). Considera-se que a matriz energética da manufatura (seja o mix global referencial do IEA, seja a matriz chinesa intensiva em carvão) define o passivo ambiental da usina local, exigindo a simulação de ambas as pegadas para uma gestão de risco mais abrangente.

Nesse cenário de otimismo técnico, o cálculo financeiro integra a queda de eficiência ao longo do tempo para obter a produção real decrescente em 25 anos, bem como o reflexo dessa produção nas economias geradas na conta de energia. Ao final, são computados os resultados financeiros comparativos de manutenção e compensação de carbono em relação às economias proporcionadas pela geração de energia.

3.8.2 Cenário 2 (Cenário Alternativo)

Este cenário considera a ocorrência de eventos adversos ao Cenário 1, capazes de provocar alterações no projeto, exigindo a substituição de cerca de 20% dos componentes ao longo de 25 anos. A inclusão desse cenário visa mitigar o risco de subestimação dos custos operacionais e ambientais (*OpEx* ambiental) diante da crescente instabilidade climática (ALMG, 2024; INPE, 2025), aspecto essencial na modelagem de risco para infraestruturas de longa vida útil. O percentual de 20% foi selecionado como ponto intermediário de estresse, significativamente superior à taxa intrínseca (1,4%), mas ainda plausível para o horizonte de 25 anos.

Essa margem de falha justifica-se por análises de risco da indústria, que apontam o granizo como responsável por 73% das perdas financeiras em projetos solares, apesar de ser evento relativamente raro (KWH Analytics, 2023). O risco é relevante na região de Uberlândia e em Minas Gerais, onde alertas de tempestades severas com granizo são recorrentes (INMET, 2023; IGAM, 2024; IGAM, 2020). Assim, a simulação de impacto de 20% busca representar tanto danos cumulativos quanto a ocorrência de um evento único moderadamente severo.

Além do dano visível, o granizo pode causar microfissuras internas nos painéis, defeitos que nem sempre são imediatamente detectáveis, mas que degradam o desempenho ao longo do tempo (Maysun Solar, s.d.; Solis, 2021). Essas microfissuras comprometem eficiência e longevidade, demandando substituição para manutenção da performance. A simulação da troca de 20% dos módulos constitui, portanto, medida de precaução de engenharia que traduz a exposição do ativo ao risco climático (KWH Analytics, 2023), impondo ao projeto um *CapEx* de reposição não planejado.

Com base nisso, calcula-se a substituição de 20% dos componentes, incluindo a nova pegada de carbono (aumento do passivo ambiental) e a análise dos impactos financeiros (aumento do *OpEx*). A comparação com o Cenário 1 é fundamental para quantificar o risco financeiro e ambiental associado ao granizo, demonstrando a sensibilidade da economia líquida do projeto à gestão proativa do risco climático e a necessidade de reservas de capital para mitigar esse passivo inesperado.

3.8.3 Cenário 3 (Cenário Pessimista)

Este cenário aborda a possibilidade de um evento climático extremo, em relação ao Cenário 1, que, em decorrência das mudanças climáticas, exija a substituição de 50% dos componentes do sistema. A justificativa para esse impacto severo não se baseia na frequência, mas no potencial catastrófico de um único evento extremo (KWH Analytics, 2023), o qual deve ser mitigado por meio de reservas financeiras e planos de contingência de carbono, configurando o limite inferior de viabilidade do projeto.

Essa abordagem metodológica, denominada análise de estresse (*stress testing*), é crítica para projetos de infraestrutura de longo prazo, pois permite verificar se o planejamento financeiro suporta perdas de grande escala (KWH Analytics, 2023). A substituição de 50% dos módulos não representa apenas custo de reposição, mas a materialização do risco climático na forma de passivo ambiental expressivo, ao exigir a internalização da pegada de carbono de uma nova cadeia de suprimentos (LUO *et al.*, 2024).

A crescente severidade de fenômenos climáticos em Minas Gerais (ALMG, 2024; INPE, 2025) torna a consideração de um cenário de alto impacto uma medida de precaução realista para um projeto de 25 anos, especialmente diante da vida útil limitada dos inversores (cerca de 10 a 15 anos), que já demanda reposição.

Dessa forma, simula-se que, por algum fator externo, 50% do sistema precise ser substituído. Este cenário representa o pior caso para a sustentabilidade, pois o aumento da reposição de módulos eleva drasticamente a pegada de carbono incorporada, criando um ciclo de retroalimentação (*feedback loop*) negativo entre risco climático e passivo ambiental: o custo para compensar o carbono dos novos módulos compromete, de forma mais crítica, a economia líquida acumulada. A Tabela 4 sintetiza os cenários e os parâmetros adotados para a análise.

3.8.4 Correlação dos cenários

A correlação entre os cenários 1, 2 e 3 fundamenta-se em análise de sensibilidade que escala do otimismo técnico à vulnerabilidade climática severa. O Cenário 1 (Ideal) atua como referencial de controle, simulando operação nominal com falhas intrínsecas mínimas (1,4%). Já os cenários 2 (Alternativo) e 3 (Pessimista) introduzem níveis crescentes de estresse — substituição de 20% e 50% dos componentes, respectivamente

— com base no risco de eventos climáticos extremos, como tempestades de granizo recorrentes em Minas Gerais.

Essa progressão, sintetizada nos parâmetros da Tabela 4, evidencia que a sustentabilidade do projeto é diretamente afetada pela taxa de reposição de ativos e pela origem da manufatura. À medida que se avança para cenários de maior impacto, ocorre reincorporação da pegada de carbono da manufatura ao ciclo de vida da usina, gerando efeito cascata: o aumento do passivo ambiental eleva os custos de neutralização e demanda áreas de reflorestamento significativamente maiores, comprometendo a economia líquida acumulada ao longo dos 25 anos.

TABELA 4 - Resumo dos cenários.

Parâmetro	Valores/Faixas	Descrição
Cenário 1 (Ideal)	Troca de 1,4% (12 placas); Inversores trocados 1 vez.	Simulações com pegadas de 42,8 e 73,7 g CO ₂ eq/kWh.
Cenário 2 (Alternativo)	Troca de 20% dos componentes	Impacto de eventos adversos, como granizo no cenário 1.
Cenário 3 (Pessimista)	Troca de 50% dos componentes	Impacto grande de um evento climático extremo no cenário 1.

Elaboração: Os autores (2026)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pilar Ambiental: Pegada de carbono e neutralização de carbono

A análise comparativa da pegada de carbono total evidencia a influência da cadeia de suprimentos e das decisões de projeto sobre a sustentabilidade ambiental da usina fotovoltaica. A pegada de carbono total no cenário ideal — que assume a durabilidade esperada dos componentes e a substituição de apenas um inversor — já apresenta diferença substancial entre as duas cadeias produtivas avaliadas. No cenário ideal, ao se utilizar o fator de referência global de 42,8 g CO₂eq/kWh (IEA PVPS, 2024), a pegada é de 696,47 t CO₂eq. Contudo, quando a análise considera componentes provenientes da produção chinesa (73,7 g CO₂eq/kWh), a pegada total eleva-se para 1.201,11 t CO₂eq, representando aumento de aproximadamente 72%.

Essa diferença indica o impacto significativo da matriz energética de produção — majoritariamente baseada em carvão na China — sobre a pegada de carbono incorporada do projeto. A discrepância ilustra a dependência global na qual as emissões incorporadas de um projeto no Brasil são influenciadas pela intensidade de carbono da eletricidade utilizada na manufatura internacional, configurando o paradoxo geográfico da transição energética. Ressalta-se que o valor de 73,7 g CO₂eq/kWh é uma média e que, conforme Hou *et al.* (2016), a pegada de carbono para sistemas produzidos na China pode ser ainda maior, alcançando 87,3 g CO₂eq/kWh.

Nesse contexto, a literatura científica destaca a relevância de modelos dinâmicos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em substituição aos modelos estáticos tradicionais. Enquanto a abordagem dinâmica projeta a redução gradual das emissões de fabricação à medida que a matriz elétrica global se descarboniza (PEHL *et al.*, 2017), este estudo opta pela ACV estática. Essa escolha fundamenta-se na necessidade de adotar parâmetro conservador para o passivo ambiental assumido no momento da instalação, garantindo que o dimensionamento da neutralização seja pautado por dados concretos do presente e evitando a subestimação do impacto.

A vulnerabilidade climática regional também impacta diretamente o passivo ambiental. A necessidade de substituir 20% das placas (Cenário Alternativo) ou 50% (Cenário Pessimista) eleva a pegada de carbono em aproximadamente 10% e 26% em relação ao cenário ideal, respectivamente. No pior cenário avaliado (pessimista com produção chinesa), a pegada acumulada atinge 1.511,34 t CO₂eq.

Os resultados indicam que o esforço de neutralização é fortemente condicionado pela origem da tecnologia. No cenário de maior estresse (pessimista), a área de plantio necessária para componentes avaliados com base no fator global é de 6,37ha , valor 42,01% inferior aos 10,99ha exigidos quando os módulos são de origem chinesa. Os valores detalhados para cada cenário de emissão e suas respectivas demandas territoriais de compensação encontram-se sistematizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Pegada de carbono total da usina fotovoltaica da UFU e área de plantio para neutralização de carbono.

Cenário	Fator de Emissão (g CO₂eq/kWh)	Pegada de Carbono Total (t CO₂eq)	Área de Plantio (ha)
Ideal	42,8 IEA PVPS (2024)	696,47	1,97 - 5,06
	73,7 (Produção Chinesa)	1201,11	3,40 - 8,74
Alternativo	42,8 PVPS (2024)	768,42	2,17 - 5,59
	73,7 (Produção Chinesa)	1325,20	3,75 - 9,64
Pessimista	42,8 PVPS (2024)	876,36	2,48 - 6,37
	73,7 (Produção Chinesa)	1511,34	4,28 - 10,99

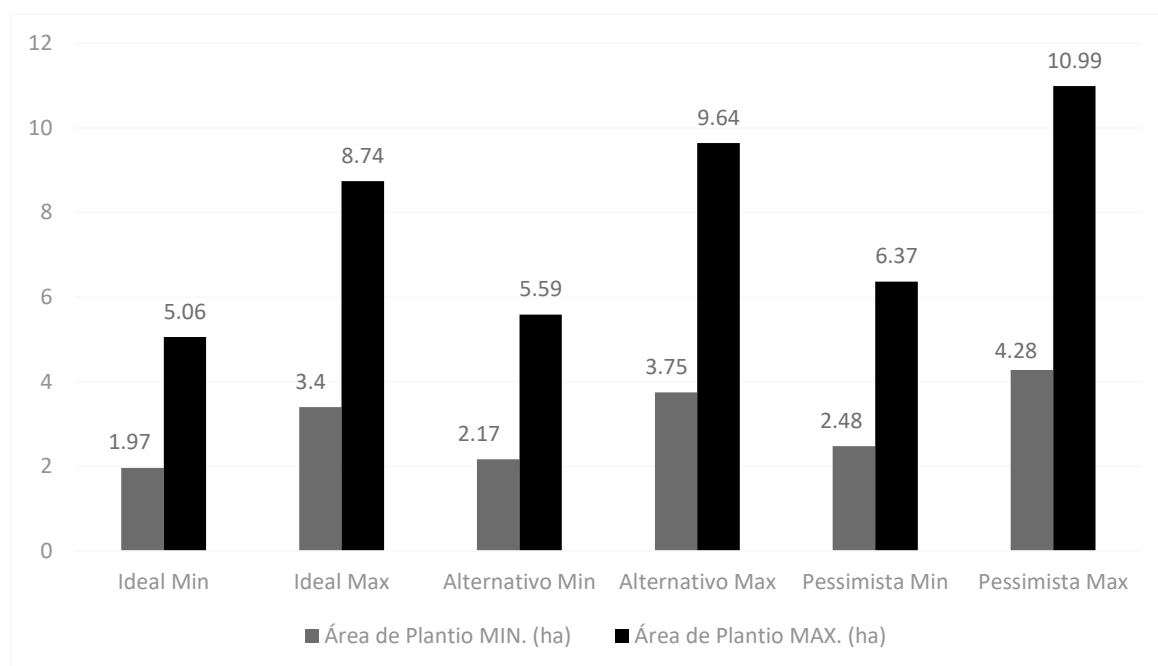
Fonte: IEA PVPS (2024); Hou *et al.* 2016. Elaboração: Os autores.

A área de ocupação da usina é de aproximadamente 0,4ha , enquanto a área de reflorestamento necessária para neutralizar a pegada de carbono incorporada é significativamente maior, variando de 1,97 a 10,99ha , conforme o cenário e a origem dos componentes. No cenário pessimista, a área de compensação pode ser mais de 27 vezes superior à área da usina e pode alcançar 44% da área total do Campus Santa Mônica. Observa-se, ainda, que, no cenário de piores condições para plantio, a área necessária para neutralizar a pegada do sistema produzida com base no fator de emissão do IEA PVPS (2024) é 42% menor do que a mesma estimativa quando se consideram componentes adquiridos de cadeias produtivas chinesas. Isso indica que a origem da manufatura deve ser incorporada às decisões de aquisição, de modo a reduzir passivos ambientais.

Adicionalmente, o risco de falha física decorrente de eventos climáticos — como granizo em Minas Gerais — eleva o passivo ambiental em função da reposição de equipamentos e da consequente reincorporação da pegada de manufatura.

Esse contexto demanda tratamento formal via Climate Change Risk Assessment (CCRA) e gestão de resiliência baseada nos Princípios do Equador. O CCRA constitui processo técnico de identificação de vulnerabilidades físicas frente a ameaças climáticas (HM GOVERNMENT, 2022), enquanto os Princípios do Equador são diretrizes globais de governança para a gestão de riscos socioambientais em projetos de infraestrutura (EQUATOR PRINCIPLES ASSOCIATION, 2020). A variação das áreas de plantio conforme os cenários é apresentada na Figura 2.

FIGURA 2 - Variação das áreas de plantio (em ha) nos diferentes cenários.



Fonte: Os autores (2026).

A logística para gerir áreas de até 10,99 ha impõe desafios à sustentabilidade do projeto, exigindo manejo compatível com a complexidade ecológica do bioma Cerrado. Diferentemente de biomas florestais úmidos, no Cerrado a maior parte do carbono é armazenada no solo e nas raízes, o que demanda que a restauração priorize a recuperação do Carbono Orgânico Total (COT) (MARTINS, 2019). Assim, o enfoque da restauração deve integrar estratégias de manejo detalhadas, como a semeadura direta. Ademais, um plano de manutenção é essencial para evitar o abandono das áreas e garantir a

permanência da captura de carbono ao longo do tempo (BARROS, 2023).

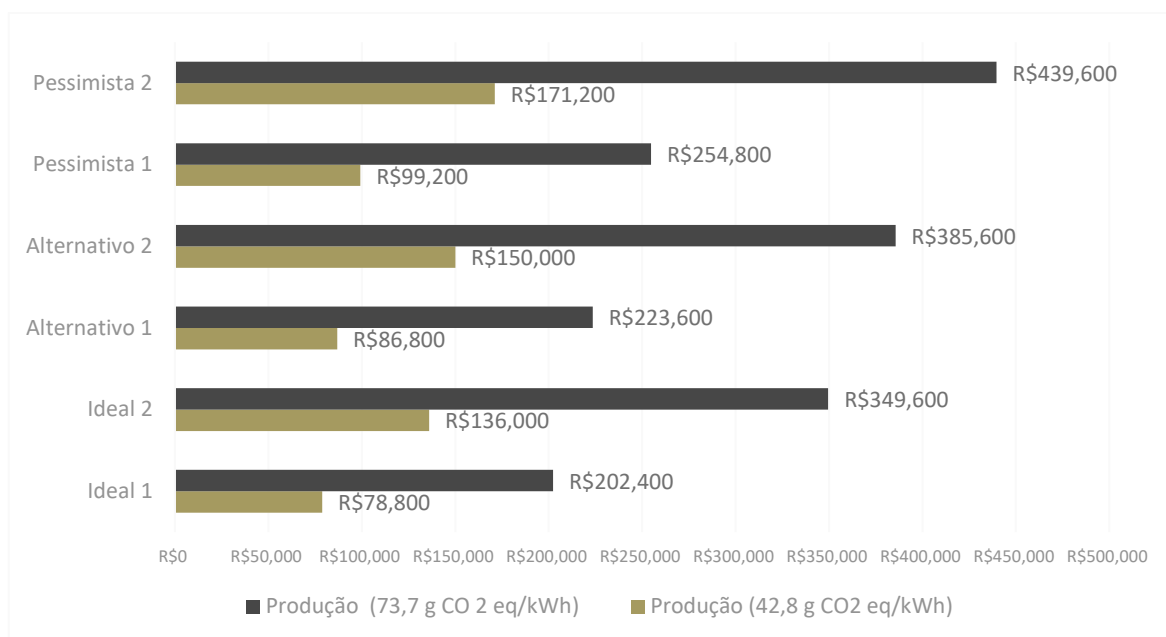
Em síntese, a escolha dos componentes não é ambientalmente neutra. A aquisição de painéis com maior pegada de carbono na fabricação produz impacto direto e quantificável nas emissões totais do projeto e na área requerida para neutralização. Esses resultados reforçam a tese de que projetos de energia renovável devem adotar abordagem crítica de gestão da cadeia de suprimentos, internalizando a pegada de carbono incorporada como fator de risco e de monitoramento, de forma a assegurar sustentabilidade real no longo prazo.

4.2. Pilar Econômico: Custo de operação e manutenção (O&M) e Custo de neutralização de carbono

A análise da Figura 3, referente ao custo de compensação ambiental, revela variação expressiva nos custos ambientais do projeto em função da origem dos componentes. No cenário ideal, a compensação considerando o fator de emissão de referência (42,8 g CO₂eq/kWh) é de R\$ 78.800,00. Entretanto, ao adotar a produção chinesa (73,7 g CO₂eq/kWh), esse custo aumenta para R\$ 202.400,00, correspondendo a elevação de 157%. Essa disparidade mantém-se em todos os cenários, evidenciando a pegada de carbono incorporada dos projetos, isto é, o custo ambiental transferido à usina. No cenário pessimista com produção asiática, o custo pode atingir R\$ 439.600,00, aumento de mais de 117% em relação ao limite superior do cenário ideal (R\$ 202.400,00). Esses resultados são apresentados na Figura 3.

A monetização do passivo ambiental é central para a avaliação de sustentabilidade. Embora a aquisição de componentes de fornecedores com produção intensiva em carbono possa reduzir o investimento inicial (*CapEx*), o custo ambiental transferido — quando internalizado e monetizado — concretiza o pilar Planet do Triple Bottom Line (TBL) de Elkington (1994). O fato de o custo de neutralização constituir componente significativo e compulsório corrobora o princípio da Economia Ecológica, que preconiza a internalização dos custos da degradação ecossistêmica na contabilidade econômica, reconhecendo limites à substituição do capital natural (Zang *et al.*, 2024). No projeto da UFU, ao absorver esse custo no *OpEx*, paga-se o “preço real” do capital natural necessário à neutralidade, evitando uma subvenção ambiental implícita e estabelecendo critério de governança responsável.

Figura 3 - Custo de compensação ambiental para plantio das áreas de floresta nos diferentes cenários.



Fonte: Os autores (2026). Elaboração: Os autores (2026).

A análise dos custos operacionais apresentada na Tabela 6 evidencia impacto financeiro direto e substancial da pegada de carbono. No cenário ideal, a adoção de cadeia produtiva com alta emissão resulta em aumento de 39,36% no custo operacional total, elevando-o de R\$ 687.993,56 para R\$ 958.793,56. Do total de R\$ 958.793,56, 36,46% correspondem especificamente à despesa com neutralização de carbono.

Essa tendência de aumento percentual do impacto da pegada de carbono, contudo, reduz-se nos cenários subsequentes, passando para 35,63% no cenário alternativo e 31,54% no pessimista. Esse decréscimo decorre do aumento expressivo dos custos de substituição de componentes, que passam a representar parcela maior do custo total, reduzindo (“espremendo”) a participação relativa da compensação de carbono.

A literatura sobre O&M (Wood Mackenzie, 2023) indica que reparos corretivos não planejados representam cerca de 24% e a manutenção preventiva 35% dos custos de O&M, o que sustenta a inclusão robusta dos custos de substituição nos cenários de risco. Apesar da tendência decrescente, o impacto da pegada de carbono permanece substancial, variando de 31,54% a 39,36% do orçamento operacional do projeto.

Tabela 6 - Custo Operacional em diferentes pegadas de carbono e relação com o custo final do projeto.

Cenário	Custo Operacional IEA PVPS (2024) (R\$)	Custo Operacional Produção Chinesa (R\$)	Aumento Percentual (%)	Neutralização no Custo Final (%)
Ideal	687.993,56	958.793,56	39,36	36,46
Alternativo	838.493,74	1.137.293,74	35,63	33,9
Pessimista	1.079.199,28	1.419.599,28	31,54	30,97

Fonte: Os autores (2026). Elaboração: Os autores (2026).

A análise da Figura 3, referente à evolução da economia líquida, demonstra comportamento financeiro típico de usina fotovoltaica: o projeto inicia com economia acumulada negativa, em razão do elevado investimento inicial, e evolui para saldo positivo ao longo do tempo. Nesse contexto, a escolha dos componentes torna-se fator decisivo para otimização financeira e mitigação de riscos. Mesmo no cenário ideal, a variação da pegada de carbono produz impacto expressivo.

No cenário ideal mínimo, com pegada de carbono reduzida, a economia líquida acumulada atinge R\$ 3.865.062,04 ao final de 25 anos. Em contraste, no cenário ideal máximo, com pegada maior, a economia reduz-se para R\$ 3.486.273,44. A diferença de R\$ 378.788,60 corresponde a perda de 10,86% da economia total, evidenciando a relevância da gestão de carbono mesmo em cenário favorável.

O impacto torna-se ainda mais crítico na comparação entre os cenários extremos. A confrontação entre o cenário ideal e o pessimista, embora represente níveis distintos de risco, permite quantificar a vulnerabilidade do projeto a fatores combinados. O cenário pessimista máximo configura o pior caso, ao reunir (i) risco de evento climático extremo, exigindo substituição de 50% dos componentes, e (ii) custos elevados associados à cadeia de suprimentos de alta pegada de carbono. Nesse caso, a economia acumulada alcança R\$ 2.620.304,12. Comparando-se esse valor à economia potencial máxima do projeto (R\$ 3.865.062,04, no cenário ideal mínimo), observa-se perda de R\$ 1.244.757,92, equivalente a 32,20% da economia total potencial.

A discussão sobre viabilidade financeira e risco climático conduz ao tema da gestão de ativos e das oportunidades de mercado. A internalização dos custos do ciclo de vida evidencia o alinhamento da UFU a modelo de governança responsável, compatível

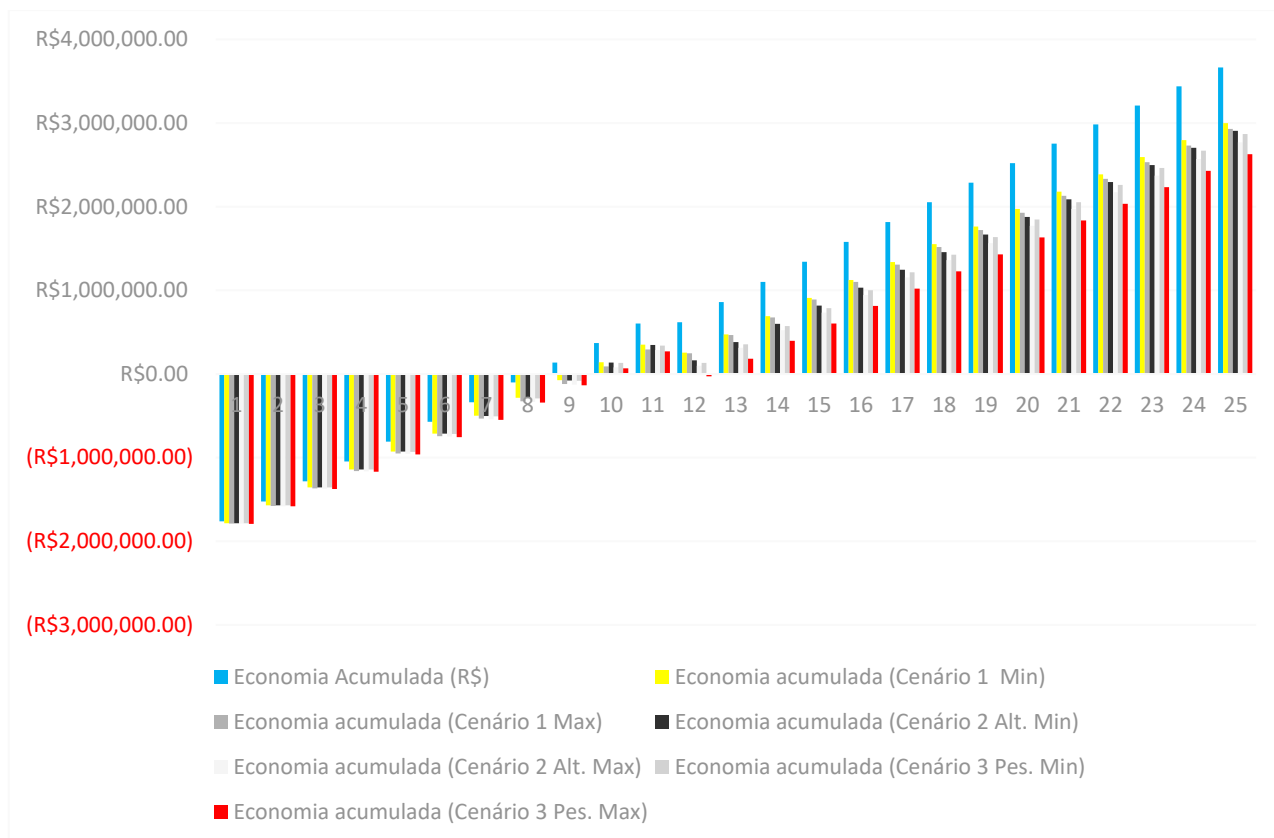
com práticas de compras públicas sustentáveis e com o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

O projeto de restauração florestal pode ser estruturado como Solução Baseada na Natureza (NbS) voltada à geração de créditos de carbono de alta integridade. Sua viabilidade comercial no Mercado Voluntário de Carbono (MVC) depende da aplicação de metodologias como o padrão VCS (Verified Carbon Standard), gerido pela organização internacional Verra. Essa certificação assegura critérios de adicionalidade, permanência e mensurabilidade do sequestro de carbono, atendendo à exigência por padrões acreditados para validação de ativos. Assim, torna-se possível converter o passivo ambiental em ativo ecológico, transformando o custo de neutralização em potencial fluxo de receita capaz de otimizar o retorno financeiro do projeto.

Essa mudança de paradigma pode reduzir o tempo de retorno sobre o investimento (*ROI*), que no setor fotovoltaico tipicamente varia entre 5 e 10 anos. A integração desses créditos ao balanço financeiro torna a usina não apenas autossustentável energeticamente, mas também um ativo gerador de valor econômico e ambiental para a instituição.

Dessa forma, a maximização da economia de longo prazo da usina fotovoltaica está intrinsecamente ligada à escolha de fornecedores e à gestão dos custos de compensação da pegada de carbono. As decisões de aquisição dos componentes configuram fator decisivo para a viabilidade e o desempenho financeiro do projeto. Esses resultados podem ser analisados de forma integrada por meio da Figura 4.

Figura 4 - Balanço de Custos do Projeto da Usina Fotovoltaica por Cenário (25 Anos).



Fonte: Os autores (2026). Elaboração: Os autores (2026).

5. CONCLUSÃO

Este estudo abordou a gestão de energia renovável ao integrar a análise econômica à responsabilidade ambiental na cadeia de valor de sistemas fotovoltaicos públicos. Os achados confirmam que a gestão de energia limpa constitui um campo complexo, no qual a responsabilidade ambiental transcende a fase de operação e se concentra, primordialmente, na cadeia global de suprimentos.

Do ponto de vista ambiental, os resultados evidenciam um paradoxo geográfico incontornável: a dependência global da manufatura de componentes — com 85% da produção mundial concentrada em países com matriz energética baseada em carvão, como a China — resulta em uma pegada de carbono incorporada que pode ser até 72% superior ao fator de referência global no cenário ideal. A pegada total do projeto, variando entre 696,47 t CO₂eq e 1.511,34 t CO₂eq, traduz-se em passivo ambiental que exige a neutralização de 1,97 a 10,99 hectares no bioma Cerrado.

Essa desproporção espacial — com área de compensação podendo ser até 27 vezes

maior que a área ocupada pela usina — impõe desafios logísticos e de governança à instituição, além de demandar a adoção de técnicas de restauração adaptadas ao bioma, com prioridade para a recuperação do Carbono Orgânico Total (COT) no solo. A análise de Risco Físico Climático (CCRA) reforça a necessidade de planejamento de substituição de componentes, uma vez que falhas (cenários alternativo e pessimista) implicam reincorporação da pegada de carbono da manufatura, estabelecendo um ciclo de retroalimentação (feedback) entre vulnerabilidade climática e passivo ambiental.

Na dimensão econômica, confirma-se que a monetização da pegada de carbono a transforma de externalidade abstrata em custo operacional. Ao internalizar esse passivo ambiental, o custo de compensação (de R\$ 78.800,00 a R\$ 439.600,00 ao longo de 25 anos) representa de 30,97% a 36,46% do custo operacional total (*OpEx*) do projeto. Esse achado corrobora o princípio da Economia Ecológica, que rejeita a substituição ilimitada do capital natural e exige que a contabilidade econômica reflita a equidade intergeracional.

A análise de sensibilidade demonstra que a estabilidade econômica de longo prazo está intrinsecamente vinculada à gestão da cadeia de valor. A combinação entre risco físico e alta intensidade de carbono na origem dos componentes resulta em perda quantificável de 32,20% da economia potencial do projeto (R\$ 1.244.757,92). Ainda assim, mesmo sob os cenários mais desfavoráveis e com a inclusão integral do custo de neutralização, o projeto mantém viabilidade econômica, reforçando a tese de que a sustentabilidade não constitui custo proibitivo, mas fator de otimização de longo prazo e imperativo de governança.

A UFU, ao adotar essa metodologia de ACV e compensação, alinha-se proativamente ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, voltado a assegurar padrões de consumo e produção sustentáveis. Este estudo fornece uma métrica acionável — a diferença de 72% na pegada — para orientar futuras decisões de aquisição, exigindo maior transparência e menor intensidade de carbono na cadeia global de suprimentos. A viabilidade da compensação também abre oportunidade de otimização financeira: a potencial geração de créditos de carbono florestal no Mercado Voluntário de Carbono (MVC) na área de restauração, convertendo custo (*OpEx*) em potencial ativo (receita), reduzindo o tempo de retorno sobre o investimento e fortalecendo o balanço Triple Bottom Line (TBL) do projeto. Em última análise, a sustentabilidade plena é alcançada quando a responsabilidade não é delegada nem ignorada, mas internalizada como componente inegociável da gestão de ativos, transformando a usina da UFU em um

modelo de governança responsável para o setor público brasileiro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo atendeu aos objetivos de pesquisa ao confirmar a hipótese de que a usina fotovoltaica da UFU possui pegada de carbono relevante e que a valoração do custo de sua neutralização impacta a viabilidade econômica do projeto. A pesquisa também evidencia a contradição de uma instituição abastecida por matriz elétrica relativamente limpa optar por um projeto que incorpora passivo ambiental, reforçando a interpretação de que o principal motivador da decisão foi a economia financeira na conta de energia.

A principal contribuição do trabalho reside na validação da abordagem metodológica que integra os pilares econômico e ambiental da sustentabilidade. Demonstrou-se que a monetização da pegada de carbono, ao converter passivo ambiental em custo financeiro tangível, afeta de forma direta e incontornável a rentabilidade do projeto. Ainda assim, mesmo com a inclusão dos custos de neutralização, o projeto da UFU permanece economicamente viável. Essa viabilidade, por sua vez, torna a compensação ambiental uma medida factível, permitindo que a universidade avance rumo a uma sustentabilidade mais abrangente.

A análise, contudo, aponta lacunas relevantes de dados e, portanto, recomendações para pesquisas futuras. Os valores de pegada de carbono associados à produção chinesa podem estar subestimados, uma vez que Hou *et al.* (2016) constitui referência anterior e se concentra principalmente em módulos fotovoltaicos, não contemplando todos os componentes. Adicionalmente, a estimativa do sequestro de carbono no bioma Cerrado enfrenta carência de estudos de longo prazo, o que introduz variabilidade nos cálculos de neutralização. Estudos futuros devem, ainda, ampliar o escopo para considerar o pilar social do projeto (People) e seu alinhamento com a Responsabilidade Social Corporativa (CSR), bem como incorporar o custo de aquisição da terra destinada ao reflorestamento.

Em síntese, este trabalho demonstra que sustentabilidade econômica e responsabilidade ambiental são indissociáveis. A gestão de projetos de energia limpa não pode mais restringir-se à fase de operação: deve considerar a integridade de toda a cadeia de valor. Essa abordagem alinha-se ao ODS 12, que visa assegurar padrões sustentáveis de produção e consumo, ao valorizar a transparência da cadeia produtiva e assumir responsabilidade pelas externalidades.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BARROS, Fernanda de Vasconcellos *et al.* Cost-effective restoration for carbon sequestration across Brazil's biomes. **Science of The Total Environment**, v. 876, p. 162600, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162600>.

BATIĆ, Iva. Impacts of different photovoltaic panel technologies on electrical energy production and CO2 emission reduction. **Frontiers in Energy Research**, v. 13, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1519131>.

BECQUEREL, Edmond. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 9, p. 561-567, 1839. Disponível em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2968p/f561.item>. Acesso em: 10 dez. 2025.

BOLINA, Giovane; BARREIRA, Sybelle. Quantificação de carbono em espécies nativas do Cerrado. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO (CONPEEX), 10., 2013, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: UFG, 2013. Disponível em: http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pivic/trabalhos/GIOVANE_.PDF. Acesso em: 15 nov. 2025.

BRASIL. [Lei nº 14.119 (2021)]. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Brasília, DF: Presidência da República, [2021]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14119.htm. Acesso em: 20 nov. 2025.

BRASIL. [Lei nº 15.042 (2024)]. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Brasília,

DF: Presidência da República, [2024]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm. Acesso em: 15 dez. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Bioma Cerrado (PPCerrado)** – 4ª Fase (2023-2027). Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/controle-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/ppcerrado>. Acesso em: 05 dez. 2025.

CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/atlas-solarimetrico-vol-i-mg.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

CMMAD. **Nosso futuro comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1987. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/271748594/Relatorio-Brundtland-Nosso-Futuro-Comum-Em-Portugues>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ELKINGTON, John. Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. **California Management Review**, Berkeley, v. 36, n. 2, p. 90-100, jan. 1994. DOI: <https://doi.org/10.2307/41165746>.

EMBRAPA TERRITORIAL. **Sequestro de carbono em sistemas de produção de grãos e fibras em solo arenoso do Cerrado da Bahia**. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1124377>. Acesso em: 26 out. 2025.

EMBRAPA. **Estudo aponta onde e com quais espécies reflorestar a Amazônia com base na ciência**. Brasília: Embrapa, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/101677826/estudo-aponta-onde-e-com-quais-especies-reflorestar-a-amazonia-com-base-na-ciencia>. Acesso em: 15 dez. 2025.

ENERGY EDUCATION. **Photovoltaic effect**. [S. l.]: Energy Education, [s. d.]. Disponível em: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect. Acesso em: 20 nov. 2025.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy 2024**. 73. ed. Londres: Energy Institute, 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 15 nov. 2025.

EQUATOR PRINCIPLES ASSOCIATION. **The Equator Principles (EP4)**: A financial industry benchmark for determining, assessing and managing environmental and social risk in projects. [S. l.]: Equator Principles Association, 2020. Disponível em: https://equator-principles.com/app/uploads/The-Equator-Principles_EP4_July2020.pdf. Acesso em: 14 dez. 2025.

FARIA, Vitor Rezende. **Viabilidade econômica de modelos de negócio para a geração distribuída fotovoltaica no Brasil**: estudos de casos em Goiás para clientes do Grupo B. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2020. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1003/1/disserta%C3%A7%C3%A3o_Vitor%20Rezende%20Faria.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

FERRARA, V. *et al.* Progress and Prospects of Biomolecular Materials in Solar Photovoltaic Applications. **Molecules**, v. 30, n. 15, p. 3236, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30153236>.

FTHENAKIS, Vasilis M.; KIM, Hyung Chul. Photovoltaics: Life-cycle analyses. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1609-1628, ago. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>.

GREENER. **Estudo Estratégico de Geração Distribuída**: Mercado Fotovoltaico 1º Semestre 2023. São Paulo: Greener, 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/>. Acesso em: 03 ago. 2025.

HARIDASAN, Mundayatan. Nutrição mineral de plantas nativas do cerrado. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 1, p. 54-64, 2000. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/284/o/v12n1p54.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

HM GOVERNMENT. **UK Climate Change Risk Assessment 2022**. London: HM Government, 2022. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-climate-change-risk-assessment-2022>. Acesso em: 19 dez. 2025.

HOU, Guofu *et al.* Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. **Applied Energy**, v. 164, p. 882-890, fev. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.023>.

IBRC. The Triple Bottom Line: What Is It and How Does It Work?. **Indiana Business Review**, v. 86, n. 1, p. 1–9, 2011. Disponível em: <https://www.ibrc.indiana.edu/ibr/2011/spring/article2.html>. Acesso em: 26 out. 2025.

IEA PVPS. **Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV systems: 2023 data update**. [S. l.]: IEA PVPS, 2024. (Task 12 Fact Sheet). Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/05/Task-12-Fact-Sheet-v2-1.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2025.

IEA PVPS. **Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems**. [S. l.]: IEA PVPS, 2020. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

IEA. **World Energy Investment 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024>. Acesso em: 12 nov. 2025.

IGAM. **Alerta de tempestade severa**. Belo Horizonte: SIMGE/IGAM, 2024. Disponível em: <https://simge.mg.gov.br>. Acesso em: 15 nov. 2025.

INMET. **Alertas Meteorológicos**. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 15 nov. 2025.

INPE. **Nota Técnica: Eventos Climáticos Extremos**. São José dos Campos: INPE, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe>. Acesso em: 02 dez. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Portaria nº 118, de 3 de outubro de 2022**. Institui Procedimento Operacional Padrão (POP) para Estimativa dos Custos de Implantação e Manutenção de Projeto de Recuperação Ambiental. Brasília, DF: IBAMA, 2022. Disponível em:

<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-118-de-3-de-outubro-de-2022-434890911>. Acesso em: 10 out. 2022.

IPEA. **Viabilidade econômica de sistema fotovoltaico no Brasil e Possíveis Efeitos no Setor Elétrico**. Brasília: IPEA, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/5a0a21f5-d620-400e-a539-9fe8fbec4ad8/content>. Acesso em: 20 set. 2025.

ISO. **ISO 14040**: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. Acesso em: 20 ago. 2025.

KRUPNOV, Yuriy A. *et al.* The contribution of sustainable and clean energy to the strengthening of energy security. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 1090110, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1090110>.

KWH ANALYTICS. **2023 Solar Risk Assessment**. San Francisco: kWh Analytics, 2023. Disponível em: <https://staging.kwhanalytics.com/wp-content/uploads/2025/02/2023-Solar-Risk-Assessment.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

LOPES, Rosimeire Batista; MIOLA, Deise Tatiane Bueno. Sequestro de carbono em diferentes fitofisionomias do Cerrado. **SynThesis Revista Digital FAPAM**, Pará de Minas, v. 2, n. 2, p. 127-143, nov. 2010. Disponível em: <https://periodicos.fapam.edu.br/index.php/synthesis/article/download/40/37>. Acesso em: 10 out. 2025.

LUO, Jinni *et al.* A comparative study on the combination of life cycle assessment and ecological footprints: solar photovoltaic power generation vs. coal power generation in Ningxia. **Frontiers in Energy Research**, v. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1375820>.

MARACAHIPES-SANTOS, Leonardo *et al.* Effects of soil and space on the woody species composition and vegetation structure of three Cerrado phytophysionomies in the Cerrado-Amazon transition. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 77, n. 4, p. 830-839, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.02016>.

MAYSUN SOLAR. **Tecnologia Half-Cell**: O que é e quais as vantagens?. [S. l.]: Maysun Solar, 2025. Disponível em: <https://www.maysunsolar.com/pt-pt/tecnologia-half-cell-maysun-solar/>. Acesso em: 20 out. 2025.

MELO, Antônio Carlos Galvão de *et al.* Biomassa, fixação de carbono e estrutura da vegetação de Cerrado em restauração aos seis anos, Assis, SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 73-78, jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2009211201>.

MELO, Antônio Carlos Galvão de; DURIGAN, Giselda. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 149-154, ago. 2006. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr71/cap15.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

MINAS GERAIS. [Decreto nº 48.994 (2025)]. **Decreto nº 48.994, de 10 de fevereiro de 2025**. Dispõe sobre o Programa Estadual de Conversão de Multas Ambientais e dá outras providências. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, [2025]. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/48994/2025/>. Acesso em: 15 dez. 2025.

MINAS GERAIS. [Lei nº 24.944 (2024)]. **Lei nº 24.944, de 2 de agosto de 2024**. Altera a Lei nº 20.922/2013 e a Lei nº 21.972/2016. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, [2024]. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/LEI/24944/2024/>. Acesso em: 15 dez. 2025.

MIRANDA, Dirceu Lucio Carneiro de; MELO, Antônio Carlos Galvão de; SANQUETTA, Carlos Roberto. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamentos de restauração. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, jul./ago. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000400012>.

NREL. **Renewable Energy**: An Overview. Golden, CO: NREL, 2001. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy01osti/27955.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2024.

NREL. **U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark**: Q1 2017. Golden, CO: NREL, 2017. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2025.

NREL. **U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark**: Q1 2020. Golden, CO: NREL, 2021. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77324.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2025.

OLIVEIRA, Daniele Costa de. **Potencial de sequestro de carbono no solo e dinâmica da matéria orgânica em pastagens degradadas no Brasil**. 2018. 82 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-17072018-184226/publico/Daniele_Costa_de_Oliveira_versao_revisada.pdf. Acesso em: 15 fev. 2025.

ONU. **Goal 12**: Ensure sustainable consumption and production patterns. [S. l.]: ONU, 2025. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>. Acesso em: 03 ago. 2025.

ONU. **Transformando Nosso Mundo**: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. [S. l.]: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 06 dez. 2025.

OPEN UNIVERSITY. **Renewable energy from the Sun**. [S. l.]: Open University, 2024. Disponível em: <https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=73747§ion=4>. Acesso em: 26 jul. 2024.

PEHL, Michaja *et al.* Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. **Nature Energy**, v. 2, n. 12, p. 939-945, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>.

PENTTINEN, Sirja-Leena; MERSINIA, Ioanna. Introduction: Examining Different Aspects of the Energy Transition. In: PENTTINEN, Sirja-Leena; MERSINIA, Ioanna (ed.). **Energy Transitions**: Regulatory and Policy Trends. Cambridge: Intersentia, 2017. p. 1-8. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/energy-transitions/introduction-examining-different-aspects-of-the-energy-transition/C27215FFA3CF1CB85D0781CB249531DC>. Acesso em: 20 nov. 2025.

RIBEIRO, J.; WUNDER, S. **Pagamento por serviços ambientais na Amazônia: recomendações para a implementação**. Rio de Janeiro: CIFOR, 2022. Disponível em: <https://cgspace.cgiar.org/items/328df8e6-ddd1-418b-89b3-00daa129759e>. Acesso em: 16 dez. 2025.

SAVITZ, Andrew W. **The Triple Bottom Line: How Today's Best-Run Companies Are Achieving Economic, Social and Environmental Success**. San Francisco: Jossey-Bass, 2006. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/9781118226223>. Acesso em: 20 nov. 2025.

SILVA, Marcília Martins da. **Frações de carbono do solo sob diferentes fitofisionomias do Cerrado no Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba**. 2019. 123 f. Dissertação (Mestrado em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Urutaí, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/481>. Acesso em: 16 dez. 2025.

SOLIS. **Problems of Micro-Crack of PV Panel and Identification Methods**. [S. l.]: Solis, 2021. Disponível em: https://www.solisinverters.com/br/documentation/V_Panel_Micro-Crack_Problems_and_Identification_Methods_06221316.html. Acesso em: 20 nov. 2025.

TAYLOR & FRANCIS. **Photovoltaic effect – Knowledge and References**. [S. l.]: Taylor & Francis, 2024. Disponível em: https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Electrical_%26_electronic_engineering/Photovoltaic_effect/. Acesso em: 26 jul. 2024.

TNC; IPEA; EMBRAPA. **Restauração da Vegetação Nativa no Brasil: Caracterização de técnicas e estimativas de custo como subsídio a programas e políticas públicas e privadas de restauração em larga escala**. Brasília: TNC, 2018. Disponível em: <https://www.tnc.org.br/content/dam/tnc/nature/en/documents/brasil/restauracao-da-vegetacao-nativa-no-brasil.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2025.

UCR. **What Is Clean Energy?**. Riverside, CA: University of California, 2024. Disponível em: <https://engineeringonline.ucr.edu/blog/what-is-clean-energy>. Acesso em: 26 jul. 2024.

UFU. **UFU instala usina para geração de energia a partir da luz solar**. Uberlândia: UFU, 2021. Disponível em: <https://comunica.ufu.br/noticias/2021/09/ufu-instala-usina-para-geracao-de-energia-partir-da-luz-solar>. Acesso em: 03 ago. 2025.

UN. **Renewable energy – powering a safer future**. [S. l.]: UN, 2024. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>. Acesso em: 26 jul. 2024.

UNEP. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020**. Paris: UNEP, 2020. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2021/01/Guidelines-for-Social-Life-Cycle-Assessment-of-Products-and-Organizations-2020-22.1.21sml.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2025.

WANG, Lunche *et al.* Carbon emissions and reduction performance of photovoltaic systems in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 200, 114603, ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114603>.

WEF. **Fostering Effective Energy Transition 2024**. Geneva: WEF, 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2024>. Acesso em: 06 dez. 2025.

WEF. **The Global Risks Report 2025**. 20. ed. Geneva: WEF, 2025. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

WOOD MACKENZIE; SEIA. **Solar Market Insight Report 2019 Year in Review**. Washington, DC: Wood Mackenzie; SEIA, 2020. Disponível em: <https://seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-2019-year-review/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

WORLD BANK. **Global Photovoltaic Power Potential by Country**. Washington, DC: The World Bank, 2020. Disponível em: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/466331592817725242/global-photovoltaic-power-potential-by-country>. Acesso em: 30 jul. 2025.

ZHANG, C. *et al.* Assessing the efficiency and sustainability of three eco-campus systems in Northwestern China using a comprehensive evaluation framework. **Energy Reports**, v. 8, p. 187-204, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.282>.

ZHAO, Long *et al.* **Geopolitical Paradox**: The Arctic and Africa in China's Foreign Policy. [S. l.]: ResearchGate, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363565537_China_and_South_Asia_Changing_Regional_Dynamics_Development_and_Power_Play. Acesso em: 20 nov. 2025.