



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
FLORESTAIS



SEBASTIANA RENATA VILELA AZEVEDO

**GOVERNANÇA CLIMÁTICA PARA USINAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS NO NORDESTE: CONTRIBUIÇÕES
METODOLÓGICAS E DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA
SUNMETRICSC**

Recife - PE
Agosto/2025

SEBASTIANA RENATA VILELA AZEVEDO

**GOVERNANÇA CLIMÁTICA PARA USINAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS NO NORDESTE: CONTRIBUIÇÕES
METODOLÓGICAS E DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA
SUNMETRICSC**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva

Recife – PE
Agosto/2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

A994g Azevedo, Sebastiana Renata Vilela.
Governança climática para usinas solares fotovoltaicas
no Nordeste: contribuições metodológicas e
desenvolvimento da plataforma SunMetricsC / Sebastiana
Renata Vilela Azevedo. – Recife, 2025.
244 f.; il.

Orientador(a): Emanuel Araújo Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Florestais, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Licenças
ambientais. 3. Gases do efeito estufa. 4. Dióxido de
carbono 5. Plataforma aberta da Web. I. Silva, Emanuel
Araújo, orient. II. Título

CDD 634.9

SEBASTIANA RENATA VILELA AZEVEDO

**GOVERNANÇA CLIMÁTICA PARA USINAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS NO NORDESTE: CONTRIBUIÇÕES
METODOLÓGICAS E DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA
SUNMETRICSC**

Aprovada em: 26/08/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Raphael Abrahão
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira
Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Everaldo Marques de Lima Neto
Universidade Federal Rural do Pernambuco

Orientador:

Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva
Universidade Federal Rural do Pernambuco

Recife – PE
Agosto/2025

“Ao meu avô Roberto, cuja memória se tornou força e inspiração nesta jornada”

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida, saúde e pela força concedida ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva, registro minha mais profunda gratidão. Mais do que orientador, foi um verdadeiro exemplo de humanidade, ética e dedicação. Sua paciência, escuta atenta, apoio nas dificuldades e confiança em meu trabalho foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui. Sem suas orientações e incentivo, esta tese não teria tomado a forma que hoje apresenta.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela oportunidade de realizar este doutorado e por todo o suporte acadêmico oferecido.

À Rio Alto Energias Renováveis, pela disponibilização de dados fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e pelo apoio técnico durante o processo.

À minha família, especialmente à minha mãe, pelo amor incondicional, paciência e apoio constante. Aos meus irmãos, avós, tios e tias, pela compreensão e incentivo nos momentos de ausência.

Aos amigos que estiveram presentes nesta trajetória, oferecendo apoio, escuta e incentivo em diferentes momentos, deixo aqui minha sincera gratidão.

Ao meu namorado, pelo companheirismo, compreensão e apoio incondicional, especialmente nos momentos mais desafiadores desta caminhada.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização desta tese.

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **Governança climática para usinas solares fotovoltaicas no Nordeste: contribuições metodológicas e desenvolvimento da plataforma SunMetricsC**. 2025. Orientador: Emanuel Araújo Silva.

RESUMO

A crescente expansão de usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada no Nordeste brasileiro tem impulsionado a transição energética nacional, mas também traz desafios ambientais, regulatórios e metodológicos que demandam investigação sistemática. Esta tese teve como objetivo analisar os impactos ambientais desse tipo de empreendimento, quantificar emissões de gases de efeito estufa de um estudo de caso e propor uma plataforma web para elaboração de inventário de emissões de gases de efeito estufa. Inicialmente, foram identificados 294 empreendimentos em construção e operação até dezembro de 2023 no Nordeste brasileiro, dos quais apenas 29,6% apresentavam estudos ambientais disponíveis em plataformas públicas e acessíveis na internet. A análise desses documentos permitiu sistematizar os principais impactos e evidenciou a ausência de diretrizes técnicas padronizadas entre os Estados nordestinos. Como contribuição, foram propostas recomendações estruturadas em três eixos: critérios para enquadramento, impactos mínimos obrigatórios e programas ambientais essenciais, visando fortalecer o licenciamento como instrumento de gestão territorial. Em seguida, foi realizada a quantificação dos gases de efeito estufa emitidos durante a fase de construção da usina UFV STL 9, localizada no Semiárido paraibano, com base no Programa Brasileiro GHG Protocol. As emissões totais somaram 5.627,20 tCO₂e, sendo 44,36% atribuídas ao transporte de materiais. A neutralidade de carbono das emissões quantificadas foi alcançada em 5,7 meses de operação, com previsão de evitar a emissão de 279.180,63 tCO₂e em 25 anos. Por fim, foi desenvolvida e validada a plataforma SunMetricsC, que calcula as emissões e projeta a neutralidade de carbono de forma automatizada. A plataforma demonstrou elevada precisão e aplicabilidade prática, reunindo funcionalidades inovadoras e estrutura modular adaptada ao setor solar. A tese contribui para o aprimoramento do licenciamento ambiental, para o avanço metodológico na contabilidade de emissões e para o fortalecimento da governança climática no setor de energia renovável, com aplicabilidade prática para órgãos licenciadores e empresas do setor.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; licenciamento ambiental; emissões de gases de efeito estufa; neutralidade de carbono; plataforma web.

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **Climate Governance for Photovoltaic Solar Power Plants in Northeastern Brazil: Methodological Contributions and Development of the SunMetricsC Platform**. 2025. Advisor: Emanuel Araújo Silva.

ABSTRACT

The growing expansion of centralized photovoltaic solar power plants in Northeastern Brazil has driven the national energy transition but has also brought environmental, regulatory, and methodological challenges that require systematic investigation. This doctoral thesis aimed to analyze the environmental impacts of this type of enterprise, quantify greenhouse gas (GHG) emissions through a case study, and propose a web-based platform for preparing GHG emission inventories. Initially, 294 power plants under construction or operation as of December 2023 were identified in Northeastern Brazil, of which only 29.6% had environmental studies publicly available on official platforms. The analysis of these documents allowed for the systematization of the main impacts and revealed the absence of standardized technical guidelines among the Northeastern states. As a contribution, recommendations were proposed and structured into three pillars: criteria for project classification, minimum mandatory impacts, and essential environmental programs, aiming to strengthen environmental licensing as an instrument of territorial management. Subsequently, the quantification of greenhouse gases emitted during the construction phase of the UFV STL 9 centralized photovoltaic solar power plant, located in the semi-arid region of Paraíba State, was carried out based on the Brazilian GHG Protocol Program. Total emissions amounted to 5,627.20 tCO₂e, with 44.36% attributed to material transportation. Carbon neutrality for the quantified emissions was achieved after 5.7 months of operation, with an estimated 279,180.63 tCO₂e of avoided emissions over a 25-year operational period. Finally, the SunMetricsC platform was developed and validated to automatically calculate emissions and project carbon neutralization. The platform demonstrated high accuracy and practical applicability, combining innovative features with a modular structure tailored to the solar energy sector. This thesis contributes to the improvement of environmental licensing, the methodological advancement of emission accounting, and the strengthening of climate governance in the renewable energy sector, offering practical applicability to environmental agencies and companies in the field. Finally, the SunMetricsC platform was developed and validated to automatically calculate emissions and project carbon neutrality. The platform demonstrated high accuracy and practical applicability, combining innovative features with a modular structure tailored to the solar energy sector. This thesis contributes to the improvement of environmental licensing, the methodological advancement of emission accounting, and the strengthening of climate governance in the renewable energy sector, offering practical applicability for environmental agencies and companies in the field.

Keywords: photovoltaic solar energy; environmental licensing; greenhouse gas emissions; carbon neutrality; web platform.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1 Histórico e evolução das energias renováveis	23
2.2 Licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas	26
2.2.1 Legislação no âmbito federal e estadual.....	26
2.2.2 Tipos de estudos ambientais para licenciamento	30
2.2.3 Licenças e autorizações necessárias	31
2.3 Impactos ambientais	34
2.4 Mudanças Climáticas e Emissões de Gases de Efeito Estufa	35
CAPÍTULO 1	40
1. INTRODUÇÃO	43
2. OBJETIVOS	45
2.1 Geral	45
2.2 Específicos	45
3. METODOLOGIA	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Panorama geral.....	49
4.1.1 Alagoas.....	52
4.1.2 Bahia.....	53
4.1.3 Ceará	56
4.1.4 Maranhão.....	59
4.1.5 Paraíba	60
4.1.6 Pernambuco	63
4.1.7 Piauí.....	66
4.1.8 Rio Grande do Norte.....	69
4.1.9 Sergipe	72
4.2 Estudos ambientais.....	73
4.2.1 Identificação dos impactos ambientais	74
4.2.1.1 Meio Físico	76
4.2.1.2 Meio Biótico.....	81
4.2.1.3 Meio Socioeconômico	84

4.2.2 Impactos ambientais e ações geradoras	90
4.2.3 Medidas mitigadoras e potencializadoras dos impactos ambientais	95
4.3 Diretrizes e Recomendações	100
4.3.1 Fator de enquadramento	100
4.3.2 Impactos ambientais de avaliação obrigatória	103
4.3.3 Programas ambientais obrigatórios	105
5. CONCLUSÕES	109
CAPÍTULO 2	111
1. INTRODUÇÃO	114
2. OBJETIVOS	116
2.1 Geral	116
2.2 Específico	116
3. METODOLOGIA	117
3.1 Caracterização do estudo de caso.....	117
3.2 Fluxo de atividades do estudo de caso.....	120
3.3 Identificação das fontes de emissões de gases de efeito estufa do estudo de caso	122
3.4 Coleta dos dados.....	124
3.4.1 Emissões diretas.....	125
3.4.2 Emissões indiretas.....	126
3.5 Cálculo das emissões	127
3.5.1 Inventário florestal.....	129
3.5.1.1 Composição e diversidade Florística.....	130
3.5.1.2 Parâmetros fitossociológicos.....	131
3.5.1.3 Estatística do inventário florestal.....	132
3.5.1.4 Rendimento lenhoso	132
3.6 Neutralidade de carbono	133
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	135
4.1 Principais fontes de emissões de gases de efeito estufa.....	135
4.2 Panorama geral das emissões	136
4.3 Emissões por categoria	137
4.3.1 Emissões por combustão estacionária	138
4.3.2 Emissões por combustão móvel	140
4.3.3 Emissões fugitivas	143

4.3.4 Emissões pela mudança no uso do solo.....	144
4.3.4.1 Estatística do inventário florestal.....	144
4.3.4.2 Composição e diversidade florística.....	145
4.3.4.3 Parâmetros fitossociológicos.....	147
4.3.4.3.1 Estrutura horizontal.....	147
4.3.4.3.2 Estrutura vertical.....	150
4.3.4.3.3 Estrutura diamétrica.....	151
4.3.4.3.4 Rendimento lenhoso.....	152
4.3.4.4 Emissões pela remoção da biomassa acima do solo.....	155
4.3.5 Emissões pela compra de energia elétrica.....	156
4.3.6 Emissões por transporte e distribuição.....	158
4.3.7 Emissões por deslocamento casa-trabalho e por viagens a negócios.....	159
4.4 Neutralidade de carbono	160
5. CONCLUSÕES	164
CAPÍTULO 3.....	166
1. INTRODUÇÃO	169
2. OBJETIVOS.....	171
2.1 Geral	171
2.2 Específicos	171
3. METODOLOGIA	172
3.1 Identificação das fontes de emissão	172
3.2 Fatores de emissão	173
3.2.1 Fatores de emissão para combustão estacionária.....	174
3.2.2 Fatores de emissão para combustão móvel	175
3.2.3 Fatores de emissão para as emissões fugitivas	177
3.2.4 Fator de emissão para mudança no uso do solo	177
3.2.5 Fatores de emissão pela compra de energia elétrica	178
3.2.6 Fatores de emissão para o transporte e distribuição	179
3.3 Cálculo das emissões de gases de efeito estufa	180
3.3.1 Emissões por combustão estacionária e móvel.....	181
3.3.2 Emissões fugitivas	182
3.3.3 Emissões pela mudança no uso do solo.....	183
3.3.4 Emissões pela compra de energia elétrica	183
3.3.5 Emissões por transporte e distribuição	184

3.5.6 Sumarização das emissões	185
3.4 Emissões evitadas e neutralidade de carbono	186
3.5 Tecnologias utilizadas	187
3.6 Validação.....	190
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	192
4.1 Estrutura e funcionalidades gerais	192
4.2 Funcionalidades por aba	193
4.3 Estrutura de cálculo e lógica de funcionamento	197
4.3.1 Módulo: combustão estacionária	199
4.3.2 Módulo: combustão móvel	201
4.3.3 Módulo: fugitivas	203
4.3.4 Módulo: supressão vegetal (mudança no uso do solo)	204
4.3.5 Módulo: compra de energia elétrica	206
4.3.6 Módulo: transporte e distribuição (modais rodoviário e hidroviário)	207
4.3.7 Visualização e exportação dos resultados	211
4.4 Neutralidade de carbono	213
4.5 Validação dos resultados	215
4.5.1 Emissões de gases de efeito estufa	215
4.5.2 Emissões evitadas e neutralidade de carbono	218
4.6 Atualizações futuras e melhorias.....	220
5. CONCLUSÕES	224
3. CONCLUSÕES GERAIS	226
REFERÊNCIAS.....	228

LISTA DE FIGURAS

REFERENCIAL TEÓRICO

Figura 1 - Total diário da irradiação global horizontal (média anual) para o Brasil. .24	
Figura 2 -Tipos de escopos e categorias definidos pelo Programa Brasileiro GHG Protocol.38	

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Quantificação de usinas solares fotovoltaicas por Estado da região Nordeste do Brasil, classificadas por estágio de implantação: com construção não iniciada (PRE), em construção (INS) e em operação (OPE).49	
Figura 2 - Mapa de localização das usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação na região Nordeste do Brasil.50	
Figura 3 - Distribuição das usinas solares fotovoltaicas por bioma na região Nordeste do Brasil, considerando os estágios de implantação: em construção e em operação.51	
Figura 4 - Evolução da potência instalada em operação no Nordeste brasileiro.51	
Figura 5 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado da Bahia, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.53	
Figura 6 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado da Bahia durante o processo de licenciamento ambiental.....54	
Figura 7 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Ceará, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.....57	
Figura 8 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado do Ceará durante o processo de licenciamento ambiental.....57	
Figura 9 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado da Paraíba, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.....61	
Figura 10 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado da Paraíba durante o processo de licenciamento ambiental.....62	
Figura 11 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Pernambuco, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.64	
Figura 12 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado do Pernambuco durante o processo de licenciamento ambiental.....65	

Figura 13 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Piauí, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.	67
Figura 14 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Rio Grande do Norte, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.	69
Figura 15 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado do Rio Grande do Norte durante o processo de licenciamento ambiental.	70
Figura 16 - Porcentagem de estudos ambientais encontrados para usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação nos Estados da região Nordeste do Brasil.	73
Figura 17 - Estudos ambientais encontrados das usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação nos Estados do Nordeste, utilizados para a identificação e análise dos impactos ambientais.	74
Figura 18 - Impactos ambientais identificados nos estudos ambientais das usinas solares fotovoltaicas, englobando os meios físico, biótico e socioeconômico.	76
Figura 19 - Nuvem de palavras representando os fatores ambientais afetados pela atividade de supressão da vegetação, conforme identificados nos estudos analisados.	92
Figura 20 - Fluxograma com critérios propostos para definição do tipo de estudo ambiental aplicável a usinas solares fotovoltaicas, com base na necessidade de supressão de vegetação nativa, área total e localização em área ambientalmente sensível.	103
Figura 21 - Programas ambientais propostos como obrigatórios, com base na relação direta com impactos ambientais considerados certos ou altamente prováveis.	107

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Mapa de localização do Complexo Solar Santa Luzia, empreendimento da empresa Rio Alto Energias Renováveis.	117
Figura 2 - Classificação das áreas utilizadas pela UFV STL 9. Em destaque: traçado em vermelho representa a área total de intervenção para implantação da usina; polígono em azul, a área efetiva da UFV; polígono em laranja, a área destinada à recuperação ambiental; áreas sem polígono correspondem às zonas de uso permanente da UFV.	119
Figura 3 – Fluxograma das etapas de implantação da usina solar fotovoltaica do estudo de caso, organizado em ordem cronológica. As fases de pré-instalação, operação e descomissionamento estão representadas, de forma indicativa.	121

Figura 4 - Questionário básico de mapeamento aplicado à equipe técnica da empresa Rio Alto Energias Renováveis para identificação e classificação das fontes de emissão de gases de efeito estufa no estudo de caso.	122
Figura 5 - Categorias de fontes de emissões de gases de efeito estufa utilizadas em inventários corporativos, conforme o Programa Brasileiro GHG Protocol.	123
Figura 6 - Informações coletadas para o cálculo das emissões diretas de gases de efeito estufa do estudo de caso.	126
Figura 7 - Informações coletadas para o cálculo das emissões indiretas de gases de efeito estufa do estudo de caso.	127
Figura 8 - Categorias de fontes de emissões de gases de efeito estufa: categorias em amarelo representam aquelas com potencial de emissão associadas à cadeia de valor da energia solar fotovoltaica; categorias em azul não se aplicam ao contexto analisado.	135
Figura 9 - Classificação das fontes de emissões de gases de efeito estufa controladas pela empresa do estudo de caso, organizadas conforme os Escopos 1, 2 e 3 do Programa Brasileiro GHG Protocol.	136
Figura 10 - Distribuição das emissões totais de gases de efeito estufa da UFV STL 9 durante a etapa de construção, classificadas por escopo segundo o Programa Brasileiro GHG Protocol.	137
Figura 11 - Distribuição das emissões totais de CO ₂ e por categoria de fonte emissora, estimadas para a etapa de construção da UFV STL 9.	138
Figura 12 - Distribuição do consumo de óleo diesel comercial por fontes estacionárias durante a etapa de construção da UFV STL 9.	139
Figura 13 - Distribuição do consumo de óleo diesel comercial por fontes móveis durante a etapa de construção da UFV STL 9.	141
Figura 14 - Resumo da quantidade e tempo de operação dos principais veículos e equipamentos utilizados na construção da UFV STL 9 (caminhão basculante, escavadeira hidráulica e motoniveladora, respectivamente), organizados por tipo de atividade.	142
Figura 15 - Espécies com maiores valores de importância do inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	149
Figura 16 - Classes de altura dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado para implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	150
Figura 17 - Classes diamétricas dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado para implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	151
Figura 18 - Volume de madeira e emissões totais de dióxido de carbono por espécie estimados para a UFV STL 9.	156

Figura 19 - Representação do número de viagens realizadas e das respectivas cargas transportadas por tipo de material utilizado na construção da UFV STL 9, discriminados por modal logístico (rodoviário e hidroviário)	158
Figura 20 - Estimativa da neutralização das emissões de gases de efeito estufa do estudo de caso, considerando as emissões geradas durante a fase de construção e as emissões evitadas por meio da geração de energia fotovoltaica a partir do início da operação comercial (COD).....	161
Figura 21 - Estimativa da geração de energia elétrica e das emissões evitadas de gases de efeito estufa ao longo dos 25 anos de vida útil da UFV STL 9, considerando a taxa anual de degradação de 0,4% nos módulos fotovoltaicos.	162

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Categorias e principais fontes de emissão de gases de efeito estufa aplicáveis a empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica.	173
Figura 2 - Fluxograma ilustrativo da estrutura tecnológica da plataforma SunMetricsC, com destaque para os componentes de entrada, interface, processamento, visualização e geração de relatórios.....	189
Figura 3 - Interface inicial da plataforma SunMetricsC.	193
Figura 4 - Interface da aba <i>Sobre</i> da plataforma SunMetricsC.....	195
Figura 5 -Interface da aba <i>Tutorial</i> da plataforma SunMetricsC.	196
Figura 6 – Interface da aba <i>Contato</i> da plataforma SunMetricsC.....	196
Figura 7 - Interface inicial da área de cálculo da plataforma SunMetricsC, destacando os campos de informações do projeto e os módulos de navegação lateral por categoria de emissão.	197
Figura 8 - Interface destacando os módulos de navegação lateral da plataforma SunMetricsC.....	198
Figura 9 - Interface destacando o botão <i>Adicionar fonte</i> , presente em todas as categorias de cálculo de emissões de gases de efeito estufa da plataforma SunMetricsC.....	199
Figura 10 – Interface do módulo de <i>Combustão Estacionária</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados.	200
Figura 11 - Interface do módulo de <i>Combustão Estacionária</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os comandos de cálculo e visualização de resultados por fonte adicionada.	201
Figura 12 - Interface do módulo de <i>Combustão Móvel</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados.....	202
Figura 13 - Interface do módulo de <i>Combustão Móvel</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os comandos de cálculo e visualização de resultados por fonte adicionada.....	203

Figura 14 - Interface do módulo de <i>Emissões Fugitivas</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados, os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.	204
Figura 15 - Interface do módulo de <i>Supressão Vegetal</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados, os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.	205
Figura 16 - Interface do módulo de <i>Energia Elétrica</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados, os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.	207
Figura 17 - Interface do módulo de <i>Transporte e Distribuição</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados do modal rodoviário.....	208
Figura 18 - Interface do módulo de <i>Transporte e Distribuição</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para adição de fonte e campos de entrada de dados do modal hidroviário.	209
Figura 19 - Interface do módulo de <i>Transporte e Distribuição</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.	210
Figura 20 - Interface da aba <i>Resumo</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para as emissões totais de gases de efeito estufa estimadas e o gráfico de barras com os valores consolidados por categoria.....	211
Figura 21 - Interface da aba <i>Por Categoria</i> , com a listagem consolidada das emissões totais de gases de efeito estufa por categoria.	212
Figura 22 - Interface do módulo <i>Neutralidade de Carbono</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados.	213
Figura 23 - Interface do módulo <i>Neutralidade de Carbono</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para com destaque para os comandos de cálculo e a visualização de resultados.	214
Figura 24 - Interface da aba <i>Neutralidade de Carbono</i> da plataforma SunMetricsC, com destaque para o gráfico de linhas com a projeção da neutralidade das emissões de gases de efeito estufa.	214
Figura 25 - Estimativa de geração de energia elétrica, emissões evitadas de gases de efeito estufa e tempo projetado para neutralidade de carbono, geradas pela plataforma SunMetricsC para a UFV STL 9, considerando dois cenários.....	219
Figura 26 - Interface da aba <i>Login</i> da plataforma SunMetricsC, em desenvolvimento.	220
Figura 27 - Interface inicial da área de cálculo da plataforma SunMetricsC, com destaque para a funcionalidade de importação de dados, em desenvolvimento. ...	221
Figura 28 - Interface inicial da área de cálculo da plataforma SunMetricsC, com destaque para o módulo <i>Ver Dashboard de Emissões</i> , em desenvolvimento.....	222

LISTA DE TABELAS

REFERENCIAL TEORICO

Tabela 1 - Etapas do Licenciamento Ambiental e características específicas.	32
---	----

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Tipologias e portes dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução CEPRAM nº 10/2018.	52
Tabela 2 - Tipologias e portes dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com o Decreto nº 14.024/2012.	55
Tabela 3 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução COEMA nº 06/2018.	58
Tabela 4 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Portaria SEMA nº 74 de 12/06/2013.	60
Tabela 5 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Norma Administrativa nº 101/2021.	61
Tabela 6 - Tipologias e portes dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução CONSEMA nº 46/2022.	67
Tabela 7 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução CONEMA nº 04/2006 (e suas alterações, versão novembro/2014).	71
Tabela 8 - Tipologia funcional das medidas ambientais utilizadas neste estudo, com respectivas siglas, codificação por cores e descrições. Esta tabela serve como orientação para a categorização aplicada no Quadro 2 , que apresenta as medidas ambientais propostas por impacto identificado.	95
Tabela 9 - Síntese dos fatores de enquadramento utilizados por órgãos estaduais de meio ambiente no Nordeste brasileiro para definição do tipo de estudo ambiental exigido para usinas solares fotovoltaicas.	101
Tabela 10 - Impactos ambientais propostos para avaliação obrigatória em usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada.	104

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Amplitude de classes de altura (m) em seus respectivos estratos.	131
Tabela 2 - Classes diamétricas e suas respectivas amplitudes.	132
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos do inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	144

Tabela 4 - Composição florística do inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	145
Tabela 5 - Parâmetros fitossociológicos da área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	148
Tabela 6 - Rendimento lenhoso por parcela dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	152
Tabela 7 - Rendimento lenhoso por espécies dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.	154
Tabela 8 - Volume total estimado das espécies registradas no inventário florestal do estudo de caso, com dados de porcentagem de carbono e densidade básica utilizados no cálculo das emissões de dióxido de carbono equivalente.	155
Tabela 9 - Emissões de dióxido de carbono provenientes da compra de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional.	157

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Composição dos combustíveis utilizados na combustão estacionária.	174
Tabela 2 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis e biocombustíveis em fontes estacionárias.	175
Tabela 3 - Composição dos combustíveis utilizados na combustão móvel.	176
Tabela 4 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis e biocombustíveis em fontes móveis.	176
Tabela 5 - Fatores de emissão por utilização de gases com potencial de emissão fugitiva.	177
Tabela 6 - Fatores de emissão por utilização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (2014 a 2023).	178
Tabela 7 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis e biocombustíveis em fontes rodoviárias.	179
Tabela 8 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis em fontes hidroviárias.	180
Tabela 9 - Emissões de gases de efeito estufa (tCO ₂ e) por categoria, obtidas pela Ferramenta GHG Protocol e pela plataforma SunMetricsC.	216
Tabela 10 - Estatística descritiva das emissões de gases de efeito estufa (tCO ₂ e) obtidas pela Ferramenta GHG Protocol e pela plataforma SunMetricsC.	217
Tabela 11 - Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk aplicado aos conjuntos de dados de emissão de gases de efeito estufa obtidos pela Ferramenta GHG Protocol e pela plataforma SunMetricsC.	217

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

Quadro 1 - Classificação dos impactos ambientais identificados nos estudos analisados, com base em sua frequência de ocorrência, e respectivas ações ou atividades geradoras.....	91
Quadro 2 - Medidas ambientais mitigadoras e potencializadoras propostas no presente estudo, com base nos impactos ambientais identificados na análise dos estudos ambientais.....	96

1. INTRODUÇÃO GERAL

A geração de energia elétrica é fundamental para a manutenção e o desenvolvimento da sociedade moderna. À medida que a demanda global por energia cresce e os efeitos das mudanças climáticas se tornam cada vez mais evidentes, intensifica-se a urgência de transformar a matriz energética global. Nesse contexto, as fontes limpas e renováveis emergem como a melhor opção para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Dentre as fontes renováveis existentes, o uso da energia solar fotovoltaica como fonte de eletricidade vem crescendo consideravelmente no Brasil e no mundo. O descobrimento da energia fotovoltaica, data há mais de 100 anos, mas a sua utilização como energia renovável em grande escala vem se verificando nos últimos 15 anos. No Brasil usinas fotovoltaicas que geram eletricidade em escala comercial iniciaram sua instalação em 2011 (BECQUEREL, 1839; GOETZBERGER; HEBLING; SCHOCK, 2003; ANEEL, 2008; SAINI; MEENA; MEENA, 2017). Portanto, é uma tecnologia recente e não há registros de longo prazo.

Avanços nas tecnologias solares fotovoltaicas transformaram significativamente o cenário da energia renovável (OGUNDIPE; OKWANDU; ABDULWAHEED, 2024). As melhorias na eficiência vêm elevando a produtividade dos empreendimentos a cada dia, proporcionando uma menor utilização de área territorial para geração da mesma quantidade de energia elétrica. A geração de energia solar fotovoltaica centralizada tem assumido papel central na matriz energética, promovendo benefícios ambientais e socioeconômicos, mas também apresentando desafios e impactos que precisam ser geridos adequadamente.

A expansão de empreendimentos de energia solar fotovoltaica requer uma análise minuciosa dos potenciais impactos ambientais associados a cada fase do ciclo de vida dos projetos, incluindo planejamento, construção, operação e descomissionamento. A identificação e compreensão dos desafios de longo prazo decorrentes da adoção em larga escala dessa fonte renovável, com destaque para os impactos sobre o uso da terra e a perda de biodiversidade (CARDOSO *et al.*, 2024;

PEREIRA; CORIA, 2022), são essenciais para garantir o desenvolvimento sustentável da energia solar fotovoltaica.

É importante destacar que a sociedade exige atualmente não apenas que a energia elétrica seja proveniente de uma fonte renovável, mas que os empreendimentos sigam desde sua implantação diretrizes socioambientais corretas. Para tanto, é de extrema importância regulamentações específicas de acordo com o tipo de empreendimento, e que todo o processo do licenciamento seja bem estruturado, de forma a minimizar ou solucionar os impactos negativos. A conformidade com as normativas é essencial para assegurar que os empreendimentos sejam conduzidos de maneira sustentável, respeitando as particularidades ambientais e sociais de cada localidade (GAIO; ROSNER; FERREIRA, 2023; EPE, 2024).

Ferramentas para o cálculo de emissões de gases de efeito estufa, como do *GHG Protocol*, desempenham um papel crucial na promoção da sustentabilidade ambiental, especialmente em setores estratégicos como o fotovoltaico. Essas ferramentas permitem a quantificação padronizada e detalhada das emissões associadas a diferentes etapas do ciclo de vida de um empreendimento, desde a instalação até a operação (MONZONI *et al.*, 2008; ALVES, 2018; WRI BRASIL, 2024).

No setor fotovoltaico, o uso de uma ferramenta adaptada às especificidades dessa indústria pode auxiliar empresas e órgãos ambientais no monitoramento de emissões, no desenvolvimento de estratégias de mitigação e na avaliação da eficiência ambiental dos projetos. Além disso, de acordo com Keller *et al.* (2014), tais ferramentas promovem maior transparência e conformidade com as exigências regulatórias, facilitando a integração das metas de neutralidade de carbono e sustentabilidade nos processos decisórios.

Diante do exposto, o objetivo geral desta tese é analisar a governança climática aplicada às usinas solares fotovoltaicas no Nordeste brasileiro, com foco na avaliação dos impactos ambientais, na quantificação e mitigação das emissões de gases de efeito estufa e no desenvolvimento da plataforma SunMetricsC como ferramenta de apoio à tomada de decisão sustentável.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico e evolução das energias renováveis

As energias renováveis estão em ascensão, com o principal objetivo de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e combater os impactos das mudanças climáticas (AZEVEDO; CANDEIAS; TIBA, 2017). Nesse contexto, a energia fotovoltaica desempenha um papel fundamental na diminuição das emissões de gases do efeito estufa e no uso eficiente da água contribuindo para a redução do aquecimento global e consumo de recursos hídricos (WANG; FAN, 2021).

O efeito fotovoltaico foi identificado pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839 e a primeira célula fotovoltaica foi desenvolvida por Charles Fritts em 1883. Essa técnica possibilitou a conversão da energia dos fótons presentes na luz solar (irradiação) em eletricidade por meio de células solares ou fotovoltaicas, geralmente fabricadas a partir de diversos materiais semicondutores, com destaque para o silício (NASCIMENTO, 2015).

A geração de eletricidade a partir da luz solar tem apresentado um crescimento exponencial significativo, como observado no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018), alcançando um total global de 707 GW em 2020, conforme divulgado pela International Renewable Energy Agency (IRENA) em 2021. As previsões para a produção de eletricidade a partir de painéis solares até 2025 são ainda mais notáveis, com estimativas indicando que poderá atingir cerca de 1.513 GW em escala mundial, conforme apontado pela International Energy Agency (IEA, 2020).

No Brasil, esse setor segue a tendência global, crescendo de 4,7 GW para 14,4 GW no período de 2019 a 2021. Em 2022, a capacidade instalada total no país atingiu 25,4 GW, com aproximadamente 29% proveniente da geração centralizada que são as grandes usinas de geração de energia. Desta capacidade 71% são consideradas distribuída pois vem de sistemas de geração de energia menores e dispersos, como painéis solares em telhados de residências ou pequenas usinas locais (ABSOLAR, 2023a; ANEEL, 2023).

Apesar desses números ainda serem modestos em comparação com outras fontes de energia, a energia fotovoltaica tem se disseminado rapidamente e apresentado uma ampla variedade de aplicações, indicando que provavelmente se tornará uma das fontes de energia mais utilizadas no futuro (OLIVEIRA; ARAÚJO FILHO, 2021).

O Brasil possui um excelente índice de radiação solar, especialmente na região Nordeste do País (MARQUES *et al.*, 2009), conforme observa-se no mapa do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017). De acordo com o estudo desenvolvido por Silva (2023), o Nordeste é a região que apresenta o maior potencial solar, com um valor médio diário de irradiação global horizontal total de 5,49 kWh/m² (Figura 1).

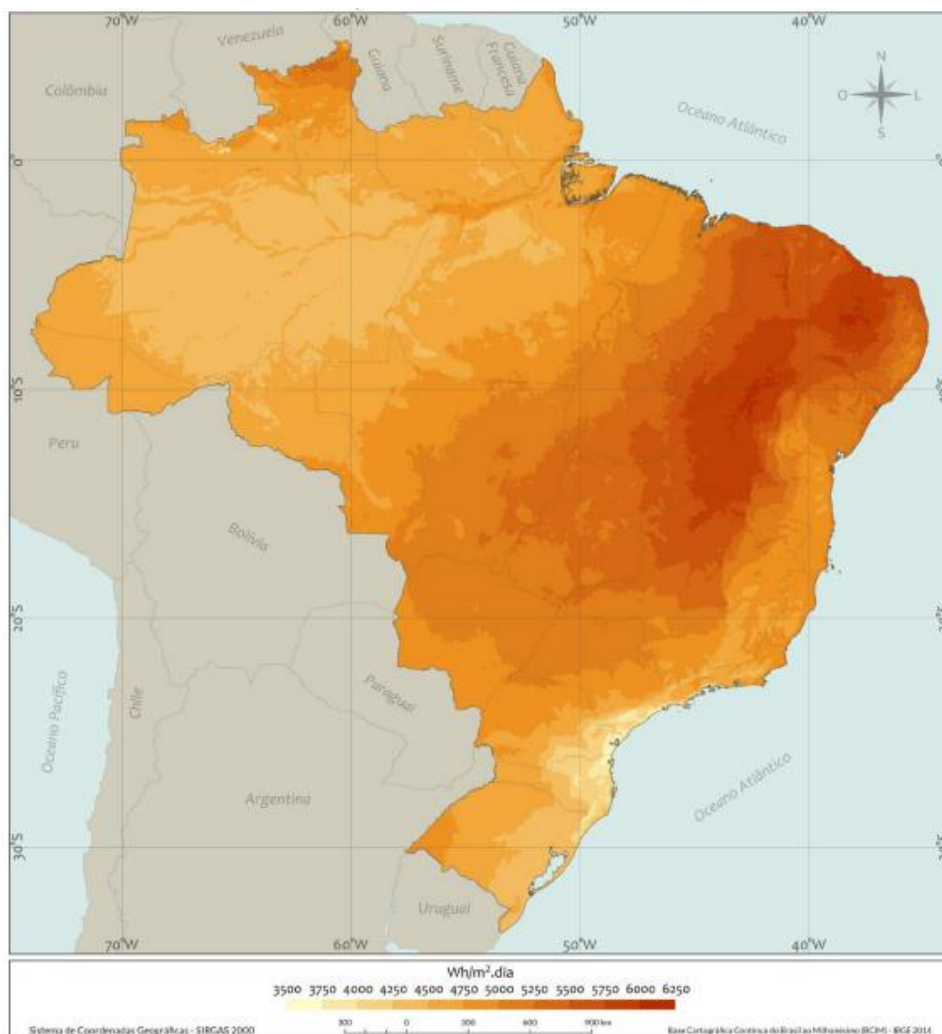


Figura 1 - Total diário da irradiação global horizontal (média anual) para o Brasil.

Fonte: Pereira *et al.*, (2017).

A pesquisa de Lima (2021) mostrou que cerca de 45,71% do território na região Nordeste apresenta condições de cobertura do solo totalmente adequadas para a instalação de usinas fotovoltaicas, pois os terrenos são predominantemente planos ou levemente ondulados. Lima (2021) também mostra que há elevada incidência de radiação solar ao longo do ano e a maioria da vegetação é espaçada (baixa) de médio e pequeno porte. Dantas e Pompermayer (2018) afirmam que dentre as regiões, o Nordeste é a que apresenta melhor viabilidade econômica, pois tem condições edafoclimáticas e de radiação propícias para a implantação do sistema.

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023), o Brasil encerrou agosto de 2023 com 10,4 GW de capacidade instalada na geração solar centralizada, 5,27% da potência outorgada total do país. Dos 10 Estados com maior potência outorgada em operação no país, 6 estão localizados na região Nordeste, destacando-se a Bahia com 2,05 GW, o Piauí com 1,46 GW e Ceará com 0,81 GW.

No entanto, atingir a potência outorgada total do País para a energia solar (em agosto de 2023 chegou-se a 5,27% da potência outorgada total de 195,6 GW), ainda representa um desafio significativo, devido aos custos elevados associados à implementação dessa tecnologia, o que a torna menos competitiva em relação a outras fontes (MOREIRA JÚNIOR; SOUZA, 2020; PINHEIRO *et al.*, 2020; ANEEL, 2023).

De acordo com Franco (2014), é crucial incorporar cada vez mais a prática da sustentabilidade no setor energético, dado seu papel fundamental no processo de desenvolvimento. Entretanto, é importante notar que ainda existe uma forte dependência e exploração de fontes de energia não renováveis nesse setor, o que o torna propenso a impactos ambientais significativos. Portanto, é imperativo que energia e sustentabilidade avancem juntas, garantindo uma exploração equilibrada e a adoção de novas tecnologias que tenham um impacto cada vez menor no meio ambiente.

Especialmente na região do Nordeste, investir na implementação e diversificação de fontes sustentáveis de energia desempenha um papel significativo na redução substancial da dependência da energia hídrica. Além disso, tem um

impacto positivo considerável nos custos relacionados a geração, distribuição e consumo de energia, ao mesmo tempo em que beneficia o meio ambiente e a estrutura social (ANDRADE, 2012).

Nesse contexto, a região Nordeste possui um notável potencial como alternativa para complementar a matriz energética. Isso se deve à sua localização geográfica que oferece condições de irradiação solar favoráveis para o desenvolvimento de fontes de energia alternativas, como a solar fotovoltaica e a eólica. Essas fontes têm a capacidade de fornecer a segurança e a suficiência energética necessárias para promover o desenvolvimento sustentável (SILVA; ALVES; RAMALHO, 2020).

É importante destacar que a produção de energia fotovoltaica é uma das opções mais confiáveis para a obtenção de energia elétrica, pois é inesgotável e não gera impactos consideráveis durante a operação. Nesse sentido, o governo federal, por meio da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), elaborou o documento "Plano Nacional de Energia 2030", publicado em 2008. Este documento reúne uma compilação de estudos e estratégias destinados a aprimorar a produção e a distribuição de energia no Brasil, estabelecendo objetivos e metas a serem alcançados até o ano de 2030.

Diante disso, é fundamental que o governo persista em investir em incentivos e na educação da população, esclarecendo as principais vantagens e desvantagens, bem como os benefícios associados ao uso de uma energia limpa, renovável e autossuficiente. Isso é essencial para garantir o contínuo crescimento da energia fotovoltaica na matriz energética brasileira.

2.2 Licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas

2.2.1 Legislação no âmbito federal e estadual

As usinas solares fotovoltaicas, denominadas "UFVs", como qualquer atividade humana, causam interferências no meio ambiente, portanto devem ser passíveis de licenciamento ambiental. Borges Neto *et al.* (2020) evidenciaram que diversos

Estados da região Nordeste com potencial para a utilização de sistemas fotovoltaicos ainda não possuem uma legislação clara sobre o assunto.

Os projetos de Geração Centralizada (GC) de energia solar fotovoltaica (acima de 5 MW) estão sujeitos à autorização do Ministério de Minas e Energia (MME) ou da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a introdução desses projetos no país foi viabilizada por incentivos regulatórios, como o desconto de 100% na Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão e de Distribuição (TUST/TUSD) e organizados leilões federais exclusivos para essa fonte.

De acordo com a ABSOLAR (2023b) a energia gerada pela GC pode ser comercializada em dois ambientes de contratação: o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR). No ACL, geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais compram e vendem energia em negociação aberta entre compradores e vendedores com o preço acordado diretamente entre as partes. Já no ACR a energia é comercializada via leilões oficiais realizados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

Em relação à Geração Distribuída (GD), a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, estabeleceu as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), permitindo aos consumidores injetarem excedentes de energia na rede e receber créditos pela energia gerada (ANEEL, 2012). Posteriormente, a Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 promoveu aprimoramentos, alterando, entre outros aspectos, os limites de potência instalada e as modalidades de participação no sistema (ANEEL, 2015).

Ambas as resoluções foram revogadas pela Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023, que trouxe mudanças significativas, como a redução dos prazos para concessão de acesso e a padronização dos formulários de solicitação junto às distribuidoras (ANEEL, 2023). Atualmente, essa resolução define como microgeração sistemas com potência instalada de até 75 kW, e como minigeração aqueles com potência superior a 75 kW e igual ou inferior a 3 MW ou 5 MW, conforme a situação.

Nesse contexto, a Associação Brasileira de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ABRAPCH) enfatizou, em 2022, a importância da adoção de práticas que

impulsionam o desenvolvimento sustentável, bem como políticas ambientais que reforcem a competitividade sem comprometer o crescimento econômico. Esse enfoque visa fortalecer a competitividade e, simultaneamente, busca aprimorar continuamente as condições socioeconômicas. Essa abordagem combinada é uma ferramenta poderosa para impulsionar o processo de desenvolvimento sustentável.

O licenciamento ambiental por sua vez representa a ferramenta central do Estado na proteção do meio ambiente, garantindo que o desenvolvimento ocorra de maneira sustentável. Esse processo administrativo envolve a concessão de licenças pelo órgão ambiental para a localização, instalação, expansão, alteração e operação de empreendimentos ou atividades que utilizam recursos naturais e que têm o potencial de poluir o meio ambiente ou causar danos ambientais (BRASIL, 1997).

No âmbito federal, a Lei nº 6.938/1981, que estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente, serve como a base legal para o processo de licenciamento ambiental. A lei estabelece os princípios e as diretrizes gerais para a proteção do meio ambiente e a necessidade de licenciamento para atividades potencialmente poluidoras ou degradadoras (BRASIL, 1981). Esta lei também é responsável pela descrição do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que reúne os órgãos e instituições em nível federal, estadual, do Distrito Federal e municipal, juntamente com as fundações públicas, com a responsabilidade compartilhada de proteger e aprimorar a qualidade do ambiente (REIS, 2015).

Dentro do contexto, existe a Resolução CONAMA nº 001/1986 que regulamenta o licenciamento ambiental no Brasil. Esta determina as atividades que são passíveis de Estudo de Impacto Ambiental com respectivo relatório (EIA/RIMA), como por exemplo, usinas de geração de eletricidade com capacidade maior que 10MW, qualquer que seja a fonte de energia primária (BRASIL, 1986).

Buscando agilizar o processo para empreendimentos de pequeno porte, foi elaborada a CONAMA nº 279/2001 que é direcionada para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, tais como: sistemas de transmissão de energia elétrica (linhas de transmissão e subestações); usinas hidrelétrica, termoeletricidade e eólicas; e outras fontes alternativas de energia (BRASIL, 2001).

De acordo com a Lei nº 6.938/1981 responsável por estabelecer a competência de cada órgão dentro do SISNAMA, a responsabilidade pelo licenciamento recai geralmente sobre os órgãos seccionais, ou seja, sobre o Estado. A Resolução CONAMA nº 237/1997 complementa essa definição, especificando que compete aos órgãos estaduais o licenciamento de atividades ou empreendimentos situados em dois ou mais municípios ou que causem impactos diretos que ultrapassem os limites de um ou mais municípios (BRASIL, 1997).

Cada Estado e o Distrito Federal têm a autoridade para regulamentar as particularidades de seu direito ambiental, e isso é realizado pelas Comissões Organizadoras, observando os princípios e preceitos estabelecidos no Regulamento Nacional (REIS, 2015). Isso significa que as normas e procedimentos podem variar de Estado para Estado, adaptando-se às necessidades e particularidades de cada região.

No âmbito municipal, a autorização para legislar segue um processo semelhante, ou seja, é complementar às leis federais e estaduais, respeitando a hierarquia legal estabelecida no país (REIS, 2015). Vale ressaltar que o licenciamento ambiental não é feito por mais de um órgão, podendo haver apenas consulta dos demais.

Nesse sentido, Oliveira (2022) relata que às legislações vigentes nos diversos Estados do Brasil, acarretam a ausência de um consenso quanto a abordagem de licenciamento padronizada. Para o autor, isso decorre das diferenças regionais e das distintas perspectivas de cada unidade federativa em relação aos níveis de impacto ambiental decorrentes dessa atividade.

O autor, destaca ainda consideráveis disparidades nos procedimentos de licenciamento ambiental entre Estados, tendo algumas federações processos notavelmente mais abrangentes com estudos ambientais detalhados, em contraste com Estados onde o licenciamento ambiental é conduzido por meio de procedimentos mais simplificados ou até mesmo isentos.

2.2.2 Tipos de estudos ambientais para licenciamento

A Resolução CONAMA nº 237/1997 identifica no seu Anexo I uma lista de atividades consideradas potencialmente poluidoras que requerem licenciamento ambiental. No entanto, em casos de empreendimentos que não apresentem impactos substanciais, podem ser exigidos estudos mais simplificados, conforme previsto no artigo 12º da Resolução 237/1997 (BRASIL, 1997).

Para empreendimentos com baixo potencial de impacto ambiental, o processo de licenciamento segue uma abordagem simplificada, devendo apresentar um Relatório Ambiental Simplificado (RAS) para obtenção das licenças e/ou autorizações. No caso de empreendimentos que possam causar impactos ambientais significativos, é necessário realizar um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) juntamente com o seu respectivo Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA).

No geral, os estudos ambientais necessários para a obtenção da Licença Prévia seguem a seguinte estrutura básica: Informações Gerais; Justificativa; Estudos de Alternativas; Aspectos Legais; Caracterização do Empreendimento; Áreas de Influência; Diagnóstico Ambiental; Análise dos Impactos Ambientais; Medidas Mitigadoras e Programas de Monitoramento. Esses estudos são essenciais para embasar a tomada de decisão dos órgãos ambientais e garantir a conformidade do empreendimento com as normas vigentes (PERAZZOLI, 2017).

Os estudos e relatórios de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) desempenham um papel crucial no processo de licenciamento ambiental, variando de acordo com a fase do projeto. A apresentação desses estudos ambientais ao órgão competente é um requisito obrigatório, e eles devem aderir às diretrizes estabelecidas pela legislação aplicável, como a Lei Federal nº 6.938/1981, o Decreto Federal nº 99.274/1990 e as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a saber, as Resoluções nº 01/1986, nº 237/1997 e nº 279/2001. Além disso, quando aplicável, a legislação estadual também deve ser observada (BRASIL, 1986; 1987; 1997; 2001).

Ressalta-se que para obtenção da autorização ambiental para realização da atividade de supressão vegetal, o empreendimento deve realizar durante o processo

de Licença de Instalação o Inventário Florestal da área objeto de supressão. O inventário deve ser realizado por profissional habilitado, abranger toda a área e atender os critérios de amostragem. Em conjunto os estudos relacionados ao inventário florestal, o empreendimento deve apresentar também o plano/projeto de supressão vegetal, que deve detalhar os métodos e técnicas que serão aplicados durante a supressão, além do plano de reposição florestal, que contém as medidas que serão adotadas para compensar o volume lenhoso a ser explorado.

Após o estudo ambiental na fase de Licença Prévia, o empreendimento, para obtenção de Licença de Instalação, deverá entregar ao órgão competente o Plano/Projeto Básico Ambiental (PBA), que contemplará todos os programas ambientais que serão desenvolvidos durante a construção do empreendimento. Para elaboração do PBA, é fundamental que o estudo de impacto ambiental seja bem desenvolvido, pois durante o estudo, os impactos ambientais são identificados e analisados, e assim, com base na influência do empreendimento nos meios físico, biótico e antrópico os programas são elaborados.

2.2.3 Licenças e autorizações necessárias

Em geral para realizar o licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas e de diversos empreendimentos no Brasil, é necessário obter três licenças distintas enumeradas no artigo 8º da Resolução CONAMA nº 237/1997: uma para a fase de planejamento do empreendimento, conhecida como Licença Prévia (LP); outra para a etapa de construção, denominada Licença de Instalação (LI); e, por fim, uma terceira licença para a operação, chamada Licença de Operação (LO), conforme exemplificado na **Tabela 1** (BRASIL, 1997).

Tabela 1 - Etapas do Licenciamento Ambiental e características específicas.

TIPO DE LICENÇA	LICENÇA PRÉVIA	LICENÇA DE INSTALAÇÃO	LICENÇA DE OPERAÇÃO
Objetivo	Aprova a localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental	Autoriza a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados	Autoriza a operação da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento das condicionantes das licenças anteriores
Prazo mínimo de vigência	Estabelecido pelo cronograma do projeto apresentado	De acordo com cronograma de instalação da atividade	4 anos
Prazo máximo de vigência	Não superior a 5 anos	Não superior a 6 anos	10 anos
Estudos necessários (empreendimentos de alto potencial poluidor)	EIA/RIMA - Estudo e Relatório de Impacto Ambiental	PBA - Plano Básico Ambiental	Relatórios de execução do PBA
Estudos necessários (empreendimentos de baixo potencial poluidor)	RAS - Relatório Ambiental Simplificado	PCA - Plano de Controle Ambiental	Relatórios de execução do PCA

Nota: As licenças ambientais poderão ser expedidas isolada ou sucessivamente, de acordo com a natureza, características e fase do empreendimento ou atividade.

Fonte: Perazzoli (2017) adaptado da Resolução CONAMA nº 237/1997.

Os prazos de vigência das licenças citadas, conforme determinados pela Resolução CONAMA nº 237/1997, tem seus limites definidos pelo órgão ambiental que possui a responsabilidade de estabelecer a duração de cada licença com base nas condições das solicitações.

No caso da Licença Prévia, a avaliação leva em consideração o cronograma estabelecido para a elaboração de todos os elementos relacionados ao empreendimento ou atividade. Já na Licença de Instalação, o prazo é determinado com base no cronograma de instalação do empreendimento ou atividade (BRASIL, 1997). Quando se trata da Licença de Operação, a análise considera os planos de controle ambiental como parâmetro para a definição da sua validade.

Com a obtenção da Licença de Instalação, o empreendedor assume a responsabilidade de seguir o planejamento e cronograma estipulados na Licença Prévia. O não cumprimento desse prazo resultará na perda de validade da Licença de Instalação, a menos que o empreendedor apresente uma justificativa e solicite uma prorrogação.

Ressalta-se que durante a fase de construção, além da Licença de Instalação, empreendimentos de energia fotovoltaica devem obter autorização para suprimir a vegetação presente na área. Esses empreendimentos de grande porte suprimem áreas extensas e, portanto, deve solicitar ao órgão ambiental competente a Autorização para Uso Alternativo do Solo ou a Autorização para Supressão Vegetal. Em casos que seja necessário o corte de poucas árvores, o empreendedor pode solicitar uma Autorização para Corte de Árvores Isoladas.

Alinhada a atividade de supressão vegetal, alguns órgãos ambientais exigem a obtenção da autorização para o manejo de fauna silvestre (levantamento, monitoramento, salvamento, resgate e destinação). Esta autorização permite que os biólogos e/ou veterinários manejem os animais silvestres durante a supressão e realoquem para uma área segura. No âmbito federal, tais exigências estão previstas principalmente na Instrução Normativa IBAMA nº 146/2007 e na Instrução Normativa IBAMA nº 08/2017, fundamentadas na Lei Federal nº 5.197/1967 (Lei de Proteção à Fauna).

Durante a fase de implementação, é incumbência do empreendedor obter a Licença de Operação, que só será concedida se todas as condições estipuladas na Licença de Instalação forem integralmente atendidas, de acordo com as exigências do órgão ambiental responsável. Nesta fase o empreendedor deve apresentar o Relatório de Cumprimento de Condicionantes, com a respectiva documentação comprobatória.

Os prazos para a emissão das licenças podem variar de acordo com o órgão ambiental, pois leva em consideração a demanda de processos em trâmite no órgão. É importante lembrar que qualquer complementação requerida pelo órgão ambiental durante o processo deve ser apresentada antes da emissão da licença ambiental.

2.3 Impactos ambientais

Embora a energia solar fotovoltaica seja amplamente reconhecida como uma das fontes mais promissoras de energia renovável, sua implantação em larga escala impõe desafios ambientais que não podem ser negligenciados. A literatura especializada aponta que, como qualquer infraestrutura de geração de energia, as usinas solares acarretam alterações nos sistemas naturais e sociais, cujas características, magnitude e significância dependem de múltiplas variáveis relacionadas ao território, à tecnologia empregada e à fase do empreendimento (TURNERY; FTHENAKIS, 2011).

Os impactos associados a esse tipo de empreendimento podem ocorrer em todas as fases do seu ciclo de vida - planejamento, instalação, operação e descomissionamento - e se manifestam sobre os meios físico, biótico e socioeconômico. Do ponto de vista teórico, esses impactos são classificados segundo critérios como a duração (temporários ou permanentes), a abrangência (locais, regionais ou globais), a natureza (positiva ou negativa), a reversibilidade e o grau de cumulatividade. Em projetos de energia renovável, os impactos cumulativos e sinérgicos vêm ganhando atenção crescente, dada a expansão territorial simultânea de empreendimentos e a carência de mecanismos de avaliação integrada.

A implantação de usinas fotovoltaicas centralizadas, em especial, impõe a ocupação de áreas extensas, com consequentes exigências de supressão vegetal, movimentação de solo, abertura de vias de acesso e instalação de estruturas físicas. Embora essas alterações sejam muitas vezes consideradas de “baixo impacto” por classificações normativas simplificadas, estudos recentes indicam que os efeitos podem ser substanciais em termos de degradação do solo, fragmentação de habitats e modificações em dinâmicas socioambientais locais (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015; BOŠNJAKOVIC *et al.*, 2023).

Outra dimensão crítica nos debates teóricos é a qualidade dos instrumentos de avaliação ambiental utilizados nos processos de licenciamento. A literatura destaca que o uso recorrente de estudos ambientais simplificados, sem a devida análise de

impactos indiretos e cumulativos, pode gerar subdimensionamento dos efeitos reais dos empreendimentos, além de dificultar a proposição de medidas eficazes de mitigação, compensação e monitoramento (HERNANDEZ *et al.*, 2014). Esse cenário é agravado em contextos de alta sensibilidade ecológica e sociocultural, como ocorre em parte dos territórios do semiárido brasileiro.

Ademais, o avanço tecnológico contínuo dos sistemas fotovoltaicos gera novos desafios para o dimensionamento dos impactos, tanto em termos espaciais quanto operacionais. A bibliografia científica aponta a necessidade de revisar os paradigmas tradicionais de avaliação ambiental à luz dessas transformações, incorporando abordagens interdisciplinares e metodologias de análise mais integradas (TAWALBEH *et al.*, 2021).

Por fim, observa-se na literatura uma crescente preocupação com as etapas posteriores à operação, especialmente no que se refere ao descomissionamento e à gestão dos resíduos fotovoltaicos. O debate teórico atual inclui questões relativas à responsabilidade compartilhada, à viabilidade de sistemas de logística reversa e ao risco ambiental vinculado a materiais perigosos presentes nos módulos, como metais pesados (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015).

2.4 Mudanças Climáticas e Emissões de Gases de Efeito Estufa

A mudança do clima já está afetando o planeta, com o aumento de muitos extremos climáticos e meteorológicos em todos os lugares do mundo. O IPCC (2023) menciona que desde o quinto relatório (AR5) publicado em 2014, as mudanças observadas em extremos como ondas de calor, precipitações intensas, secas e ciclones tropicais, se fortaleceram ainda mais. Ainda de acordo com o IPCC (2023), a mudança do clima afeta o aquecimento e a acidificação dos oceanos, a segurança alimentar e hídrica, a mortalidade e morbidade humana e os ecossistemas terrestres, ou seja, causa impactos adversos generalizados e perdas e danos relacionados à natureza e às pessoas, distribuídos de forma desigual entre sistemas, regiões e setores.

As atividades humanas estão causando o aquecimento global, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa com a temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1°C mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900. As emissões de gases de efeito estufa resultam do uso insustentável de energia, das práticas e alteração do uso da terra, e dos diferentes estilos de vida e padrões de consumo e produção, tanto entre regiões e países quanto dentro de suas próprias fronteiras e entre indivíduos (IPCC, 2023).

Para limitar o aquecimento global, é necessário alcançar emissões líquidas zero de dióxido de carbono (CO₂) e reduzir significativamente outros gases de efeito estufa, como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). As trajetórias modeladas globais que limitam o aquecimento a 1,5°C (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada em até 2°C (>67%) são caracterizadas por reduções profundas, rápidas e, na maioria dos casos, imediatas das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2023).

As trajetórias globais de mitigação projetadas para alcançar emissões líquidas zero de CO₂ e outros gases de efeito estufa envolvem investimentos em inovação para descarbonização industrial, incentivos para construções sustentáveis, promoção de mudanças nos padrões de comportamento e estilo de vida e, sobretudo, a transição de combustíveis fósseis para fontes de energia de baixo ou zero carbono, como as energias renováveis, excluindo o desenvolvimento de novas infraestruturas baseadas em combustíveis fósseis (WRI BRASIL, 2022; IPCC, 2023).

O *GHG Protocol* fornece metodologia internacional com estruturas padronizadas para entender, medir e gerenciar as emissões de gases de efeito estufa de operações dos setores público e privado, cadeias de valor e ações de mitigação. O *GHG Protocol* foi desenvolvido pelo World Resources Institute (WRI) em associação com o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), lançado em 1998 e revisado em 2004, sendo hoje a ferramenta mais utilizada no mundo para realização de inventários de gases de efeito estufa corporativos (RANGANATHAN *et al.*, 2004; MONZONI *et al.*, 2008). Sua metodologia é compatível com as normas da International Organization for Standardization (ISO) e com as metodologias de quantificação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC).

Em 2008, o *GHG Protocol* foi adaptado ao contexto nacional, dando início ao Programa Brasileiro GHG Protocol (PBGHG Protocol). O PBGHG Protocol foi desenvolvido pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e o World Resources Institute (WRI), em parceria com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), World Business Council for Sustainable Development (WBSCD) (MONZONI *et al.*, 2008).

O objetivo principal do programa é promover uma cultura corporativa de caráter voluntário para a identificação, o cálculo e a elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa. De acordo com a FGVCES (2011), a contabilização, quantificação, elaboração e publicação de inventários de emissões de gases de efeito estufa deve estar em conformidade com os cinco princípios de contabilização apresentados no GHG Protocol Corporate Standard e na norma 14064-1, são eles: relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão.

As organizações inventariantes devem classificar suas emissões como diretas ou indiretas e selecionar o escopo para contabilização e elaboração do inventário de emissões de gases de efeito estufa. O Programa Brasileiro GHG Protocol define emissões diretas como as emissões provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização inventariante, já as indiretas são aquelas resultantes das atividades da organização que está inventariando suas emissões, mas que ocorrem em fontes que pertencem ou são controladas por outra organização.

Os três escopos foram definidos com o objetivo de ajudar a delinear as fontes de emissões direta (Escopo 1) e indireta (Escopo 2 e Escopo 3), melhorar a transparência e ser útil a diferentes tipos de organizações (MONZONI *et al.*, 2008; FGVCES, 2018a; FGVCES, 2018b; FGVCES, 2019). Mais detalhes sobre os escopos e suas categorias são apresentados na **Figura 2**.



Figura 2 -Tipos de escopos e categorias definidos pelo Programa Brasileiro GHG Protocol.

Fonte: Adaptado pelo autor de FGVCES (2018a).

O Programa Brasileiro GHG Protocol disponibiliza gratuitamente uma ferramenta para auxiliar no cálculo das emissões de gases do efeito estufa, denominada “*Ferramenta de estimativa de gases de efeito estufa para fontes intersetoriais*”. Esta é atualizada anualmente e contempla metodologia para cálculo dos Escopos 1, 2 e 3. O programa aconselha o uso da ferramenta, mas informa que o seu uso não é obrigatório e que as organizações podem utilizar métodos próprios de cálculo de gases de efeito estufa, desde que sejam mais precisos ou que sejam, pelo menos, consistentes com as diretrizes do Programa Brasileiro GHG Protocol (MONZONI *et al.*, 2008).

Os participantes do Programa Brasileiro GHG Protocol podem incluir em seu inventário todos os gases internacionalmente reconhecidos como gases de efeito estufa regulados pelo Protocolo de Kyoto, são eles: Dióxido de carbono (CO₂) Metano (CH₄) Óxido nitroso (N₂O) Hexafluoreto de enxofre (SF₆) Hidrofluorcarbonos (HFCs) e Perfluorcarbonos (PFCs). Após o cálculo de gases de efeito estufa, o inventário é publicado no Registro Público de Emissões, plataforma pioneira no país e que contém,

atualmente, a maior base de inventários organizacionais públicos da América Latina, com mais de 4.000 inventários (MONZONI *et al.*, 2008; FGVCES, 2011).

CAPÍTULO 1

CENÁRIO ENERGÉTICO DO NORDESTE: ANÁLISE DOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **Cenário energético do Nordeste: análise dos empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica**. 2025. Orientador: Emanuel Araújo Silva.

RESUMO

Este capítulo analisa os aspectos socioambientais associados à expansão de usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada no Nordeste brasileiro, com foco na avaliação dos estudos ambientais e nas exigências adotadas nos processos de licenciamento. A região concentra a maior parte dos empreendimentos do setor no país, o que reforça sua relevância estratégica para o planejamento energético e ambiental. Foram identificadas 294 usinas em operação e construção até dezembro de 2023 no Nordeste brasileiro, das quais apenas 29,6% apresentaram estudos disponíveis publicamente. A análise desses documentos permitiu sistematizar as principais ações geradoras, os impactos ambientais associados e os efeitos positivos potencialmente promovidos pelos empreendimentos. A investigação também evidenciou a ausência de diretrizes padronizadas entre os Estados nordestinos, comprometendo a uniformidade e a efetividade do processo de licenciamento. Como contribuição, o capítulo propõe um conjunto de diretrizes e recomendações organizadas em três eixos: critérios mínimos para definição do fator de enquadramento dos empreendimentos; proposta de impactos ambientais mínimos a serem obrigatoriamente abordados nos estudos ambientais; e definição de programas ambientais mínimos obrigatórios para usinas solares fotovoltaicas centralizadas. As recomendações visam qualificar tecnicamente os estudos, reduzir assimetrias nas exigências interestaduais e fortalecer o licenciamento como instrumento de gestão territorial e indução ao desenvolvimento sustentável na região.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica centralizada; licenciamento ambiental; estudos ambientais; impactos socioambientais.

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **Energy Scenario of the Brazilian Northeast: Analysis of Centralized Photovoltaic Solar Power Plants**. 2025. Advisor: Emanuel Araújo Silva.

ABSTRACT

This chapter analyzes the socio-environmental aspects associated with the expansion of centralized photovoltaic solar power plants in Northeastern Brazil, focusing on the assessment of environmental studies and the requirements adopted in licensing processes. The region concentrates most of the sector's projects in the country, reinforcing its strategic relevance for energy and environmental planning. A total of 294 power plants were identified as being in operation and under construction in Northeastern Brazil as of December 2023, of which only 29.6% had studies publicly available. The analysis of these documents made it possible to systematize the main impact-generating activities, the associated environmental impacts, and the positive effects potentially promoted by the projects. The investigation also revealed the absence of standardized guidelines among the Northeastern states, which undermines the uniformity and effectiveness of the licensing process. As a contribution, the chapter proposes a set of guidelines and recommendations organized into three pillars: minimum criteria for defining project classification; a proposal for minimum environmental impacts that must be addressed in environmental studies; and the definition of mandatory minimum environmental programs for centralized photovoltaic solar power plants. The recommendations aim to improve the technical quality of the studies, reduce asymmetries in interstate requirements, and strengthen environmental licensing as an instrument for territorial management and for promoting sustainable development in the region.

Keywords: centralized photovoltaic solar energy; environmental licensing; environmental studies; socio-environmental impacts.

1. INTRODUÇÃO

Entre as fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica destaca-se pelo seu papel no combate às mudanças climáticas e pela abundância do recurso solar em muitas regiões. No Brasil, a região Nordeste apresenta um dos maiores potenciais para geração de energia solar fotovoltaica devido aos altos índices de irradiação, fatores climáticos favoráveis e áreas disponíveis para a instalação de usinas (DANTAS; POMPERMAYER, 2018; SILVA, 2023).

Essa combinação de fatores, juntamente com disponibilidade de linhas de transmissão e subestações, tem atraído investimentos significativos para a construção de empreendimentos de energia solar fotovoltaica centralizada na região, reforçando o papel do Nordeste brasileiro no cenário energético nacional, que, de acordo com dados da ANEEL (2023), representa a região com maior número de Estados com potência outorgada em operação no país.

No entanto, como qualquer outra usina, a implementação de usinas solares fotovoltaicas centralizadas, envolve uma série de desafios e impactos ambientais que variam ao longo das fases do empreendimento, desde o planejamento e instalação até a operação e descomissionamento. Embora a energia solar seja considerada uma alternativa limpa, sem emissão de poluentes e gases de efeito estufa no processo de geração de energia, sua instalação em grande escala implica alterações na paisagem, impactos sobre a flora, fauna e sociedades locais, uso de recursos hídricos, consumo de recursos e descarte de módulos fotovoltaicos (TAWALBEH *et al.*, 2021; BOŠNJAKOVIC *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2023).

No Brasil, a legislação ambiental estabelece um conjunto de normas e exigências para o licenciamento de empreendimentos de energia, buscando assegurar que a instalação e operação desses projetos ocorram de forma sustentável. No caso específico das usinas solares fotovoltaicas, a existência e a efetiva aplicação desses instrumentos legais são essenciais para prevenir, mitigar e compensar os impactos socioambientais associados à sua implantação (PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2019).

Apesar do avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil, a legislação aplicável ao setor ainda enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito à padronização de processos e à adequação das diretrizes às particularidades dos diferentes biomas e regiões brasileiras (AHMED *et al.*, 2008; PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2019). A complexidade regulatória, somada às especificidades ambientais e climáticas do Nordeste, torna o processo de licenciamento uma etapa crucial para o desenvolvimento sustentável do setor.

A importância da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) nas fases de licenciamento de empreendimentos solares fotovoltaicos é amplamente reconhecida na literatura (FONSECA; SÁNCHEZ; RIBEIRO, 2017). Nesse processo, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) constitui o principal instrumento técnico, sendo essencial para a compreensão dos impactos gerados, bem como para a identificação de medidas de mitigação eficazes e daquelas que ainda carecem de aprimoramento (ALMEIDA; VERONEZ; MALVESTIO, 2024). No entanto, estudos de percepção, como os de Duarte *et al.* (2017) e Nita *et al.* (2022), apontam avaliações negativas quanto à qualidade tanto do processo de AIA quanto dos EIAs produzidos, indicando limitações na sua efetividade enquanto instrumento de gestão ambiental.

Por fim, a expansão da energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro representa uma oportunidade de desenvolver diretrizes e procedimentos específicos para o setor, considerando as características climáticas, ecológicas e sociais da região. Com a padronização de práticas de licenciamento e monitoramento ambiental, é possível melhorar a gestão dos impactos e potencializar os benefícios ambientais e sociais associados ao uso dessa fonte renovável. Assim, o estudo de usinas fotovoltaicas na região contribui não apenas para a compreensão dos impactos e desafios ambientais, mas também para o desenvolvimento de estratégias e políticas que fortaleçam a sustentabilidade e a eficiência do setor energético renovável no Brasil.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar os empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica centralizada em instalação e operação no Nordeste brasileiro, avaliando os impactos ambientais positivos e negativos associados a essas atividades.

2.2 Específicos

1. Analisar a legislação ambiental aplicável ao setor de energia solar fotovoltaica, abrangendo normas em níveis federal e estadual pertinentes à instalação e operação de empreendimentos;
2. Identificar os empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica centralizada em fase de construção e em operação no Nordeste brasileiro, caracterizando suas principais especificidades e localização;
3. Avaliar os estudos ambientais relacionados aos empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica, verificando sua conformidade com as diretrizes ambientais e o atendimento às exigências de licenciamento;
4. Identificar e analisar os impactos ambientais gerados nas diferentes fases dos empreendimentos;
5. Mapear as ações e atividades específicas associadas aos impactos ambientais, com foco em identificar as principais fontes de interferência ambiental durante cada etapa dos empreendimentos;
6. Propor diretrizes e recomendações para o licenciamento ambiental de empreendimentos de energia solar fotovoltaica, de modo a padronizar processos e melhorar a gestão de impactos ambientais no setor.

3. METODOLOGIA

Nesta pesquisa, foram analisados empreendimentos de geração centralizada de energia solar fotovoltaica com potência outorgada superior a 5 MW (5.000 kW), conforme os critérios de outorga estabelecidos pela Resolução Normativa ANEEL nº 1.071/2023. Para identificar os empreendimentos com construção não iniciada, em andamento ou em operação na região Nordeste do Brasil, utilizou-se o banco de dados de empreendimentos outorgados da ANEEL, acessível no Sistema de Informações de Geração (SIGA). Apenas os empreendimentos cadastrados ou outorgados até dezembro de 2023 foram considerados.

Após a identificação dos empreendimentos em construção e operação no Nordeste brasileiro, foi realizada uma pesquisa dos estudos ambientais elaborados pelos empreendimentos na fase de licenciamento ambiental. Os estudos ambientais foram obtidos em plataformas digitais dos órgãos ambientais licenciadores e, quando não disponíveis digitalmente pelo órgão, foi realizada uma pesquisa abrangendo as empresas responsáveis pelos empreendimentos e/ou outras fontes relevantes que continham informações sobre esses estudos.

Também foi realizada uma análise da legislação ambiental vigente em cada Estado do Nordeste, com o objetivo de verificar se o enquadramento dos empreendimentos em termos dos estudos ambientais realizados estava em conformidade com as diretrizes e exigências legais estaduais. Esta etapa permitiu avaliar a adequação dos estudos ambientais ao contexto regulatório de cada Estado e identificar possíveis divergências ou lacunas no processo de licenciamento.

Após a coleta dos estudos ambientais submetidos aos órgãos licenciadores, procedeu-se à identificação e sistematização dos impactos mencionados nesses documentos, com ênfase nas fases do empreendimento (planejamento, instalação e operação) e nos meios afetados (físico, biótico e socioeconômico). Essa análise contemplou a identificação dos impactos ambientais mais recorrentes, suas causas e os componentes ambientais afetados.

Na etapa seguinte, os impactos identificados foram classificados quanto à probabilidade de ocorrência, com base na frequência de menção nos estudos analisados, utilizando as seguintes categorias: Certa, Provável, Pouco provável e Improvável. Também foram identificadas as ações e atividades específicas associadas à geração desses impactos. Os critérios tradicionais de avaliação de impacto, como abrangência, duração, incidência, reversibilidade, temporalidade, natureza e cumulatividade, não foram aplicados, tendo em vista a heterogeneidade entre os empreendimentos e a finalidade exploratória e comparativa desta pesquisa.

A premissa adotada para a classificação baseia-se na lógica de que impactos frequentemente relatados em estudos ambientais distintos tendem a estar associados a atividades comuns e, portanto, apresentam maior probabilidade de ocorrência em projetos similares. Os intervalos definidos para a categorização foram os seguintes:

- Certa: impacto presente em 85% ou mais dos estudos;
- Provável: impacto presente em 50% a 84% dos estudos;
- Pouco provável: impacto presente em 15% a 49% dos estudos;
- Improvável: impacto presente em menos de 15% dos estudos.

Essa abordagem constitui uma análise documental estruturada, fundamentada na recorrência de impactos em documentos oficiais de licenciamento ambiental. Conforme discutido por Sánchez (2013), a utilização de dados secundários é válida em processos de análise ambiental, desde que os critérios aplicados sejam objetivos, documentados e metodologicamente fundamentados. Essa prática também é reconhecida na literatura como uma ferramenta válida para a identificação de padrões recorrentes em estudos ambientais, como demonstrado por Glasson *et al.* (2012) e Costa *et al.* (2019).

Para atender ao objetivo de propor diretrizes e recomendações gerais para o licenciamento ambiental de empreendimentos de energia solar fotovoltaica, foi realizada uma análise comparativa dos estudos ambientais analisados e da legislação ambiental vigente, com foco na identificação de padrões, fragilidades recorrentes e oportunidades de aprimoramento. Com base nos resultados dessa análise, elaborou-

se uma proposta de procedimento padronizado, orientada pelas melhores práticas observadas e pelas lacunas identificadas, com o intuito de fortalecer a conformidade com a legislação e qualificar a avaliação dos impactos ambientais nesse setor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Panorama geral

Até dezembro de 2023, no Nordeste brasileiro existiam 1.814 empreendimentos com construção não iniciada, 103 empreendimentos em construção e 191 empreendimentos em operação. Em relação a potência outorgada nas três diferentes fases, a região apresenta um total 88.409,67 MW, no qual, os empreendimentos com construção não iniciada representam 87,89% (77.702,92 MW), os empreendimentos em construção representam 4,71% (4.165,24 MW) e os empreendimentos em operação totalizam 7,40% (6.541,51 MW). O número de empreendimentos por fase e por Estado pode ser visualizado na **Figura 1**.

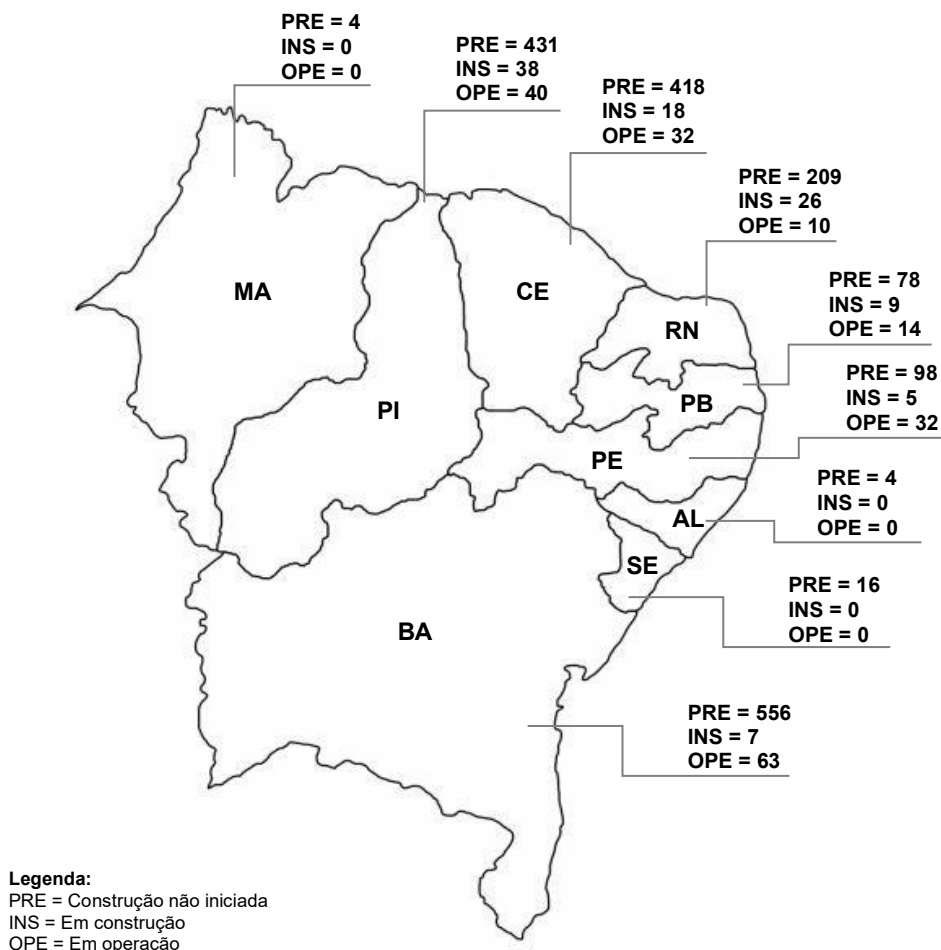


Figura 1 - Quantificação de usinas solares fotovoltaicas por Estado da região Nordeste do Brasil, classificadas por estágio de implantação: com construção não iniciada (PRE), em construção (INS) e em operação (OPE).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a distribuição dos empreendimentos em construção e operação na região Nordeste, observa-se que a maioria das usinas solares estão localizadas no bioma Caatinga, com apenas dois empreendimentos construídos e operando no município de Goiana/PE, que possui território composto pelo bioma Mata Atlântica (**Figura 2 e Figura 3**).

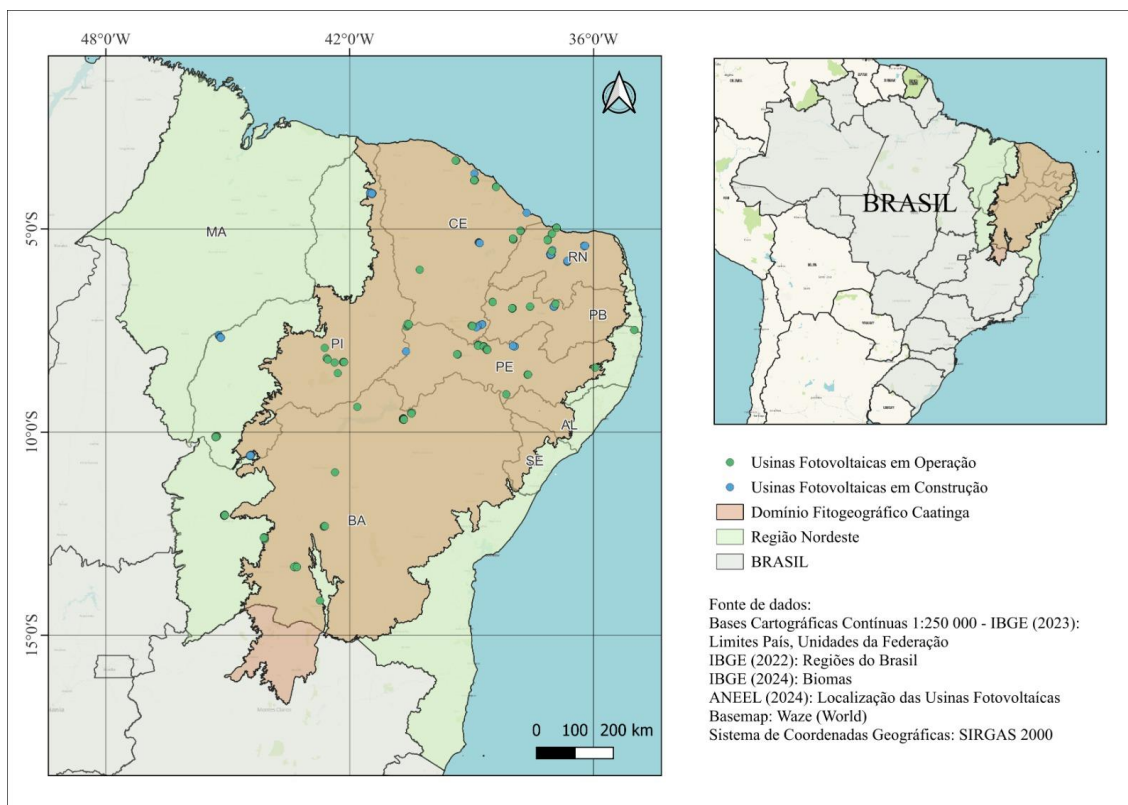
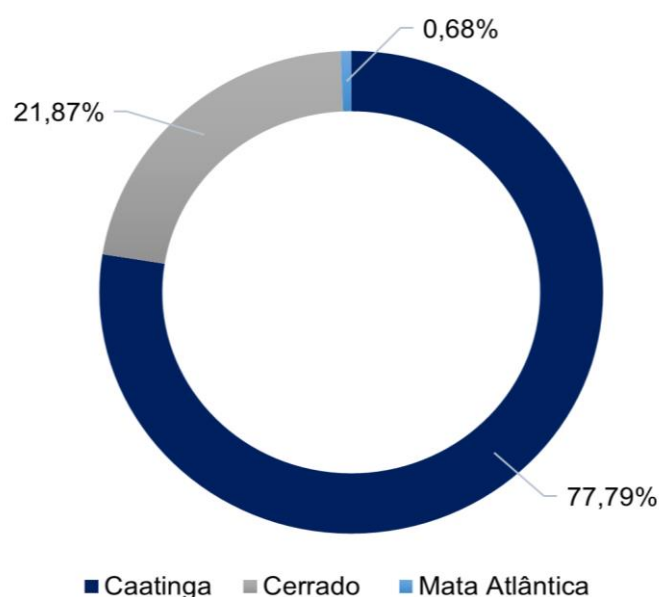


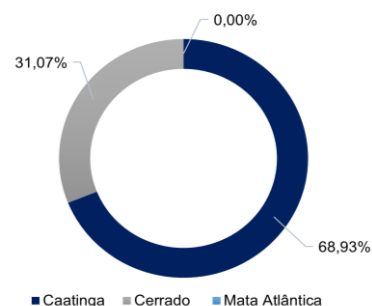
Figura 2 - Mapa de localização das usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação na região Nordeste do Brasil.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Empreendimentos em construção e operação



Empreendimentos em construção



Empreendimentos em operação

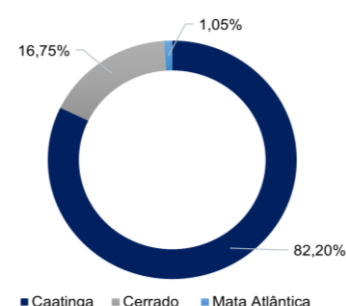


Figura 3 - Distribuição das usinas solares fotovoltaicas por bioma na região Nordeste do Brasil, considerando os estágios de implantação: em construção e em operação.

Observa-se na **Figura 4**, que a partir de 2011, ano em que a primeira usina de geração centralizada entrou em operação comercial, houve um forte crescimento do setor solar fotovoltaico no Nordeste brasileiro. Nos últimos cinco anos, o crescimento foi superior a 400%, confirmando o potencial da região Nordeste, para geração de energia elétrica por meio desta fonte renovável.

Potência Instalada em Operação por Ano (MW)

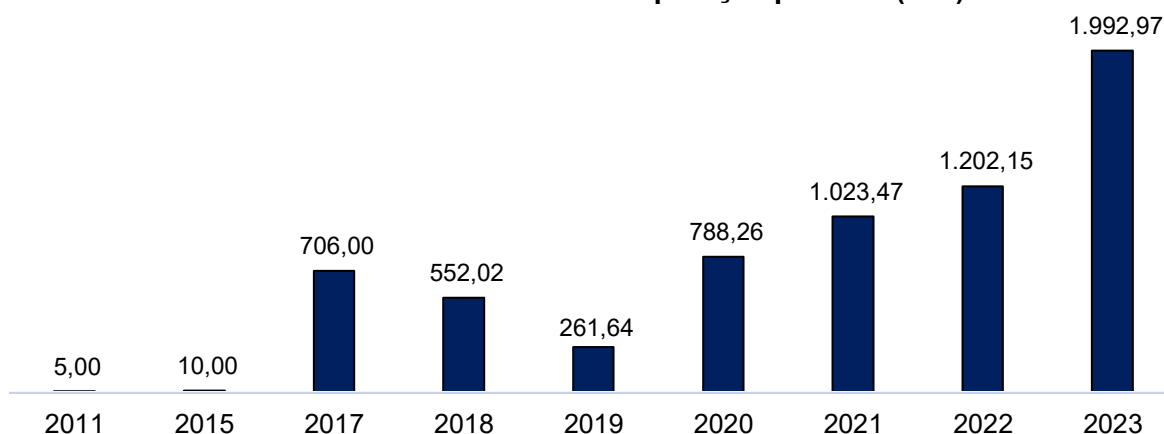


Figura 4 - Evolução da potência instalada em operação no Nordeste brasileiro.

Nos tópicos a seguir, são apresentados detalhes dos empreendimentos em construção e em operação por Estado, com a identificação dos estudos ambientais conduzidos para a obtenção das licenças necessárias. Além disso, analisa-se o enquadramento desses empreendimentos segundo a legislação ambiental estadual, que define os procedimentos, critérios e parâmetros aplicáveis ao processo de licenciamento.

4.1.1 Alagoas

Conforme observado na **Figura 1**, não há nenhum empreendimento em construção e/ou operação no Estado de Alagoas. Os quatros empreendimentos que possuem autorização da ANEEL (Zebu X, Zebu XI, Zebu XII e Zebu XIII), encontram-se com construção não iniciada e totalizam uma potência de 76,63 MW. De acordo com pesquisa no site do Governo de Alagoas (2023), os empreendimentos fazem parte do Complexo Fotovoltaico Zebu, previsto para ser implantado no município de Delmiro Gouveia até 2026.

Mesmo sem empreendimentos em construção e/ou operação foi encontrada uma legislação específica no Estado para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica. A Resolução CEPRAM nº 10/2018 enquadra o tipo de estudo ambiental a ser realizado para produção de energia solar fotovoltaica no solo, no qual, utiliza a potência instalada como fator de enquadramento, conforme tabela abaixo (**Tabela 1**).

Tabela 1 - Tipologias e portes dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução CEPRAM nº 10/2018.

Código/Atividade	Potencial poluidor	Porte (Potência instalada)	Estudo Ambiental
10.17.03 - Produção de energia solar fotovoltaica no solo	Grande	≤ 10 MW	RAA
		≥ 10 MW	EIA

Legenda - RAA: Relatório de Avaliação Ambiental; EIA: Estudo de Impacto Ambiental.

4.1.2 Bahia

A Bahia é atualmente o Estado da região Nordeste com o maior número de empreendimentos em operação e, conseqüentemente, a maior geração de energia elétrica através da fonte fotovoltaica (potência outorgada em operação: 2.043,78 MW). Em nível nacional, o Estado fica atrás apenas de Minas Gerais, que possui aproximadamente 3,56 GW de potência outorgada.

Os primeiros empreendimentos fotovoltaicos entraram em operação no Estado da Bahia em junho de 2017, e, desde então, o Estado vem injetando a cada ano, mais energia na rede elétrica. Na **Figura 5**, observa-se, a linha do tempo dos empreendimentos que entraram em operação na Bahia, distribuídos por município.

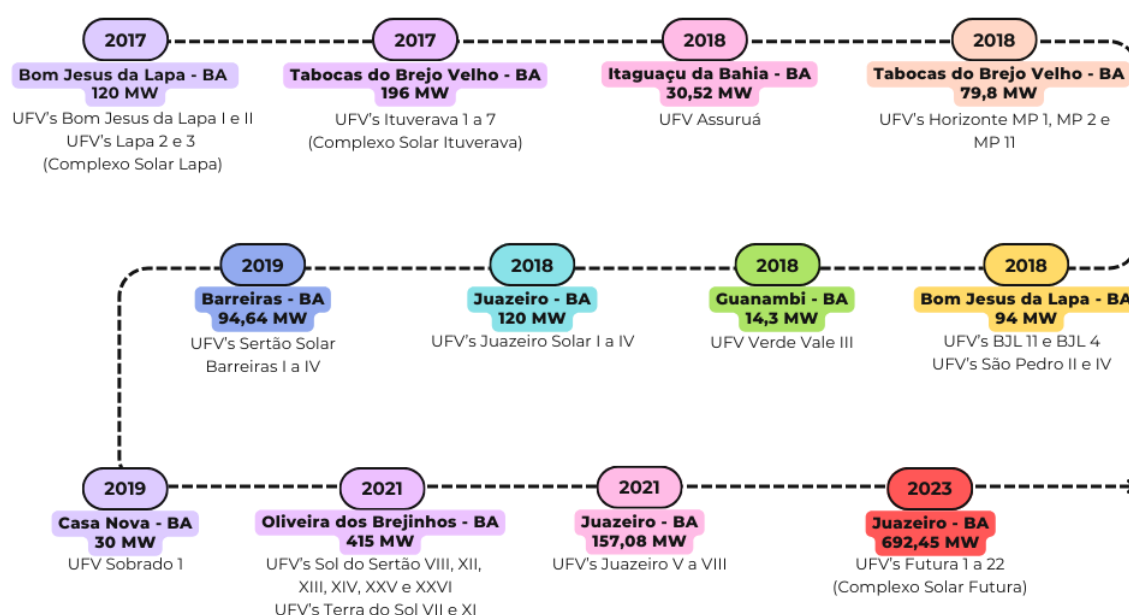


Figura 5 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado da Bahia, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos empreendimentos em construção, o Estado apresenta apenas 7 empreendimentos (Sertão Solar Barreiras XV, Sertão Solar Barreiras XVI, Sertão

É importante destacar que nenhum dos estudos apresentados acima encontram-se disponíveis no site do Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Inema), órgão licenciador a nível estadual. Com exceção do Complexo Solar Futura, as informações sobre o tipo de estudo ambiental realizado por empreendimento que subsidiou a emissão das licenças ambientais foram obtidas na Nota Técnica Conjunta da Eletrobras/EPE (2022). Em relação ao Complexo Solar Futura, foi encontrada na rede Articulação Semiárido Brasileiro (ASA, 2023), uma matéria intitulada *“Povos e comunidades tradicionais enfrentam empresas e governos ao exigirem ser consultadas antes da instalação de grandes projetos”*, onde citam que foi realizado estudo ambiental simplificado do complexo e não houve audiência pública.

De acordo com o Decreto nº 14.024/2012, com a redação dada pelo Decreto nº 18.218/2018, até janeiro de 2023, os empreendimentos fotovoltaicos, independentes de sua potência e área suprimida, não eram passíveis da realização de Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), devido a atividade ser considerada de pequeno potencial poluidor. Na **Tabela 2**, pode-se observar o enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos, definido pelo Decreto nº 14.024/2012.

Tabela 2 - Tipologias e portes dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com o Decreto nº 14.024/2012.

Código/Atividade	Potencial poluidor	Porte (Área total da UFV instalada)	Classe	Estudo Ambiental
E2.7 - Geração de energia solar fotovoltaica	Pequeno	Pequeno: 1 ha a 50 ha	1	EPI
		Médio: 50 ha a 200 ha	2	
		Grande: maior que 200 ha	4	EMI

Legenda - Classe 1: pequeno porte e pequeno potencial poluidor; Classe 2: médio porte e pequeno potencial poluidor ou pequeno porte e médio potencial poluidor; Classe 4: grande porte e pequeno potencial poluidor ou pequeno porte e alto potencial poluidor; EPI: Estudo Ambiental para Atividades de Pequeno Impacto; EMI: Estudo Ambiental para Atividades de Médio Impacto.

Este decreto, não contém especificações ambientais e/ou sociais que devam ser levadas em consideração durante a realização do estudo ambiental para licenciamento da atividade, não abordando questões básicas, como: fauna e/ou flora sensível e/ou ameaçada de extinção, áreas protegidas, Unidades de Conservação e suas zonas de amortecimento, comunidades tradicionais etc.

Em 21 de janeiro de 2023, foi publicada a Resolução CEPRAM nº 5.092/2022, que estabelece critérios e procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar instaladas em superfície terrestre no Estado da Bahia.

A nova Resolução, em seu Art. 8º, exige a apresentação de Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental, além de audiências públicas, para os empreendimentos solares que estejam localizados ou que influenciem diretamente as formações dunares, planícies fluviais e de deflação, mangues e demais áreas úmidas, o bioma Mata Atlântica, a Zona Costeira, zonas de amortecimento de unidades de conservação de proteção integral, espécies endêmicas da flora e fauna ameaçadas de extinção, comunidades locais, corredores ecológicos e/ou cavidades naturais subterrâneas de alta relevância

4.1.3 Ceará

A primeira usina solar a gerar eletricidade em escala comercial conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) no país, foi construída em 2011 e está localizada no município de Tauá, sertão do Ceará. O Estado está na lista dos 10 Estados com maior potência outorgada em operação no país, com potência outorgada de 962,59 MW (32 empreendimentos), até 31 de dezembro de 2023. Na **Figura 7**, observa-se a linha do tempo dos empreendimentos que entraram em operação no Ceará, distribuídos por município.

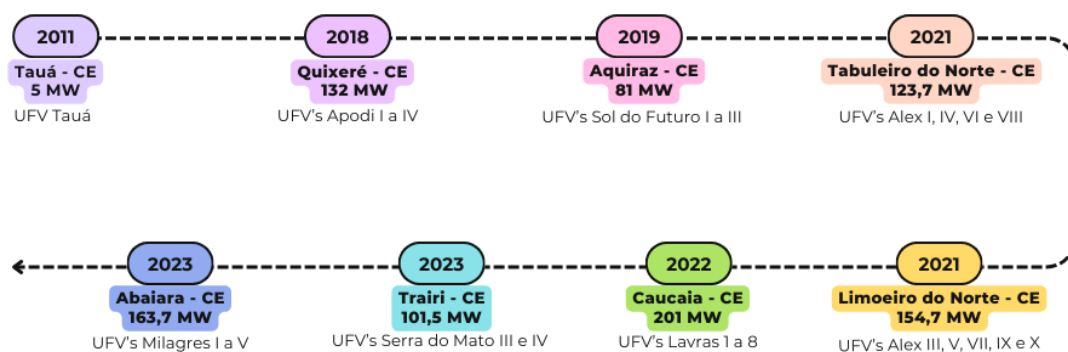


Figura 7 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Ceará, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos empreendimentos em construção, o Estado apresenta 18 empreendimentos, totalizando uma potência outorgada de 703,198 MW. Os empreendimentos em construção e em operação são apresentados na **Figura 8**.

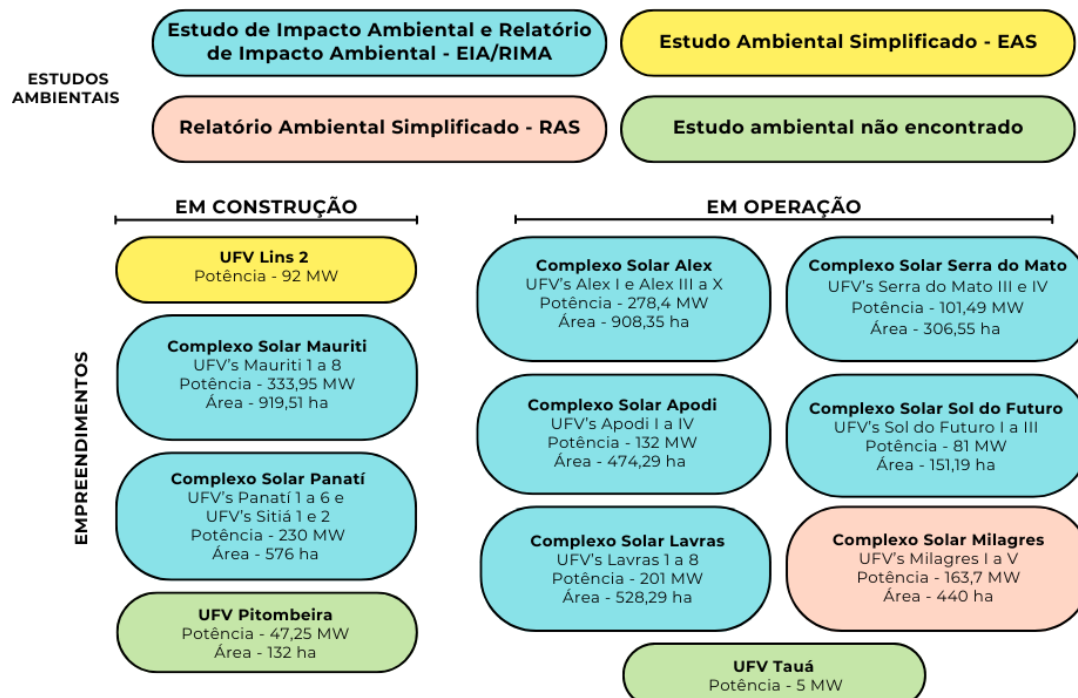


Figura 8 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado do Ceará durante o processo de licenciamento ambiental.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O órgão ambiental do Ceará, a Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE), disponibiliza os estudos e relatórios de impacto ambiental dos empreendimentos, no site do órgão (<https://www.semace.ce.gov.br/eia-rima/>), como também uma planilha os links para download. Para os estudos disponíveis em meio físico, a SEMACE ainda fornece de informações de como obtê-los.

Dos empreendimentos atualmente em construção e operação, 84% foram licenciados por meio do EIA/RIMA, onde todos os estudos estão disponíveis no site da SEMACE. De acordo com a Nota Técnica da Eletrobras/EPE (2022) a Usina Lins 2 e o Complexo Solar Milagres foram licenciadas por meio de estudos simplificados e estes não foram encontrados.

Todos os empreendimentos atualmente em construção e operação (**Figura 8**), enquadrados como porte excepcional (**Tabela 3**) apresentaram o EIA/RIMA no processo de licenciamento ambiental, estando em consonância com a Resolução COEMA nº 06/2018.

Tabela 3 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução COEMA nº 06/2018.

Código/Atividade	Potencial poluidor	Porte (Área total da UFV instalada)	Estudo Ambiental
11.10 - Geração de energia solar/fotovoltaica	Baixo	Micro: 15 ha a 30 ha	EIA/RIMA caso estejam localizados em local indicado no Art. 5º da Resolução
		Pequeno: 30 ha a 90 ha	
		Médio: 90 ha a 180 ha	
		Grande: 180 ha a 450 ha	
		Excepcional: maior que 450 ha	EIA/RIMA

Legenda – EIA/RIMA: Estudo de Impacto Ambiental e seu respectivo relatório.

Mesmo considerando os empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica de baixo potencial poluidor, a legislação do Estado do Ceará exige a apresentação de EIA/RIMA para os empreendimentos que irão utilizar área maior que

450 ha ou estejam localizados em locais que cause impacto ambiental e/ou social significativo. Estes locais são indicados na resolução COEMA nº 06/2018.

Em resumo, a resolução COEMA nº 06/2018 enquadra todos os empreendimentos como passíveis de EIA/RIMA, independente do porte, até que o empreendedor comprove a inexistência de interferências nos locais indicados no Art. 5º na resolução.

Os empreendimentos passíveis de EIA/RIMA, deverão seguir para elaboração do estudo, Termo de Referência específico emitido pela SEMACE. Já empreendimentos passíveis de RAS, deverão seguir o Termo de Referência estabelecido no Anexo I da Instrução Normativa COEMA nº 01/2018.

4.1.4 Maranhão

Conforme observado na **Figura 1**, não há nenhum empreendimento em construção e/ou operação no Estado do Maranhão. Os quatros empreendimentos que possuem autorização da ANEEL, encontram-se com construção não iniciada (Caxias I, Caxias II, Caxias III e Caxias IV) e totalizam uma potência outorgada de 226,17 MW.

Mesmo sem empreendimentos em operação, o Estado possui regulamentação para subsidiar o Licenciamento Ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar. Os procedimentos de licenciamento ambiental são realizados pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA), órgão licenciador estadual.

A Portaria SEMA nº 74/2013, classifica os empreendimentos de acordo com a potência, e no geral, exige a apresentação do RAS para emissão das licenças, por considerar os empreendimentos de geração de energia fotovoltaica/solar de baixo impacto ambiental. O RAS deverá ser elaborado de acordo Termo de Referência apresentado no Anexo III da Portaria (**Tabela 4**).

Tabela 4 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Portaria SEMA nº 74 de 12/06/2013.

Atividade	Potencial poluidor	Porte (Potência)	Estudo Ambiental
Geração de energia solar/fotovoltaica	Baixo	Pequeno: até 15 MW	RAS ou EIA/RIMA
		Médio: 15 MW a 50 MW	
		Grande: maior que 50 MW	

Legenda – RAS: Relatório Ambiental Simplificado; EIA/RIMA: Estudo de Impacto Ambiental e seu respectivo relatório.

O EIA/RIMA poderá ser exigido pelo órgão licenciador em casos específicos, por exemplo, quando o local de implantação implicar em remoção de população, supressão de vegetação nativa arbórea acima de 60% da área total explorada, intervenção em unidade de conservação de proteção integral ou em cavidades naturais subterrâneas (Item 3.1.3.1, Art 3º, Portaria SEMA nº 74/2013).

4.1.5 Paraíba

Considerando a região Nordeste, a Paraíba é o sexto Estado com maior potência instalada em operação, totalizando 457,06 MW (14 empreendimentos). Os primeiros empreendimentos entraram em operação em 2018 e o Estado apresenta um alto potencial para geração de energia por meio da fonte fotovoltaica com nove (9) empreendimentos em fase de construção. Na **Figura 9**, observa-se a linha do tempo dos empreendimentos que entraram em operação na Paraíba, distribuídos por município.

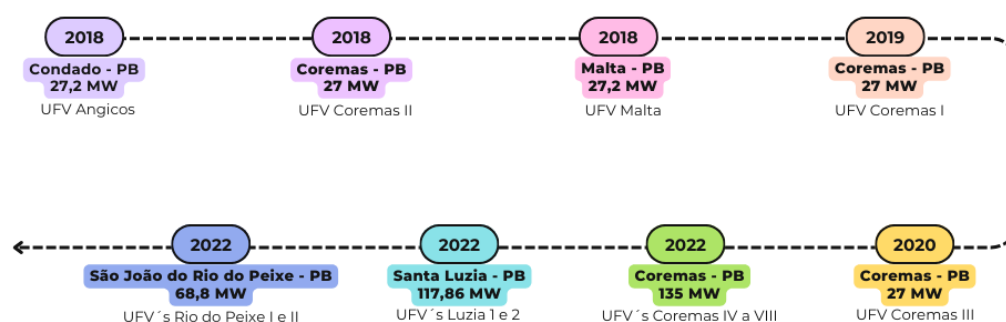


Figura 9 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado da Paraíba, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Deliberação COPAM nº 5.192/2021, os empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica são enquadrados pela Norma Administrativa 101, publicada em dezembro de 2021 (**Tabela 5**). A NA nº 101/2021 informa que, independentemente do porte do empreendimento, deve ser realizado o RAS. No entanto, em junho de 2023, foi publicada a Lei nº 12.713/2023 que enquadra os empreendimentos de porte extraordinário como passíveis da elaboração de EIA/RIMA para obtenção das licenças ambientais.

Tabela 5 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Norma Administrativa nº 101/2021.

Código/Atividade	Potencial poluidor	Porte (Potência gerada)	Estudo Ambiental
40.40.499 - Energia Solar/ Fotovoltaica/ Termosolar	Pequeno	Micro: ≤ 5 MW	RAS
		Pequeno: 5 MW a 10 MW	
	Médio	Médio: 10 MW a 25 MW	
		Grande: 25 MW a 125 MW	EIA/RIMA*
	Grande	Extraordinário: ≥ 125 MW	

Legenda - RAS: Relatório Ambiental Simplificado; EIA/RIMA: Estudo de Impacto Ambiental e seu respectivo relatório.

*Lei nº 12.713/2023.

Vale destacar que tanto na NA nº 101/2021 como na Lei nº 12.713/2023, empreendimentos que necessitem realizar supressão de vegetação nativa em áreas acima de 100 (cem) hectares, são passíveis de EIA/RIMA. Isto pode levar empreendimentos de porte grande a elaborarem EIA/RIMA, uma vez que, para cada a instalação de 1 MW é previsto mais que 1 ha de área.

As usinas Santa Luzia 1 a 9, atualmente em construção, ocupam uma área maior que 600 hectares, estando em consonância com a legislação ambiental do Estado da Paraíba, pois foi elaborado o Estudo de Impacto Ambiental e o respectivo Relatório de Impacto Ambiental (**Figura 10**).

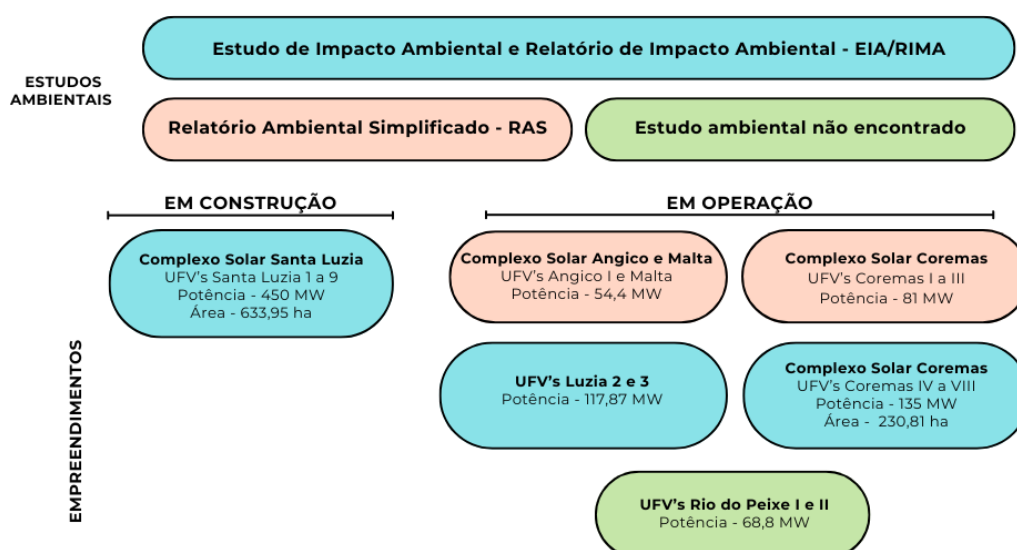


Figura 10 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado da Paraíba durante o processo de licenciamento ambiental.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o Complexo Solar Coremas, composto por oito (8) usinas fotovoltaicas, foi encontrado o Estudo de Impacto Ambiental apenas para as usinas Coremas IV a VIII. As demais usinas, não foram contempladas no estudo. O estudo é datado em outubro de 2020, neste período, duas usinas estavam operando e outra entrou em operação em novembro de 2020. A Nota Técnica Conjunta da Eletrobras/EPE (2022), informa

que as usinas Coremas I a III, foram licenciadas por meio do Relatório Ambiental Simplificado, sendo que como as usinas fazem parte do mesmo complexo, ou seja, estão localizadas em uma mesma área de impacto (áreas contíguas), o Estudo de Impacto Ambiental deveria ter sido elaborado no início do licenciamento ambiental da primeira usina fotovoltaica.

As usinas fotovoltaicas Luzia II e III, foram licenciadas por meio do Estudo de Impacto Ambiental, onde de acordo com a potência outorgada, está em consonância com a legislação ambiental do Estado. Vale destacar que não foi verificada a área total ocupada pelas usinas no estudo ambiental, para analisar se o empreendimento ocupa uma área maior que 100 hectares.

Em relação ao Complexo Solar Malta e Angico não foi encontrado o estudo ambiental que subsidiou o licenciamento ambiental do empreendimento. A Nota Técnica Conjunta da Eletrobras/EPE (2022) informa que o estudo ambiental realizado foi o RAS. A área ocupada pelo empreendimento não foi encontrada no site da empresa proprietária. No estudo de caso realizado por Silva (2018), foi mencionado que o empreendimento foi instalado em um terreno de 120 hectares, dos quais 69,62 hectares foram ocupados pela planta fotovoltaica.

Os Estudos de Impacto Ambiental e Relatórios de Impacto Ambiental dos empreendimentos são disponibilizados no site do órgão ambiental (<https://sudema.pb.gov.br/eia-rima>), bem como o número dos processos, o empreendedor, o local e data da audiência pública. Já os estudos simplificados, não foram encontrados no site do órgão, e, tão pouco, no site das empresas responsáveis.

4.1.6 Pernambuco

Atualmente, na região Nordeste, Pernambuco é o terceiro Estado com a maior potência instalada em operação, totalizando 1.065,5 MW (32 empreendimentos). Os primeiros empreendimentos entraram em operação em 2015, sendo Pernambuco o segundo Estado a gerar eletricidade em escala comercial conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) no país. Na **Figura 11**, observa-se a linha do tempo dos

empreendimentos que entraram em operação em Pernambuco, distribuídos por município.

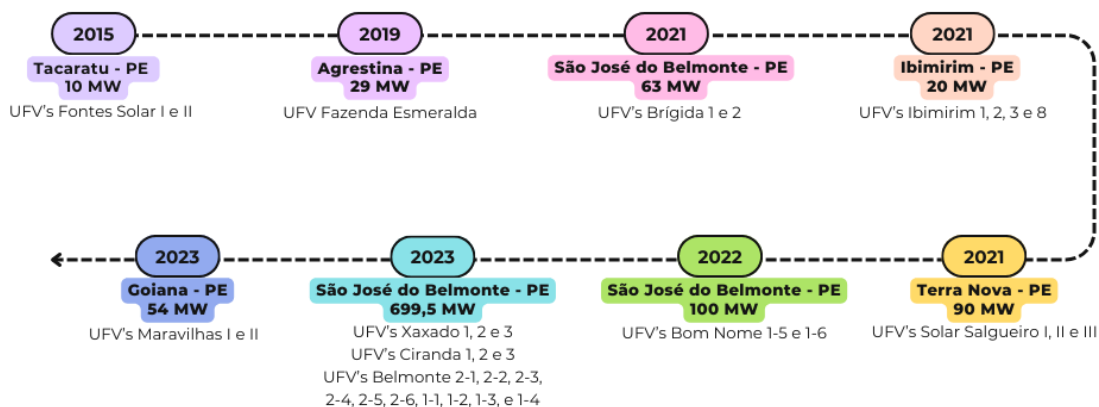


Figura 11 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Pernambuco, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos 37 empreendimentos em construção e operação no Estado, 12 usinas fotovoltaicas são mencionadas na Nota Técnica Conjunta da Eletrobras/EPE (2022), onde informam que o estudo ambiental elaborado foi o RAS. Portanto, os estudos ambientais apresentados na **Figura 12**, foram classificados de acordo com a nota técnica e os estudos não foram encontrados no site do órgão ambiental ou em qualquer outro site.

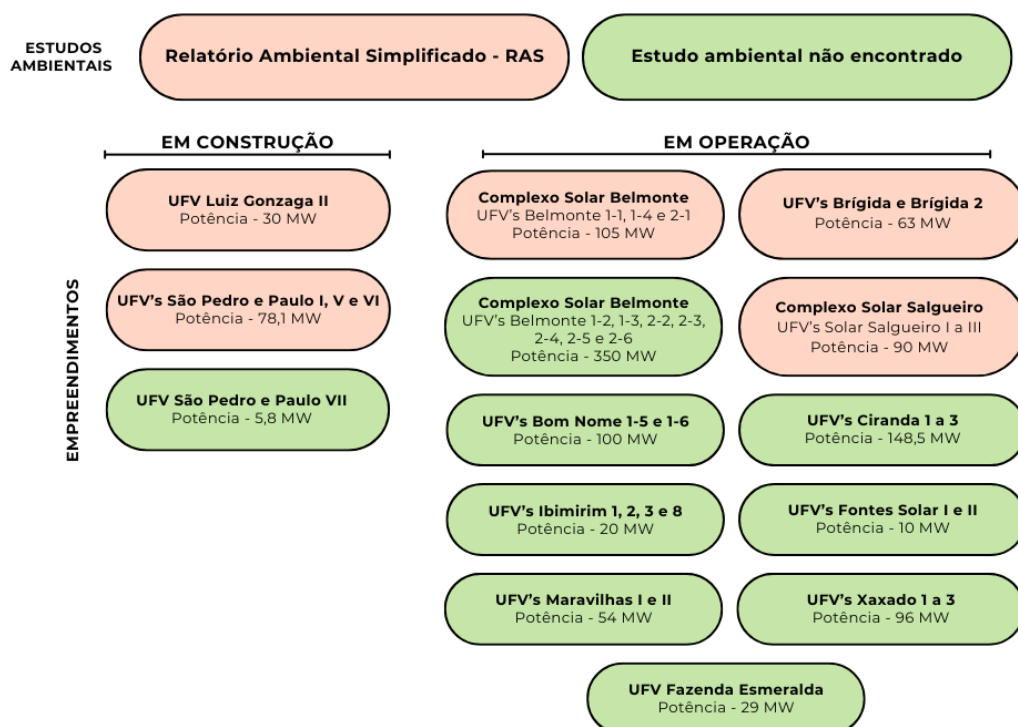


Figura 12 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado do Pernambuco durante o processo de licenciamento ambiental.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O órgão ambiental licenciador do Estado do Pernambuco, a Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH), disponibiliza os estudos e relatórios de impacto ambiental, no site da agência deste 2009 (<https://www2.cprh.pe.gov.br/publicacoes-e-transparencia/eia-rima/>), como também os relatórios ambientais simplificados deste 2010 (<https://www2.cprh.pe.gov.br/publicacoes-e-transparencia/relatorio-ambiental-simplificado-ras/>), mas não foi encontrado nenhum documento de relacionado à empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica.

A Lei nº 14.249/2010, alterada pelas Leis nº 14.549/2011 e nº 16.784/2019, dispõe sobre o licenciamento ambiental no Estado, incluindo os empreendimentos de geração de energia fotovoltaica em seu Anexo I. A lei menciona que empreendimentos e atividades considerados causadores de significativa degradação do meio ambiente dependem da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental e da realização de audiência pública.

No entanto, a lei não é clara quanto ao enquadramento dos empreendimentos fotovoltaicos passíveis de Estudo de Impacto Ambiental e/ou estudo ambiental simplificado. Ela estabelece que é responsabilidade do órgão ambiental avaliar se a atividade ou empreendimento é potencialmente causador de significativa degradação ambiental, bem como definir os estudos ambientais pertinentes ao respectivo processo de licenciamento.

Com o objetivo de estabelecer procedimentos para o licenciamento de usinas fotovoltaicas em superfície terrestre, a CPRH publicou em outubro de 2024 a Instrução Normativa CPRH nº 10/2024, no qual foi estabelecido que, independentemente do porte, empreendimentos fotovoltaicos que implicarem na supressão de vegetação nativa do Bioma Caatinga superior a 100 ha e/ou esteja localizado em área ambientalmente sensível (formação dunares, mangues, bioma Mata Atlântica, Zona Costeira, Unidades de Conservação etc.), conforme pontuado no Art. 3º, serão passíveis da elaboração de EIA/RIMA.

4.1.7 Piauí

Piauí é o segundo Estado da região Nordeste com maior número de empreendimentos solares fotovoltaicos, com 40 unidades e 1.459,51 MW de potência outorgada. Em nível nacional, o Estado encontra-se em terceira posição. Os primeiros empreendimentos fotovoltaicos entraram em operação no Estado do Piauí em setembro de 2017, e, após isto, o Estado injetava a cada ano mais energia na rede elétrica. Na **Figura 13**, observa-se em linha do tempo, os empreendimentos que entraram em operação no Piauí, distribuídos por município.

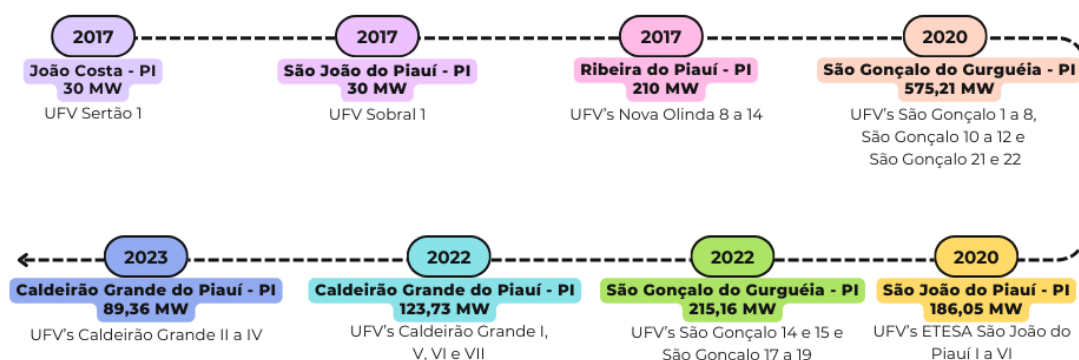


Figura 13 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Piauí, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Nordeste, o Piauí é o Estado com o maior número de empreendimentos em construção (38 unidades), correspondendo a 1.584,57 MW de potência outorgada a ser adicionada ao SIN. Com a finalização dos empreendimentos atualmente em construção, o Piauí ultrapassará a Bahia, tanto em número de empreendimentos quanto em potência outorgada em operação.

No Estado, a Resolução CONSEMA nº 46/2022, alterou e acrescentou dispositivos à Resolução CONSEMA nº 40/2021, que estabelece o enquadramento dos empreendimentos e atividades passíveis de licenciamento ambiental, incluindo empreendimentos solares (**Tabela 6**). A primeira legislação que relacionou as atividades passíveis de licenciamento ambiental no Piauí, foi a Resolução CONSEMA nº 33/2020. Está foi atualizada pela Resolução CONSEMA nº 40/2021.

Tabela 6 - Tipologias e portes dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução CONSEMA nº 46/2022.

Código/Atividade	Potencial poluidor	Porte (Área útil)	Classe	Estudo Ambiental
D2-005 Geração de energia a partir de fonte solar	Pequeno	menor que 2 ha	não incidência/inexigibilidade	

	Micro: 2 ha a 20 ha	1	DTA
	Pequeno: 20 ha a 100 ha	2	EAS
	Médio: 100 ha a 400 ha	3	EAI
	Grande: 400 ha a 1.000 ha	4	EIA/RIMA
	Excepcional: maior que 1.000 ha	6	
	D2-006 Geração de energia a partir de fonte solar, por empreendimento enquadrado nos critérios do Art. 16 da Resolução CONSEMA nº 46/2022	Micro: menor que 20 ha	4
Pequeno: 20 ha a 100 ha			
Médio: 100 ha a 400 ha		5	
Grande: 400 ha a 1.000 ha			
Excepcional: maior que 1.000 ha		7	

Legenda – DTA: Descritivo Técnico e Ambiental; EAS: Estudo Ambiental Simplificado; EAI: Estudo Ambiental Intermediário; EIA/RIMA: Estudo de Impacto Ambiental e seu respectivo relatório.

O Art. 16 da Resolução CONSEMA nº 46/2022 define que empreendimentos localizados em áreas que incidam diretamente sobre chapadas, formações dunares, zonas de amortecimento de unidades de conservação de proteção integral, locais que gerem impactos socioculturais diretos, inviabilizando atividades cotidianas nas comunidades tradicionais, áreas de ocorrência de espécies ameaçadas de extinção, áreas de endemismo restrito e áreas que possam danificar ou tornar necessária a remoção de bens considerados patrimônio arqueológico, histórico, cultural ou espeleológico são passíveis da elaboração de EIA/RIMA, independentemente de sua classe e porte.

4.1.8 Rio Grande do Norte

O Estado apresenta uma potência instalada em operação de aproximadamente 553,1 MW, com energia gerada por meio de dez empreendimentos, cujos primeiros entraram em operação em dezembro de 2017 (**Figura 14**).

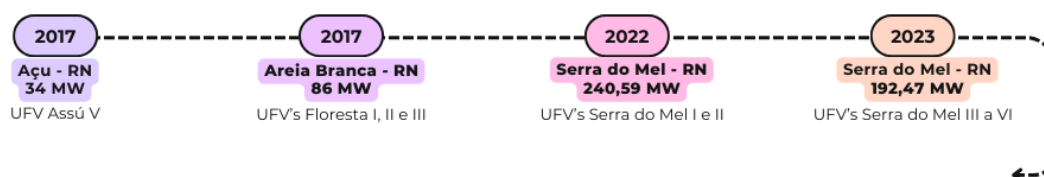


Figura 14 - Linha do tempo das usinas solares fotovoltaicas em operação no Estado do Rio Grande do Norte, com indicação da capacidade instalada e da localização municipal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos empreendimentos em construção, o Rio Grande do Norte representa o segundo Estado da região Nordeste com o maior número de usinas em construção, totalizando 26 empreendimentos (potência instalada de aproximadamente 963,6 MW). Os empreendimentos estão localizados nos municípios de Açu, Santana dos Matos, Jandaíra, Pedro Avelino e Lajes.

O órgão ambiental do Rio Grande do Norte, o Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente (IDEMA), disponibiliza os Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental dos empreendimentos passíveis de EIA/RIMA, no site do órgão (<https://sislia.idema.rn.gov.br/rimas/rimas.php>). Os estudos, não são organizados por ano de publicação, então, não é possível identificar a partir de quando os documentos começaram a ser disponibilizados digitalmente. Outros tipos de estudos ambientais, como o RAS, não são disponibilizados no site do órgão ambiental.

No geral, considerando os empreendimentos atualmente em construção e operação, apenas as usinas Assu Sol 4, 5, 8 e 16 (Complexo Solar Assú), foram

licenciadas por EIA/RIMA, representando 11,11% do total de empreendimentos (Figura 15).

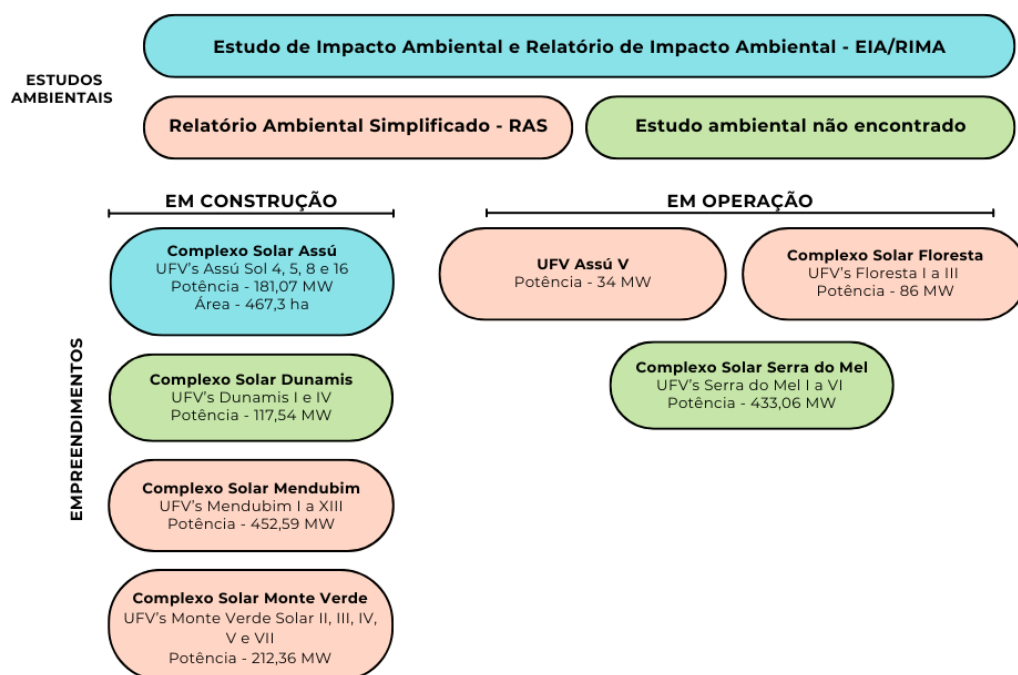


Figura 15 - Estudos ambientais apresentados pelas usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação no Estado do Rio Grande do Norte durante o processo de licenciamento ambiental.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos empreendimentos em operação, não foram encontrados os estudos que subsidiaram os processos de licenciamento ambiental. De acordo com a Nota Técnica da Eletrobras/EPE (2022), para licenciamento das usinas Assú V e Floresta I a III, o estudo apresentado ao órgão ambiental foi o RAS. Já para as usinas Serra do Mel I a VI, não foram encontradas informações sobre os estudos ambientais realizados.

No site do IDEMA, está disponível o EIA/RIMA do Complexo Solar Serra do Mel Sul, que também será construído no município de Serra do Mel. O empreendimento pertencente a mesma empresa das usinas Serra do Mel I a VI, será composto por 6 usinas fotovoltaicas, com potência individual de 48,118 MW e encontra-se com construção não iniciada.

Os Relatórios Ambientais Simplificados dos Complexos Mendubim e Monte Verde, foram publicados pelas empresas responsáveis, no entanto, nos estudos, não foi identificado a área total ocupada pelas usinas. As usinas Dunamis, provavelmente foram licenciadas por meio de RAS, pois o EIA/RIMA não foi encontrado no site do órgão ambiental.

Em relação a legislação ambiental, a Lei Complementar nº 272/2004 dispõe sobre as diretrizes gerais de licenciamento ambiental no Estado do Rio Grande do Norte, obrigando a elaboração do EIA/RIMA para os empreendimentos e atividades de significativo impacto ambiental, enquadrados nas categorias de grande e excepcional porte e grande potencial poluidor.

O enquadramento dos sistemas de geração de energia elétrica por meio da fonte solar é definido pela Resolução CONEMA nº 04/2006 (e suas alterações, versão novembro/2014) (**Tabela 7**).

Tabela 7 - Enquadramento dos empreendimentos solares fotovoltaicos de acordo com a Resolução CONEMA nº 04/2006 (e suas alterações, versão novembro/2014).

Atividade	Potencial poluidor	Porte (Potência gerada)
Sistemas de Geração de Energia Elétrica: Solar	Pequeno	Micro: menor que 5 MW
		Pequeno: 5 MW a 15 MW
		Médio: 15 MW a 45 MW
		Grande: 45 MW a 135 MW
		Excepcional: maior que 135 MW

Em 2018, foi publicado um ato administrativo específico para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica, a Instrução Normativa IDEMA nº 01/2018. Esta instrução regulamenta à Lei Complementar nº 272/2004 e detalha os empreendimentos sujeitos a elaboração do EIA/RIMA, os passíveis de RAS e os dispensados de apresentação de estudos ambientais.

De acordo com o Art. 4º da IN IDEMA nº 01/2018, estão sujeitos à apresentação de EIA/RIMA os empreendimentos localizados no bioma Mata Atlântica, em zonas de amortecimento de unidades de conservação de proteção integral, em zonas costeiras, em áreas de ocorrência de espécies ameaçadas de extinção e/ou em áreas de endemismo restrito, em locais que gerem impactos socioculturais diretos, em áreas que causem intervenção em APP ou em áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, ou que venham a suprimir uma área acima de 100 hectares, dependendo do tipo de vegetação.

Portanto, de acordo com a Lei Complementar nº 272/2004 e a Resolução CONEMA nº 04/2006, os empreendimentos que entraram em operação até novembro de 2018 (Usinas Assú V e Floresta I a III), independentemente do porte, não eram passíveis de EIA/RIMA, estando em conformidade com a legislação estadual.

O Complexo Solar Serra do Mel, considerando sua potência total, enquadra-se como porte excepcional, e, provavelmente suas usinas não foram enquadradas em nenhuma das situações citadas no art. 4º da IN IDEMA nº 01/2018, sendo passível de estudo simplificado.

Nos estudos simplificados dos empreendimentos Mendubim e Monte Verde, não foram apresentadas as áreas totais que sofrerão intervenção. Nos estudos, é mencionado que haverá supressão da vegetação, mas ressaltam que no local é encontrada uma Caatinga Hiperxerófila, e que não haverá intervenção em APP.

4.1.9 Sergipe

Conforme observado na **Figura 1**, não há nenhum empreendimento em construção e/ou operação no Estado de Sergipe. Os dezesseis (16) empreendimentos que possuem autorização da ANEEL, encontram-se com construção não iniciada (Japaratuba 1, Japaratuba 2, Japaratuba 3, Japaratuba 4, Nova Sergipe 1, Nova Sergipe 1, Nova Sergipe 2, Nova Sergipe 3, Nova Sergipe 4, Nova Sergipe 5, Nova Sergipe 6, Nova Sergipe 7, Nova Sergipe 8, Nova Sergipe 9, Nova Sergipe 10, Nova Sergipe 11 e Poço da Areia) e totalizam uma potência outorgada de 732.488 MW.

Não foi encontrada uma legislação específica no Estado para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar. A Lei nº 8.497/2018, alterada pela Lei nº 8.607/2019, dispõe sobre o procedimento de licenciamento ambiental em Sergipe, enquadrando dentro da atividade de geração de energia apenas os empreendimentos eólicos, hidráulicos e termoeletrônicos.

Apesar da não existência de normas específicas, no site do órgão ambiental (<https://www.adema.se.gov.br/eia-rima/>), está disponível para download o RIMA do Complexo Solar Nova Sergipe (engloba as usinas Nova Sergipe 1 a 8), atualmente com construção não iniciada, de acordo com os dados da ANEEL. No relatório, não é mencionado a legislação estadual que o empreendimento foi enquadrado como de significativo impacto ambiental.

4.2 Estudos ambientais

Conforme apresentado no tópico anterior, dos 294 empreendimentos em construção e operação no Nordeste, foram encontrados estudos ambientais de apenas 87 empreendimentos (29,6%). Desses, 69 empreendimentos elaboraram Estudos de Impacto Ambiental e 18 elaboraram Relatórios Ambientais Simplificados. A porcentagem dos empreendimentos com estudos ambientais encontrados por Estado é apresentada na **Figura 16**.

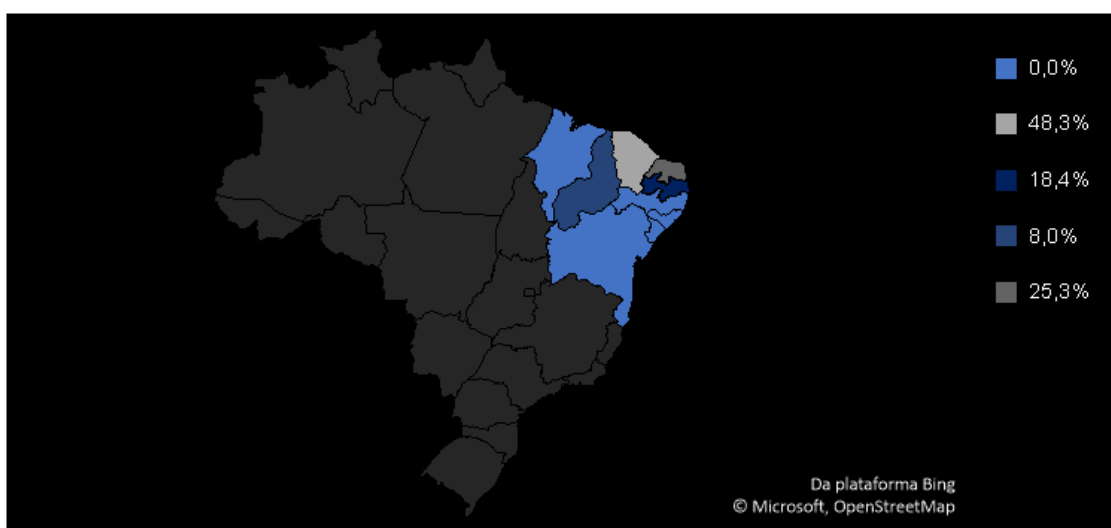


Figura 16 - Porcentagem de estudos ambientais encontrados para usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação nos Estados da região Nordeste do Brasil.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No total foram analisados 14 estudos ambientais referentes aos 87 empreendimentos, sendo 12 Estudos de Impacto Ambiental e 2 Relatórios Ambientais Simplificados. O número de estudos ambientais é inferior ao de empreendimentos, pois, em alguns casos, usinas fotovoltaicas contíguas compõem complexos fotovoltaicos, para os quais foi realizado um único estudo ambiental por complexo. Na **Figura 17** são apresentados os estudos ambientais dos empreendimentos analisados para identificar e avaliar os impactos ambientais gerados nas diferentes fases de usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada.

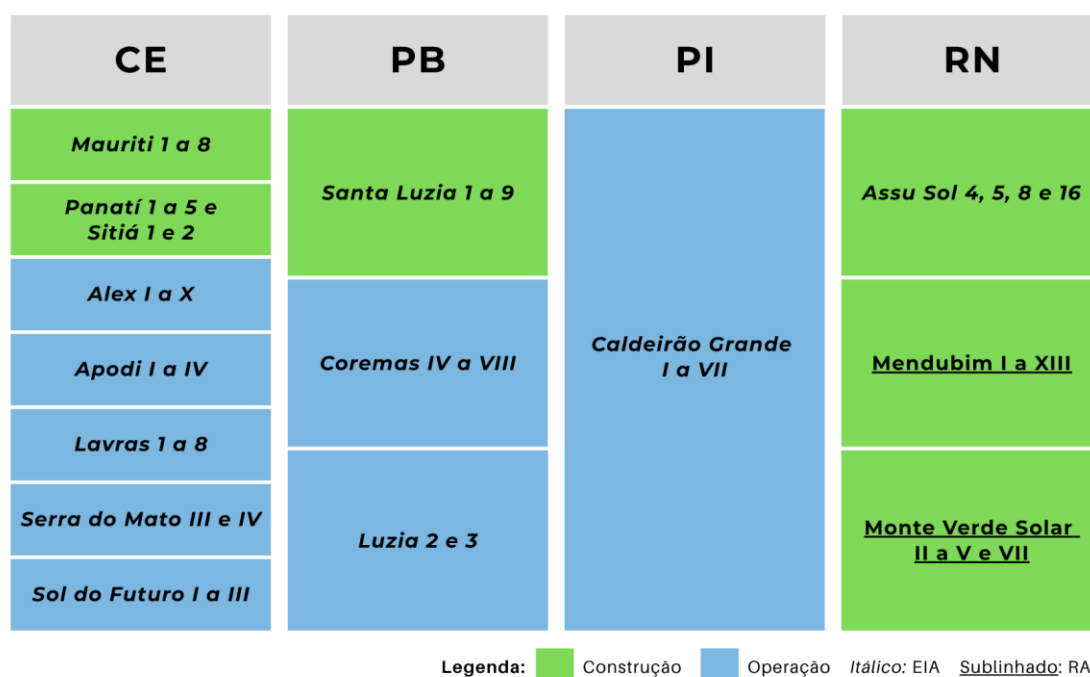


Figura 17 - Estudos ambientais encontrados das usinas solares fotovoltaicas em construção e em operação nos Estados do Nordeste, utilizados para a identificação e análise dos impactos ambientais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Identificação dos impactos ambientais

A fase de planejamento, que antecede a instalação do empreendimento, foi abordada em 10 estudos ambientais, os quais forneceram uma base sólida para a

avaliação dos impactos. Em geral, esta etapa limita-se à coleta de dados para a obtenção da Licença Prévia e à formação de expectativas na população local. Expectativas que podem ser tanto positivas (como a antecipação de empregos, dinamização econômica e atração de turistas), quanto negativas (como o receio de não contratação de mão de obra local e o aumento do tráfego e da pressão sobre os serviços).

Apenas um estudo apontou o impacto na valorização dos imóveis na área de entorno, sugerindo que, em regiões com infraestrutura mínima, a implantação das usinas pode promover melhorias em acessos e estradas, estimulando o desenvolvimento econômico. Gorayeb, Brannstrom e Meireles (2019) avaliando os impactos socioambientais da implantação de parques eólicos, mencionam que a chegada de empresas em municípios do Rio Grande do Norte e da Bahia elevou o preço da terra.

Quanto à fase de descomissionamento, prevista para ocorrer ao final da vida útil dos módulos fotovoltaicos (geralmente após 25 anos de operação), os impactos foram mencionados em apenas dois estudos. Embora essa etapa seja crucial para a gestão ambiental, os impactos identificados apresentam caráter pontual e ainda estão sendo pouco discutidos nos estudos existentes.

Diante disso, verifica-se que os impactos identificados nos estudos referentes as fases de planejamento e descomissionamento são relativamente discretos, restringindo-se à formação de expectativas e a medidas pontuais de mitigação. Em contrapartida, a fase de implantação se destaca pela intensidade e diversidade dos impactos ambientais, decorrentes de atividades como a supressão da vegetação, terraplanagem, movimentação de equipamentos e montagem das estruturas, ações que transformam a paisagem e afetam significativamente os meios físico, biótico e socioeconômico.

A **Figura 18** apresenta os impactos identificados em pelo menos dois estudos ambientais. A partir deste ponto, os resultados serão subdivididos por meio ambiental (físico, biótico e socioeconômico) para uma análise mais direcionada e crítica dos efeitos observados e das medidas mitigadoras propostas.

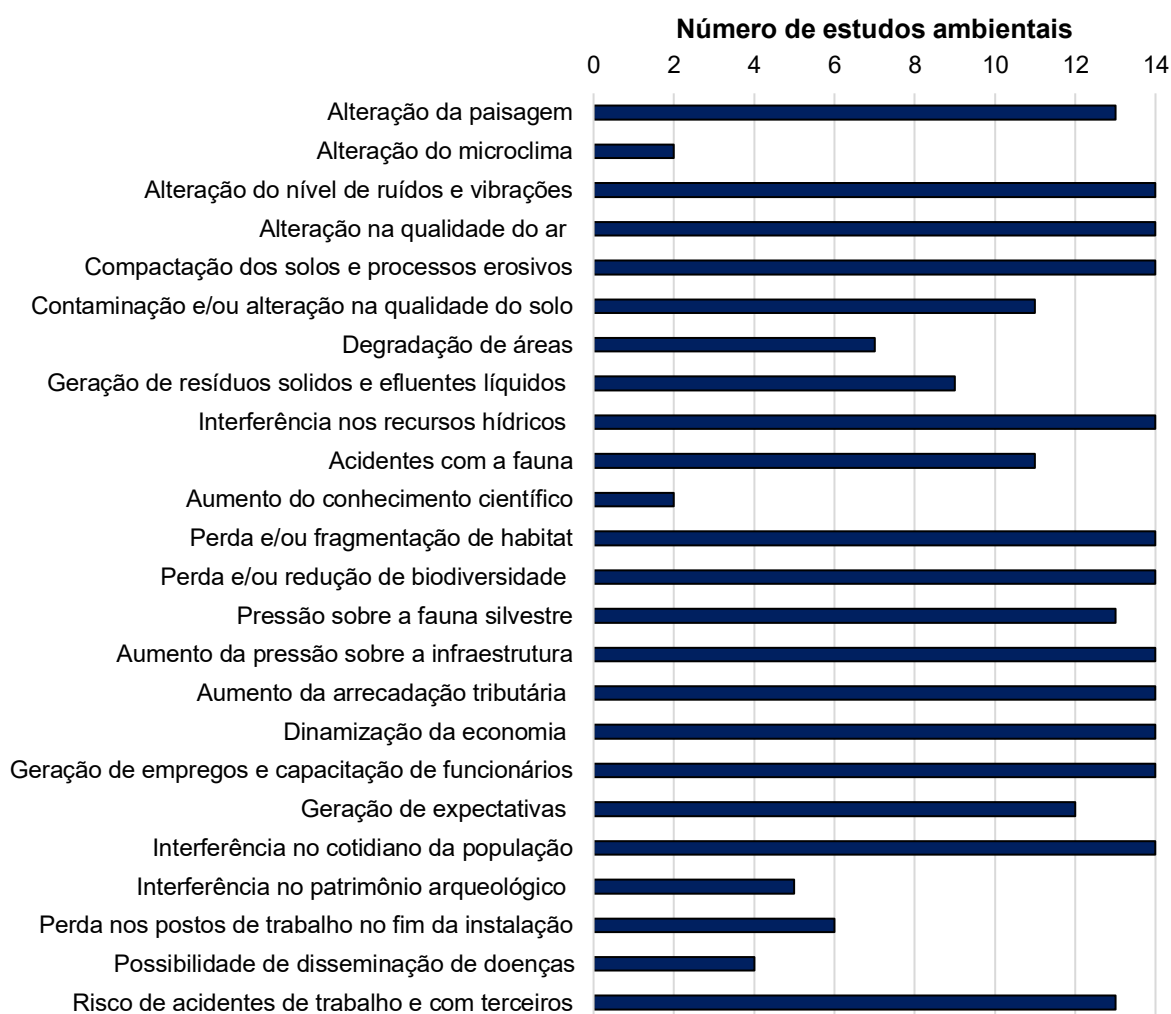


Figura 18 - Impactos ambientais identificados nos estudos ambientais das usinas solares fotovoltaicas, englobando os meios físico, biótico e socioeconômico.

4.2.1.1 Meio Físico

A alteração de paisagem é mencionada em 93% dos estudos ambientais, sendo um dos principais impactos ambientais associados a implantação de usinas fotovoltaicas, pois as atividades de supressão da vegetação, mudanças no relevo do terreno e instalação dos módulos fotovoltaicos e estruturas associadas resultam na mudança visual da paisagem.

O meio físico é o mais afetado pela alteração da paisagem, mas em 71% dos estudos ambientais analisados, este impacto é abordado no meio socioeconômico, especialmente devido a alteração na percepção. Ioannidis e Koutsoyiannis (2020)

mencionam que o impacto da paisagem exige uma análise multidisciplinar pois possui uma natureza dupla, ou seja, incidi tanto no meio físico, quanto no meio socioeconômico, englobando variáveis que podem ser quantificadas objetivamente e variáveis qualitativas mais subjetivas.

Ioannidis e Koutsoyiannis (2020) relatam ainda que este impacto causou, no curto prazo, atrasos e cancelamentos de projetos de energias renováveis em vários países do mundo. De acordo com Kohsaka e Kohyama (2023), no Japão, a instalação de turbinas eólicas e usinas solares fotovoltaicas estão sendo contestada em várias partes do país, sendo os elementos da paisagem um dos fatores que motivam oposições locais.

A alteração do nível de ruídos e vibrações é um dos impactos mencionados em todos os estudos ambientais, pois independentemente do porte da usina fotovoltaica, durante à execução das atividades que fazem parte da etapa construtiva, como supressão vegetal, terraplanagem, transporte de materiais e montagem das estruturas, há movimentação e operação de máquinas e veículos. Este impacto se intensifica em algumas horas do dia e cessa após o encerramento das atividades.

Bošnjakovic *et al.* (2023) destacam que a poluição sonora é um impacto ambiental relevante na instalação de usinas solares fotovoltaicas, com níveis de ruído e frequência variando conforme o tipo, o porte e a localização do sistema fotovoltaico. Independentemente dessas variáveis, porém, é essencial que o projeto e a operação das usinas estejam em conformidade com as regulamentações nacionais e locais sobre ruído.

A alteração de ruído é mais expressiva na etapa de instalação, mas ocorre em menor intensidade durante a operação e manutenção de um sistema fotovoltaico, não representando, no geral, um problema significativo em usinas solares fotovoltaicas, conforme destacado por Bošnjakovic *et al.* (2023). Após construído, as principais fontes de ruído são os inversores, transformadores e rastreadores (TAWALBEH *et al.*, 2021).

O impacto de alteração na qualidade do ar é mencionado em todos os estudos ambientais analisados, sendo inevitável sua ocorrência durante a implantação do

empreendimento. Com as atividades de supressão vegetal, nivelamento do terreno, abertura e fechamento de valas, trânsito e operação de veículos, máquinas e equipamentos há emissões de material particulado, especialmente de poeira e gases de combustão.

As alterações na qualidade do ar podem ser prejudiciais tanto a saúde humana como ao meio ambiente. A exposição excessiva de pessoas em locais com poluição atmosférica pode resultar em problemas na saúde, especialmente doenças respiratórias (BOSCA, 2021). O acúmulo de partículas nas folhas das plantas pode dificultar o processo de fotossíntese e trocas gasosas, como também causar outras alterações, conforme mencionado no trabalho de Costa, Schaidhauer e Melo Jr (2023).

A compactação dos solos, o desencadeamento e/ou acentuação de processos erosivos é o impacto resultante principalmente da remoção da vegetação, do preparo da terra e da movimentação de máquinas pesadas. Este impacto, é abordado em todos os estudos analisados.

A retirada da vegetação diminui a proteção natural do solo contra as chuvas e o fluxo de água. Na atividade de terraplanagem ocorrem os deslocamentos de terra necessários para o nivelamento do terreno (corte, aterro e/ou empréstimo), visando prepará-lo para viabilizar a instalação das bases para receber os módulos fotovoltaicos e demais estruturas, removendo a camada superficial do solo, expondo-o à ação de chuvas e ventos. Estas ações facilitam o início de processos erosivos e/ou intensifica-os.

Durante a execução das atividades de supressão da vegetação e terraplanagem, bem como das demais etapas construtivas há movimentação intensa de máquinas e veículos, especialmente maquinários pesados como tratores, perfuratrizes e caminhões, que resultam na compactação do solo. Segundo De Sá e Santos Jr (2005), a compactação reduz a infiltração e a porosidade do solo, deixando-o susceptível a erosão, o que aumenta o escoamento superficial da água.

O impacto de contaminação e/ou alteração na qualidade do solo é abordado em 79% dos estudos ambientais. Este impacto apresenta probabilidade de ocorrência,

mas pode ser evitado e apenas ocorrer em casos de derramamento de óleos e combustíveis, gerenciamento incorreto de resíduos sólidos, efluentes líquidos e materiais perigosos e/ou uso inadequado de produtos químicos.

Com a operação de máquinas e veículos pesados pode ocorrer vazamentos acidentais com óleo diesel, lubrificantes e outros fluidos, contaminando o solo com hidrocarbonetos. O armazenamento e o descarte inadequado de resíduos gerados na obra também podem contaminar o solo, pois de acordo Gouveia e Prado (2010), a decomposição da matéria orgânica presente no resíduo resulta na formação de chorume.

A retirada da vegetação nativa para instalação dos módulos fotovoltaicos, abertura de estradas e construção das demais estruturas, a movimentação de terra e nivelamento da área e a compactação do solo pelo uso de máquinas pesadas causam degradação dos solos. Este impacto foi mencionado em metade dos estudos ambientais e tem relação direta com outros impactos como compactação, erosão e contaminação.

Müller, Margaret Oliver e Siebe (2023) mencionam que a degradação dos solos é um grande problema mundial, onde, os processos de degradação física e biológica incluem perdas da estrutura do solo e de matéria orgânica, respectivamente. A ocorrência desses dois processos de degradação é visivelmente observada na etapa construtiva de uma usina fotovoltaica de grande porte, devido a remoção da biomassa vegetal e atividades de movimentação e compactação de solo.

Com a construção e operação de canteiros de obras e/ou áreas de apoio para início das atividades em uma usina fotovoltaica, há geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos. Desta forma, variando os tipos e quantidades de resíduos e efluentes gerados, esse impacto também deverá ocorrer na implantação de usinas.

Ao analisar as atividades geradoras de resíduos sólidos em uma usina fotovoltaica, conclui-se que podem ser gerados: solo contaminado por óleos e/ou hidrocarbonetos, devido a ocorrência de vazamento durante a operação de máquinas, equipamentos e veículos; resíduos de materiais de construção, como cimento, restos de madeira e aço, resultante da construção de bases de concreto para os painéis

solares, estruturas de apoio e fundações; resíduos de plástico, papelão e madeira, pois geralmente os equipamentos e materiais de construção vem embalados com esses tipos de materiais; resíduos metálicos, provenientes de estruturas de suporte e fixação, cabos e conexões elétricas e equipamentos de construção.

Em relação aos efluentes líquidos, com a presença dos funcionários no local da construção da usina fotovoltaica, há geração de efluentes sanitários. Durante as obras, também pode ocorrer geração de efluentes que contém graxas, óleos, restos de combustível por meio de lavagem de equipamentos e veículos no local e/ou com o uso de água em processos de construção, como preparação de concreto.

A má gestão dos resíduos e efluentes gerados pode impactar não apenas o meio ambiente, como também à saúde e o bem-estar humano. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010, traz o conceito de responsabilidade compartilhada como princípio essencial na gestão de resíduos, sendo indiscutível a responsabilidade do empreendimento (consumidor) em garantir a correta destinação final dos resíduos gerados.

Santos (2012) ressalta que o tema ainda é visto como um dos maiores problemas enfrentados pela sociedade na busca do desenvolvimento sustentável. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023 (ABREMA, 2023), pouco se tem avançado na adequação do manejo dos resíduos sólidos no Brasil, onde, estima-se que, em 2022, foram gerados cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção civil e demolição no Brasil.

A supressão da vegetação, terraplanagem, operação de máquinas, equipamentos e veículos, escavação de valas, lançamento de cabos e reaterro de valas são as atividades principais que poderão interferir nos recursos hídricos de diversas maneiras. Este impacto sempre irá ocorrer durante a fase de implantação, variando sua magnitude (intensidade) e a forma como os recursos hídricos serão afetados.

Os padrões de escoamento e o fluxo natural da água podem ser alterados com a terraplanagem do terreno e construção de acessos e estradas, a movimentação de solo e ausência de cobertura vegetal. Sedimentos podem ser transportados para

cursos de água e seus afluentes assoreando-os e afetando a quantidade e qualidade da água. A disposição e descarte inadequado de resíduos sólidos e efluentes líquidos e a lavagem de equipamentos e veículos de forma irregular podem contaminar corpos d'água. Ainda, a utilização de água durante as atividades de construção, pode exercer pressão sobre os recursos hídricos da região e afetar a disponibilidade.

Durante a operação, a interferência nos recursos hídricos é significativamente reduzida, uma vez que, espera-se que a usina apresente sistemas de drenagem e técnica de controle a erosão consolidados. A pressão sobre os recursos hídricos da região irá perdurar, devido a necessidade de uso de água para lavagem dos módulos fotovoltaicos. Bošnjakovic *et al.* (2023) mencionam que a quantidade de água necessária para a limpeza dos módulos varia de acordo com o tipo de tecnologia fotovoltaica empregada e a localização da usina.

De maneira geral, Bošnjakovic *et al.* (2023) concluíram que o consumo de água ao longo do ciclo de vida de uma usina fotovoltaica é relativamente baixo e não representa um impacto significativo. No entanto, os autores destacam que o uso de água para a lavagem dos módulos durante a operação da usina e para processos de reciclagem pode demandar grandes volumes, o que pode afetar tanto a disponibilidade quanto a qualidade dos recursos hídricos, especialmente em regiões com escassez de água.

Tawalbeh *et al.* (2021) relatam que o consumo de água durante os processos de fabricação e reciclagem dos módulos fotovoltaicos é significativamente superior ao consumo na etapa de operação. Jin *et al.* (2019) destacam que, embora existam estudos sobre o uso de água, esses dados muitas vezes não são confiáveis devido a inconsistências nas medições. Os autores afirmam que dados precisos sobre o consumo de água são essenciais tanto para a transição para fontes de energia renovável quanto para a implementação eficaz de medidas de conservação hídrica.

4.2.1.2 Meio Biótico

O impacto relacionado à acidentes com fauna foi abordado em 79% dos estudos ambientais e apresenta ocorrência provável, mas não certa. A remoção da

vegetação, abertura de acessos, operação de máquinas, equipamentos e veículos e transporte de materiais e insumos são as principais atividades geradoras deste impacto.

A execução da supressão da vegetação com motosserras ou máquinas pesadas, resulta na eliminação de habitats e rotas de abrigo, forçando os animais migrarem para novas áreas, aumentando o risco de acidentes. A movimentação de máquinas, equipamentos e veículos aumentam o risco de atropelamentos de animais, e os ruídos e vibrações podem desorientar e estressar os animais, alterando seus comportamentos naturais e expondo-os a mais riscos.

O impacto de perda e/ou fragmentação de habitat foi abordado em todos os estudos ambientais, uma vez que, a implantação de usinas fotovoltaicas não se restringe a áreas desértica, havendo remoção de cobertura vegetal natural, principal fator que incide sobre este impacto.

No geral, quando se refere a geração centralizada são utilizadas grandes extensões de áreas, que além de remover a vegetação e eliminar habitat naturais para a fauna local, a fragmentação de áreas vegetadas e instalação das estruturas associadas, criam barreiras entre as áreas com vegetação, impedindo o deslocamento e dispersão de espécies. A construção de barreiras físicas para proteção e segurança da usina fotovoltaica, como cercas e muros, também podem reduzir a movimentação de animais e criar áreas de isolamento.

Vandergast *et al.* (2013) mencionam que o aumento da produção de energia renovável terá inúmeros benefícios, especialmente na redução das emissões de gases de efeito estufa, mas a perda e fragmentação de habitat podem impactar negativamente a vida selvagem local. A fragmentação e o isolamento podem levar à perda de diversidade genética e ao aumento da divergência entre os locais (VANDERGAST *et al.*, 2013), redução da riqueza e densidade de espécies, deslocamento de populações de animais (BOŠNJAKOVIC *et al.*, 2023), na intensificação das competições (AURÉLIO, 2016) e aumento do risco de extinção local de populações animais e vegetais (BARBOSA, 2024).

A perda e fragmentação de habitat representam um impacto direto e significativo na perda e redução da biodiversidade, impacto também abordado em todos os estudos ambientais. No contexto das atividades de instalação de usinas fotovoltaicas, essas alterações levam à remoção de áreas essenciais onde diversas espécies realizam atividades vitais, como abrigo, alimentação e reprodução. A fragmentação dos habitats restringe o movimento das espécies, isola populações e compromete a troca genética, fatores que, juntos, aumentam a vulnerabilidade das espécies e elevam o risco de extinção.

A pressão exercida sobre a fauna durante as atividades de instalação de usinas fotovoltaicas é evidente e significativa. Conforme discutido nos parágrafos anteriores, fatores como o ruído excessivo, a presença humana intensa, a modificação e remoção de habitats, e as alterações no solo causam o afugentamento e fuga de diversas espécies das áreas impactadas. Este impacto, abordado em 93% dos estudos ambientais analisados, está intrinsecamente relacionado a outros efeitos negativos sobre o meio biótico, revelando uma interdependência entre os diferentes fatores ambientais.

Outro aspecto analisado, mas presente em apenas um estudo, é o impacto da intensificação da luminosidade noturna que pode ocorrer em casos de atividades durante o período noturno. A alteração nos níveis de luminosidade afeta especialmente as espécies de hábitos noturnos, uma vez que a interferência nos padrões de luz natural pode desencadear mudanças comportamentais (ROCHA; FREITAS, 2022). Além disso, conforme mencionado por Hölker *et al.* (2010), a exposição à luz artificial pode prejudicar funções fisiológicas, orientação e comunicação, impactando diretamente a saúde e aumentando o risco de predação, o que compromete a sobrevivência das populações locais.

Em dois estudos ambientais foram abordado o impacto do aumento do conhecimento científico, lembrando que a coleta sistemática de dados dentro de usinas fotovoltaicas desempenha um papel fundamental para a compreensão e otimização dos impactos ambientais, sociais e operacionais associados a esses empreendimentos. Esse processo, além de auxiliar no monitoramento contínuo e na manutenção de programas ambientais voltados para a fauna e flora locais, fornece

uma base robusta para a análise científica e a melhoria dos sistemas de geração de energia.

Adicionalmente, a disponibilização dos dados coletados dentro dos empreendimentos em forma de artigos científicos e relatórios técnicos representa uma contribuição significativa para o avanço do conhecimento em energias renováveis. A publicação desses resultados permite que pesquisadores de diversas áreas utilizem essas informações para estudar questões relacionadas à eficiência energética, ao aprimoramento tecnológico e ao impacto ambiental das usinas fotovoltaicas.

Esse compartilhamento de dados favorece a transparência e possibilita o engajamento da comunidade local, ampliando a conscientização e o apoio à transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Dessa forma, a coleta e divulgação de dados gerados nas usinas solares se configuram não apenas como uma prática de gestão interna, mas como uma estratégia de disseminação de conhecimento que fortalece a pesquisa científica e a política ambiental.

4.2.1.3 Meio Socioeconômico

A implantação de uma usina fotovoltaica gera oportunidades de empregos diretos e indiretos e capacita funcionários, promovendo um impacto positivo significativo nas comunidades locais. Este impacto foi documentado em todos os estudos ambientais analisados, evidenciando a relevância desse aspecto socioeconômico.

Conforme o relatório da IRENA (2022), *“Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2022”*, o setor de energias renováveis empregou mais de 12 milhões de pessoas em todo o mundo em 2021. Nesse cenário, o Brasil se destacou como o terceiro maior empregador, respondendo por 10% desses postos de trabalho. A energia solar fotovoltaica se consolidou como a fonte renovável de crescimento mais acelerado, representando mais de um terço da força de trabalho global e gerando 4,3 milhões de empregos.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE, 2012), estudos apontam para uma média de geração de mais de 30

empregos diretos por MW instalado para a fonte solar fotovoltaica, o que é superior à outras fontes como: eólica, hidrelétrica, carvão, gás natural e nuclear.

A fase de construção do empreendimento exige uma força de trabalho diversificada, abrangendo profissionais de diferentes níveis de qualificação, como serventes de obras, pedreiros, carpinteiros, eletricitas, topógrafos, mecânicos, operadores de maquinário, motoristas, biólogos, e engenheiros das áreas elétrica, civil, mecânica, florestal, ambiental, e de segurança do trabalho, além de analistas e outros especialistas.

É esperado que um projeto dessa tipologia priorize a contratação de mão de obra local tanto para funções diretas quanto para serviços de apoio, como alimentação, segurança e transporte, promovendo assim um fortalecimento da economia local. Em casos de empreendimentos de grande porte, pode ser necessário contratar profissionais externos para funções altamente especializadas, no entanto, essa prática é vista como exceção, sendo o objetivo prioritário maximizar as contratações locais.

Além de impulsionar a economia e o mercado de trabalho regional, a priorização da mão de obra local contribui para um relacionamento positivo entre o empreendimento e a comunidade impactada. Esse vínculo ainda pode ser fortalecido por iniciativas de capacitação profissional oferecidas pela empresa, que proporcionam aos trabalhadores habilidades e qualificações úteis, aumentando sua empregabilidade após a conclusão do projeto.

A qualidade dos empregos é tão importante quanto a sua quantidade (IRENA, 2022). Por isso, o investimento em capacitação por parte do empreendimento, se revela como um importante elemento compensatório, colaborando para mitigar impactos adversos e favorecer o desenvolvimento socioeconômico da região.

Para regiões remotas, sem oportunidades de empregos locais, as usinas fotovoltaicas atuam como uma importante ferramenta do crescimento e melhoria não apenas da população com a geração de empregos e qualificação, mas também da região de maneira geral.

A conclusão da fase de instalação de uma usina fotovoltaica resulta em uma significativa redução de postos de trabalho, o que gera um impacto socioeconômico negativo para a comunidade local. Durante a etapa de operação, as atividades se limitam à manutenção rotineira, como a lavagem dos módulos e o roço da vegetação, exigindo um número reduzido de funcionários. Esse aspecto foi mencionado em 43% dos estudos analisados. Martins e Franco (2019), em sua análise sobre os impactos socioeconômicos da usina solar de Pirapora/MG, destacam que a transição para a fase operacional levou a uma drástica redução de empregos diretos, evidenciando uma lacuna de oportunidades na economia local.

A implantação de um empreendimento também gera uma série de expectativas na comunidade, iniciadas pela divulgação de início das obras e a perspectiva de aumento na oferta de trabalho, crescimento do comércio local e melhorias em infraestrutura e serviços públicos, o que contribui para um sentimento de progresso e melhoria da qualidade de vida. No entanto, ao final da construção, a redução do fluxo de mão de obra e do movimento populacional pode levar a uma sensação de estagnação ou até retrocesso econômico. O impacto de geração de expectativas foi abordado em 86% dos estudos ambientais revisados.

A implantação de uma usina fotovoltaica contribui para o aumento da arrecadação tributária local e estadual, gerando um impacto econômico positivo que pode beneficiar a comunidade. Durante a construção, o Imposto Sobre Serviços (ISS) é aplicado por municípios e contribui para o aumento da arrecadação local. Já o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), gera arrecadações para o Estado.

Mesmo com a redução da geração de empregos, na etapa de operação, a energia gerada e comercializada é tributada com ICMS, resultando em uma fonte de receita contínua para o Estado. Martins e Franco (2019), ressaltam a importância de maiores repasses de ICMS do Estado para o município gerador da energia elétrica, e também da consolidação de legislação específica sobre o tema.

A geração de energia fotovoltaica irá promover uma maior diversificação na matriz energética brasileira, que atualmente é dependente de hidrelétricas (representa

56,2% da Matriz Energética Brasileira), garantindo maior segurança, qualidade e confiança no sistema elétrico nacional (GASPARIN *et al*, 2022; ANEEL, 2023).

Ainda, os funcionários contratados, independente da fase, geram contribuições sociais sobre a folha de pagamento, como o INSS (Instituto Nacional do Seguro Social) e o FGTS (Fundo de Garantia do Tempo de Serviço), e os empresas fornecedores de serviços e produtos também contribuem no aumento da arrecadação e desenvolvimento do comercio local.

A geração de empregos e aumento da renda local, a demanda por serviços e materiais, o aumento da arrecadação e investimento público promovem a dinamização da economia local e regional. O impacto de dinamização da economia foi abordado em todos os estudos ambientais, de maneira positiva para o desenvolvimento da região impactada por uma usina fotovoltaica de geração centralizada.

A implantação de uma usina fotovoltaica de grande porte irá interferir no cotidiano da população, especialmente em comunidades rurais ou pequenos municípios situados na área de influência do empreendimento. Durante a etapa construtiva, o aumento do fluxo de veículos pode afetar a rotina dos moradores locais, que terão que se adaptar aos horários de pico de trânsito para evitar congestionamento. As residências próximas a área do empreendimento poderão ser impactadas com ruídos e vibrações das máquinas e equipamentos e ainda com poeira proveniente da movimentação de terra.

Em estudo realizado por Costa *et al*. (2019), sobre os impactos socioeconômicos decorrentes da implantação de empreendimentos eólicos no Estado do Ceará nas populações adjacentes, os autores constataram que os impactos mais expressivos se relacionam com as interferências no cotidiano das pessoas locais, como a proibição do direito de ir vir pelo local de instalação dos aerogeradores.

O desenvolvimento das atividades de construção e operação, impacta não apenas a população, mas também aumenta a pressão sobre a infraestrutura local. As infraestruturas física e social comumente afetadas são: sistema viário e de transporte, habitação, saneamento, energia elétrica, comunicação, saúde, educação, assistência social e segurança pública.

Esses dois impactos de ocorrência certa (interferência no cotidiano da população e pressão sobre a infraestrutura) são abordados em todos os estudos ambientais analisados. Toledo *et al.* (2018) mencionam que os locais onde são implantados grandes empreendimentos têm seus espaços transformados, com a ocorrência de impactos positivos e negativos.

Com o aumento da população de trabalhadores no local de implantação do empreendimento, especialmente na fase de construção, há riscos de disseminação de doenças, que pode afetar tanto os trabalhadores quanto a população. Por isso, em cada fase do projeto, devem ser adotadas medidas preventivas para garantir a manutenção da saúde dos trabalhadores e da população local, tornando imprescindível o envolvimento do setor de saúde junto as etapas do empreendimento (TOLEDO *et al.*, 2018).

Freitas *et al.* (2015) apresentam um exemplo significativo dos impactos sociais adversos causados por grandes projetos de infraestrutura ao analisar a construção da Usina Hidrelétrica de Belo Monte. Segundo os autores, durante a construção da usina, ocorreu um processo de desorganização social das aldeias locais, aumento da violência, aumento do risco de transmissão de doenças, acidentes de trânsito, poluição e destruição da natureza.

A implantação envolve inúmeras atividades que apresentam riscos de acidentes, tanto para os trabalhadores diretamente envolvidos quanto para terceiros. O impacto é mais expressivo durante a etapa de construção, devido a movimentação constante de pessoas, veículos e equipamento. Na operação, podem ocorrer acidentes dentro do empreendimento, durante a realização de atividades de manutenção.

De acordo com Ellwood *et al.* (2011), a instalação de sistemas de energia solar pode ocasionar uma variedade de riscos ocupacionais, incluindo riscos ergonômicos, físicos e de acidentes. Lima Filho *et al.* (2021) mencionam que outros riscos devem ser levados em consideração, como riscos psicossociais e desafios organizacionais que podem impactar os trabalhadores.

Os riscos de acidentes no trânsito também são aumentados devido ao aumento de circulação de veículos pesados, especialmente em regiões não projetadas para esse tipo de tráfego. Além disso, a pressão exercida sobre a fauna silvestre, somada à remoção de vegetação e à instalação de estruturas, contribui para a possibilidade de acidentes envolvendo animais. Entre esses, destacam-se os incidentes com animais peçonhentos, como cobras, aranhas e escorpiões, que são frequentes em áreas de alteração ambiental e representam riscos adicionais para os trabalhadores e a comunidade próxima.

Em 36% dos estudos ambientais analisados, foi abordado o impacto sobre o patrimônio arqueológico. Informações sobre o patrimônio histórico, cultural, arqueológico e sobre comunidades tradicionais são geralmente incluídas na etapa de diagnóstico do meio socioeconômico dos estudos ambientais, necessária para identificar possíveis impactos do empreendimento nessas áreas. A consideração desses aspectos é uma exigência legal para empreendimentos com potencial de causar impacto ambiental, e os impactos são geralmente incluídos na matriz de impactos ambientais dos empreendimentos apenas após a identificação de interferências diretas nesses bens culturais e arqueológicos ou nas comunidades tradicionais.

A realização de estudos sobre o patrimônio arqueológico é respaldada pela Lei nº 3.924/1961, que visa à proteção dos sítios arqueológicos no território nacional. Além disso, a Instrução Normativa nº 01/2015 do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) regulamenta o processo de licenciamento ambiental, definindo diretrizes para assegurar a preservação do patrimônio arqueológico e estabelecendo procedimentos obrigatórios para a mitigação de impactos sobre esse patrimônio em áreas de intervenção.

As principais leis e convenções internacionais que garantem a proteção das comunidades tradicionais e exigem a realização de estudos e consultas antes de projetos que possam impactá-las, são: Constituição Federal de 1988, Convenção nº 169 da Organização Internacional do Trabalho (OIT), Lei Federal nº 9.985/2000 (Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza), Decreto Federal nº 6.040/2007, Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

4.2.2 Impactos ambientais e ações geradoras

O **Quadro 3** apresenta a sistematização das principais ações e atividades responsáveis pela geração dos impactos ambientais identificados nos estudos analisados. Essas ações distribuem-se ao longo das etapas de desenvolvimento das usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada. Ressalta-se que algumas atividades estão condicionadas às especificidades de cada empreendimento, como é o caso da implantação de subestações e linhas de transmissão associadas, cuja ocorrência depende das características do projeto e da infraestrutura local.

Quadro 3 - Classificação dos impactos ambientais identificados nos estudos analisados, com base em sua frequência de ocorrência, e respectivas ações ou atividades geradoras.

MEIO	IMPACTO AMBIENTAL	OCORRÊNCIA	AÇÕES E ATIVIDADES GERADORAS													
			Levantamento de dados e geração de informações pré-instalação	Contratação e mobilização de mão de obra e serviços	Instalação e operação de canteiros de obras e/ou áreas de apoio	Abertura e/ou adequação de acessos	Transporte de materiais, equipamentos e/ou insumos	Operação de máquinas, equipamentos e/ou veículos	Supressão vegetal	Terraplanagem	Montagem de tracker e módulos fotovoltaicos	Escavação de valas e montagem das demais estruturas	Comissionamento e energização	Desmobilização	Operação e manutenção da usina	Limpeza dos módulos e roço da vegetação
MEIO FÍSICO	Alteração da paisagem	CE														
	Alteração do microclima	IM														
	Alteração do nível de ruídos e vibrações	CE														
	Alteração na qualidade do ar	CE														
	Compactação dos solos, desencadeamento e/ou acentuação de processos erosivos	CE														
	Contaminação e/ou alteração na qualidade do solo	PR														
	Degradação de áreas	PR														
	Geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos	PR														
	Interferência nos recursos hídricos	CE														
MEIO BIÓTCO	Acidentes com a fauna	PR														
	Aumento do conhecimento científico	IM														
	Perda e/ou fragmentação de habitat	CE														
	Perda e/ou redução de biodiversidade	CE														
	Pressão sobre a fauna silvestre	CE														
MEIO SOCIOECONÔMICO	Aumento da pressão sobre a infraestrutura	CE														
	Aumento da arrecadação tributária	CE														
	Dinamização da economia	CE														
	Geração de empregos e capacitação de funcionários	CE														
	Geração de expectativas	CE														
	Interferência no cotidiano da população	CE														
	Interferência no patrimônio arqueológico	PP														
	Perda nos postos de trabalho no fim da instalação	PP														
	Possibilidade de disseminação de doenças	PP														
	Risco de acidentes de trabalho e com terceiros	CE														

Legenda – CE: certa; PR: provável; PP: pouco provável; IM: improvável.

A classificação dos 26 impactos ambientais identificados revelou uma predominância significativa de impactos recorrentes entre os estudos ambientais analisados. Aproximadamente 58% dos impactos ($n = 15$) foram categorizados como de ocorrência certa, evidenciando uma regularidade nos efeitos ambientais atribuídos à implantação de usinas fotovoltaicas centralizadas.

Os impactos classificados como de ocorrência provável corresponderam a 15% do total ($n = 4$), estando presentes em parte considerável dos estudos, mas com variações atribuídas a especificidades locais ou metodológicas. Por sua vez, os impactos pouco prováveis (12%) e improváveis (15%) apresentaram ocorrência limitada, podendo refletir tanto fragilidades no diagnóstico ambiental quanto características ambientais específicas de determinados empreendimentos.

Essa distribuição evidencia a existência de um conjunto consolidado de impactos ambientais com alta previsibilidade, cuja recorrência em estudos distintos aponta para a necessidade de padronização das medidas de controle, mitigação e compensação.

Ao analisar a influência das ações geradoras sob os fatores ambientais, observa-se que a atividade de supressão da vegetação pode impactar todos os fatores ambientais dos meios físico e biótico. Na **Figura 19** é ilustrado de forma aleatória os fatores ambientais afetados.



Figura 19 - Nuvem de palavras representando os fatores ambientais afetados pela atividade de supressão da vegetação, conforme identificados nos estudos analisados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mencionado na etapa de identificação e análise dos impactos ambientais, na implantação de energia fotovoltaica em grande escala sempre ocorrerá a supressão vegetal, seja em maior ou menor proporção, pois os módulos fotovoltaicos são instalados em estruturas fixadas sobre o solo. Em áreas que não possuem vegetação densa ou degradadas, pode ocorrer o corte de árvores isoladas.

A atividade de supressão vegetal está diretamente relacionada a impactos irreversíveis, ou seja, mesmo com a suspensão dessa atividade, não é possível reverter totalmente suas consequências. De acordo com os estudos ambientais analisados, destacam-se como impactos irreversíveis nos meios físico e biótico a alteração da paisagem, a perda de biodiversidade e a fragmentação de habitats, todos associados diretamente à supressão vegetal.

Para mitigar os impactos decorrentes da remoção de vegetação, a legislação ambiental brasileira estabelece a obrigação de compensação pelo volume de matéria-prima extraída, implementada por meio da Reposição Florestal. Essa medida obrigatória visa não apenas compensar a perda de cobertura vegetal, mas também promover a regeneração de áreas degradadas, contribuindo para a sustentabilidade e equilíbrio ambiental nas regiões afetadas.

Além da análise dos impactos ambientais, foram avaliadas as áreas requeridas para a implantação dos empreendimentos. Dos 87 empreendimentos que apresentaram estudos ambientais, foi possível identificar a área total utilizada em 70 deles, resultando em uma média de 2,56 hectares por megawatt (MW) instalado. Bošnjakovic *et al.* (2023), ao examinar a área requerida por usinas fotovoltaicas em sua pesquisa, encontraram uma média de 1,9 ha/MW, com base em cinco empreendimentos situados na Espanha e na Croácia. Nessa amostra, a área necessária variou de 1,3 ha/MW a 2,6 ha/MW.

Com a média de área encontrada através da análise dos estudos ambientais, estima-se que as usinas fotovoltaicas em construção ocuparão uma área total de aproximadamente 10.663,02 hectares. Os empreendimentos atualmente em operação na região Nordeste, provavelmente ocupam uma área total de aproximadamente 16.746,26 hectares. De acordo com a potência outorgada, os

empreendimentos com construção não iniciada ocuparão área de quase 200 mil hectares.

É importante destacar que para realização desde estimativa não foi levado em consideração a potência dos módulos fotovoltaicos utilizados pelos empreendimentos, apenas a relação de área média e potência outorgada. Como o setor solar fotovoltaico cresce consideravelmente em todo o mundo, a tecnologia dos módulos fotovoltaicos também avança rapidamente, melhorando cada vez mais a eficiência dos módulos, conforme relatado por Srinivasan (2005), Chen *et al.* (2023), Ogundipe, Okwandu e Abdulwaheed (2024) e Hu *et al.* (2024).

Melhorias na eficiência fotovoltaica contribuem diretamente para um melhor desempenho, permitindo que mais energia seja gerada a partir da mesma quantidade de luz solar (LOUWEN; VAN SARK; MOOR, 2021), ou seja, há aumento da produtividade por unidade de área, o que, conseqüentemente resulta na redução da área total de uma usina fotovoltaica.

Ogundipe, Okwandu e Abdulwaheed (2024) citam que entre os avanços mais significativos estão as células fotovoltaicas de alta eficiência, incluindo células solares de múltiplas junções, células traseiras de emissor passivado e células solares bifaciais. Por exemplo, as células solares bifaciais demonstraram ganhos de eficiência de até 30% em comparação com as células monofaciais tradicionais (SUN *et al.*, 2018; OGUNDIPE; OKWANDU; ABDULWAHEED, 2024).

Assim, com o avanço contínuo da tecnologia fotovoltaica e o aumento da eficiência e potência dos módulos, espera-se uma redução progressiva na área média necessária para a instalação de 1 MW de capacidade de energia solar. Esse desenvolvimento tecnológico não só diminui a necessidade de grandes áreas, como também possibilita um menor impacto ambiental e maior viabilidade para a expansão de usinas fotovoltaicas em regiões de espaço limitado.

Com base nos temas discutidos, no tópico seguinte são propostas medidas mitigadoras ou potencializadoras para cada impacto ambiental identificado nos estudos ambientais.

4.2.3 Medidas mitigadoras e potencializadoras dos impactos ambientais

Diante dos impactos ambientais identificados, a implementação de medidas mitigadoras, tanto preventivas quanto corretivas e compensatórias, é essencial para minimizar os danos aos meios físico, biótico e socioeconômico. No entanto, além da mitigação dos impactos negativos, o planejamento ambiental deve englobar também ações que potencializem os benefícios do empreendimento para a economia local, a infraestrutura e a conservação ambiental.

O **Quadro 4** apresenta um conjunto de medidas propostas para mitigar impactos adversos e potencializar efeitos positivos, de forma a promover um licenciamento mais sustentável e alinhado com boas práticas ambientais e sociais. As medidas foram elaboradas considerando a análise dos impactos identificados nos estudos ambientais dos empreendimentos. Para orientar a categorização funcional dessas medidas, elaborou-se a **Tabela 8**, que sistematiza os tipos de ação, suas siglas, cores aplicadas e respectivas descrições.

Tabela 8 - Tipologia funcional das medidas ambientais utilizadas neste estudo, com respectivas siglas, codificação por cores e descrições. Esta tabela serve como orientação para a categorização aplicada no **Quadro 4**, que apresenta as medidas ambientais propostas por impacto identificado.

Categoria da medida	Sigla	Cor aplicada	Descrição
Preventiva	PRE		atua antes do impacto ocorrer
Corretiva	COR		age após o impacto, buscando mitigar
Compensatória	COM		repara danos que não puderam ser evitados
Potencializadora	POT		amplia benefícios ou fortalece outras medidas

Quadro 4 - Medidas ambientais mitigadoras e potencializadoras propostas no presente estudo, com base nos impactos ambientais identificados na análise dos estudos ambientais.

MEIO	IMPACTO AMBIENTAL	MEDIDAS MITIGADORAS OU POTENCIALIZADORAS PROPOSTAS	CLASSIFICAÇÃO
FÍSICO	Alteração da paisagem	1. Implantar projetos de reposição florestal pós-instalação;	COM
		2. Planejar a implantação das estruturas de modo a integrar-se ao entorno;	PRE
		3. Manter e preservar área de preservação ao redor da usina, como Reserva Legal e Área de Preservação Permanente;	PRE
		4. Restaurar área de preservação ao redor da usina, como Reserva Legal e Área de Preservação Permanente;	POT
		5. Criar corredores de vegetação e/ou áreas de preservação ao redor da usina	POT
		6. Promover a restauração/recuperação das áreas afetadas para minimizar o impacto visual	COR
	Alteração do nível de ruídos e vibrações	1. Programar atividades mais ruidosas em horários de menor sensibilidade	PRE
		2. Utilizar equipamentos com baixa emissão de ruídos e realizar manutenção periódica;	PRE
		3. Monitorar constantemente os níveis de ruído e vibração, ajustando os processos conforme necessário	POT
	Alteração na qualidade do ar	1. Implementar sistemas umectação para reduzir a dispersão de poeira durante a construção;	PRE
		2. Utilizar equipamentos de baixa emissão e garantir manutenção regular dos veículos e maquinários;	PRE
		3. Monitorar a qualidade do ar e adotar medidas corretivas imediatas se os níveis ultrapassarem os limites estabelecido.	POT
	Compactação dos solos, desencadeamento e/ou acentuação de processos erosivos	1. Conformar a topografia do terreno para evitar inclinações acentuadas;	PRE
		2. Implantar sistemas de drenagem eficientes;	PRE
		3. Reduzir o tráfego de máquinas pesadas por meio de rotatividade e uso de pavimentação temporária;	PRE
		4. Aplicar técnicas de descompactação;	COR
		5. Utilizar geotêxteis e/ou coberturas vegetais para proteger o solo;	PRE
		6. Monitorar continuamente a compactação do solo e a eficácia das medidas implementadas.	POT
	Contaminação e/ou alteração na qualidade do solo	1. Armazenar e descartar adequadamente resíduos sólidos e efluentes líquidos;	PRE
		2. Armazenar corretamente produtos perigosos e/ou químicos	PRE
		3. Treinar e capacitar as equipes para prevenção e resposta a vazamentos e derramamentos	PRE
		4. Desenvolver planos de emergência para ações imediatas em caso de contaminação	COR
	Degradação de áreas	1. Restringir o acesso a áreas sensíveis e de preservação durante e após a implantação	PRE
		2. Recuperar as áreas degradadas, com replantio de espécies nativas e controle da erosão	COR
		3. Monitorar os indicadores de qualidade ambiental da área para ajustes no plano de recuperação.	POT
	Geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos	1. Adotar práticas de redução, reutilização e reciclagem de resíduos gerados durante a implantação	PRE
		2. Realizar segregação, armazenamento e descarte adequado dos resíduos	PRE
		3. Promover treinamento contínuo sobre gerenciamento de resíduos para todos os envolvidos	POT
	Interferência nos recursos hídricos	1. Desenvolver sistemas de drenagem e contenção que evitem a contaminação de corpos d'água;	PRE
		2. Monitorar a qualidade da água nos pontos críticos próximos à área de implantação;	POT

		3. Implementar tecnologias de reuso e captação de água para minimizar o consumo e o impacto no ambiente	POT
		4. Preservar e restaurar as zonas ripárias e áreas de preservação permanente	PRE
		5. Implementar ações de remediação, como barreiras físicas ou técnicas de biorremediação, para mitigar contaminações nos recursos hídricos	COR
BIÓTICO	Acidentes com a fauna	1. Delimitar corredores ecológicos e instalar cercas de proteção em áreas sensíveis	PRE
		2. Sinalizar e monitorar as rotas de migração de animais	PRE
		3. Capacitar os trabalhadores para identificar e evitar situações de risco para a fauna	POT
		4. Desenvolver um protocolo de resposta rápida para acidentes envolvendo animais	COR
	Aumento do conhecimento científico	1. Estimular parcerias com instituições de pesquisa para monitoramento ambiental contínuo	POT
		2. Criar bancos de dados e incentivar a publicação dos resultados obtidos durante as fases de instalação e operação	POT
		3. Promover eventos e seminários que divulguem os avanços e desafios do setor, contribuindo para a melhoria contínua das práticas ambientais	POT
	Perda e/ou fragmentação de habitat	1. Realizar estudos detalhados para identificar áreas de alto valor ecológico e evitar a instalação em zonas críticas	PRE
		2. Manter e preservar área de preservação ao redor da usina, como Reserva Legal e Área de Preservação Permanente	PRE
		3. Restaurar área de preservação ao redor da usina, como Reserva Legal e Área de Preservação Permanente	POT
		4. Criar e preservar corredores ecológicos para manter a conectividade entre habitats	PRE
		5. Implementar compensações ambientais, como reposição florestal e recuperação de áreas degradadas	COM
		6. Monitorar a integridade dos habitats e promover ações de restauração ecológica quando necessário	POT
	Perda e/ou redução de biodiversidade	1. Manter e preservar área de preservação ao redor da usina, como Reserva Legal e Área de Preservação Permanente	PRE
		2. Restaurar área de preservação ao redor da usina, como Reserva Legal e Área de Preservação Permanente	POT
		3. Implementar programas de resgate e monitoramento da flora e fauna local	COR
		4. Promover a recuperação de espécies nativas	COR
		5. Evitar a introdução de espécies exóticas invasoras	PRE
		6. Desenvolver parcerias com ONGs e instituições de pesquisa para ações de conservação	POT
	Pressão sobre a fauna silvestre	1. Implementar medidas de controle de ruídos e vibrações que possam perturbar a fauna	PRE
		2. Implementar programas de afugentamento, resgate e monitoramento da fauna	COR
		3. Definir previamente áreas de soltura para a fauna resgatada, com características ecológicas semelhantes à vegetação suprimida	COM
		4. Programar as atividades de implantação para evitar períodos críticos (ex.: reprodução ou migração)	PRE
SOCIOECONÔMICO	Aumento da pressão sobre a infraestrutura	1. Coordenar com órgãos públicos e privados para planejar a melhoria e ampliação da infraestrutura local	COM
		2. Desenvolver um plano logístico que minimize o impacto sobre o tráfego e os serviços públicos durante a implantação	PRE
		3. Estabelecer cronogramas e rotinas que permitam a absorção temporária do aumento de demanda sem prejudicar a comunidade	PRE
	Aumento da arrecadação tributária	1. Garantir que os recursos gerados sejam revertidos em melhorias para a comunidade	POT
		2. Estabelecer canais de transparência e controle social sobre o uso dos recursos arrecadados	POT

		3. Promover parcerias entre governo e setor privado para potencializar os investimentos em infraestrutura e serviços.	POT
	Dinamização da economia	1. Incentivar a contratação de mão de obra local e a capacitação profissional 2. Fomentar parcerias com empresas e instituições locais para impulsionar a economia regional 3. Estabelecer políticas de incentivo a novos negócios que possam surgir a partir do desenvolvimento da usina	POT POT POT
	Geração de empregos e capacitação de funcionários	1. Desenvolver parcerias com instituições de ensino e órgãos de qualificação profissional 2. Priorizar a contratação de trabalhadores locais e promover capacitações e treinamentos para as necessidades do empreendimento 3. Implementar programas de atualização e reciclagem profissional contínua	POT POT POT
	Geração de expectativas	1. Realizar audiências públicas e encontros periódicos com a comunidade para alinhar expectativas 2. Divulgar informações transparentes e realistas sobre os prazos e benefícios do empreendimento 3. Monitorar a comunidade e ajustar as estratégias de comunicação conforme necessário	PRE PRE POT
	Interferência no cotidiano da população	1. Planejar e gerenciar o fluxo de veículos e a mobilização de trabalhadores, evitando congestionamentos e interrupções prolongadas 2. Estabelecer horários de trabalho que minimizem os impactos no cotidiano da população 3. Desenvolver planos de contingência para eventuais transtornos, com compensações ou melhorias em serviços locais.	PRE PRE COR
	Interferência no patrimônio arqueológico	1. Realizar estudos arqueológicos prévios e mapear os sítios de interesse antes do início das obras 2. Estabelecer medidas de proteção específicas (cercas, sinalização, vigilância) nas áreas identificadas como sensíveis 3. Elaborar planos de compensação e preservação em conjunto com órgãos responsáveis e especialistas	PRE PRE COM
	Perda nos postos de trabalho no fim da instalação	1. Planejar a transição dos trabalhadores para outras funções ou projetos, oferecendo por exemplo cursos de requalificação 2. Firmar parcerias com empresas locais para absorver a mão de obra excedente 3. Incentivar a permanência de funcionários por meio de programas e desenvolvimento de carreira	COM COM POT
	Possibilidade de disseminação de doenças	1. Implementar rigorosos protocolos de higiene e medidas preventivas, como disponibilização de EPIs e áreas de higienização 2. Contratar e manter médicos e/ou enfermeiros do trabalho 3. Promover campanhas e coordenar a publicação de material educativo 4. Realizar monitoramento periódico da saúde dos colaboradores 5. Estabelecer um plano de resposta rápida em caso de surto	PRE PRE POT POT COR
	Pressão sobre a segurança hídrica	1. Implantar sistemas de captação, reuso e economia de água, integrando tecnologias que reduzam a demanda hídrica 2. Monitorar o consumo e a qualidade da água nos pontos críticos 3. Implementar medidas para evitar a contaminação dos corpos d'água, como tratamento adequado dos efluentes e controle do escoamento superficial	PRE POT PRE
	Risco de acidentes de trabalho e com terceiros	1. Desenvolver e implementar um plano abrangente de segurança do trabalho, com treinamentos periódicos e simulações de emergência 2. Garantir o uso rigoroso de EPIs e sinalização adequada em todas as áreas de operação 3. Realizar inspeções e auditorias regulares nos equipamentos e instalações 4. Estabelecer um plano de resposta a emergências que inclua medidas de proteção para terceiros e a comunidade	PRE PRE POT COR

A medida de restauração da área de preservação ao redor da usina, citada nos impactos de alteração de paisagem, perda e/ou fragmentação de habitat e perda e/ou redução de biodiversidade, é considerada potencializadora quando realizada sem a necessidade de corrigir um impacto direto causado pelo empreendimento, ou seja, visando um benefício ambiental adicional. Caso essa restauração seja uma resposta a um dano causado, ela passa a ser corretiva.

A definição de áreas de soltura para a fauna resgatada é considerada uma medida compensatória, pois visa atenuar os impactos irreversíveis causados pela remoção ou deslocamento da fauna durante a implantação do empreendimento. Ao proporcionar um local seguro e ecologicamente adequado para a reintegração desses animais, busca-se compensar os danos residuais e contribuir para a conservação da biodiversidade afetada.

No geral, as medidas de monitoramento foram classificadas como de caráter potencializador, tendo em vista seu papel estratégico na consolidação de um sistema de gestão ambiental proativo e preventivo. Tais medidas não se limitam ao cumprimento formal de exigências legais, mas viabilizam o acompanhamento contínuo das variáveis ambientais e sociais, permitindo a detecção precoce de anomalias, a reavaliação da eficácia das ações implantadas e a adoção tempestiva de ajustes corretivos.

As medidas potencializadoras voltadas aos impactos positivos do empreendimento têm como principal objetivo ampliar e maximizar os benefícios já existentes, gerados pela implantação do projeto. Essas ações buscam potencializar resultados positivos, como o estímulo à economia local, o aumento da arrecadação tributária e a criação de novas oportunidades de emprego e capacitação profissional.

Ao potencializar esses efeitos, as medidas contribuem para um impacto positivo ainda maior na comunidade, fortalecendo o desenvolvimento socioeconômico e gerando benefícios duradouros. Essas ações evidenciam o

compromisso do empreendimento não apenas com a mitigação de impactos, mas com a promoção de um legado positivo e sustentável.

As ações previstas para a fase de desmobilização do empreendimento foram classificadas como medidas compensatórias de natureza socioeconômica, uma vez que visam minimizar os impactos negativos que não podem ser completamente evitados após o encerramento das atividades. Tais medidas buscam mitigar a perda de postos de trabalho, a interrupção de fluxos econômicos locais e eventuais lacunas na gestão ambiental, contribuindo para um encerramento mais responsável e justo do ciclo do empreendimento.

Medidas preventivas, como a realização de audiências públicas e a divulgação transparente das informações do empreendimento, são fundamentais para garantir que a comunidade local compreenda o projeto desde o início. Dessa forma, evita-se a criação de expectativas irreais, bem como potenciais frustrações ou resistências ao empreendimento. Ao atuar de forma preventiva, essas medidas promovem um ambiente de inclusão, respeito e transparência, contribuindo para um relacionamento mais harmonioso entre o projeto e a comunidade.

Por fim, as medidas de contingência integram o grupo de ações corretivas de caráter emergencial, que devem ser planejadas para responder a situações inesperadas que resultem em impactos ambientais efetivos. Essas ações são acionadas após a ocorrência do impacto, com o objetivo de conter ou corrigir os danos gerados.

4.3 Diretrizes e Recomendações

4.3.1 Fator de enquadramento

Apesar da crescente implantação de empreendimentos solares fotovoltaicos no Nordeste brasileiro, observa-se a ausência de padronização entre os Estados quanto aos critérios de enquadramento para a exigência de EIA/RIMA. Cada Estado estabelece seus próprios parâmetros, o que gera

assimetria de exigências, insegurança jurídica e, em alguns casos, fragilização da proteção ambiental.

A **Tabela 9** a seguir apresenta uma síntese dos fatores de enquadramento atualmente praticados nos Estados da região Nordeste.

Tabela 9 - Síntese dos fatores de enquadramento utilizados por órgãos estaduais de meio ambiente no Nordeste brasileiro para definição da obrigatoriedade de Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) em usinas solares fotovoltaicas.

Estado	Fator de Enquadramento Atual	Base legal (atual)
Alagoas	Potência instalada > 10 MW	Resolução CEPRAM nº 10/2018
Bahia	Análise de impacto potencial baseado na localização em área ambientalmente sensível – sem critério fixo de área.	Resolução CEPRAM nº 5.092/2022
Ceará	Área de supressão de vegetação nativa > 450 hectares ou localização em área ambientalmente sensível.	Resolução COEMA nº 06/2018
Maranhão	Análise caso a caso – sem critério de área fixo.	Portaria SEMA nº 74/2013
Paraíba	Potência instalada > 125 MW ou área de supressão de vegetação nativa > 100 hectares.	Norma Administrativa nº 101/2021 e Lei nº 12.713/2023
Pernambuco	Área de supressão de vegetação nativa > 100 hectares ou localização em área ambientalmente sensível.	IN CPRH nº 10/2024
Piauí	Área de supressão de vegetação nativa > 400 hectares ou localização em área ambientalmente sensível.	Resolução CONSEMA nº 46/2022
Rio Grande do Norte	Área de supressão de vegetação nativa > 100 hectares ou localização em área ambientalmente sensível.	IN IDEMA nº 01/2018
Sergipe	Legislação específica não encontrada	

Em adição, a análise dos estudos ambientais realizados para empreendimentos de geração centralizada de energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro evidenciou que a supressão da vegetação é a principal ação geradora de impactos ambientais relevantes sobre o meio físico, biótico e, em menor grau, socioeconômico.

Com base nisso, e considerando a necessidade de estabelecer critérios objetivos e proporcionais para o licenciamento ambiental desses empreendimentos, propõe-se a adoção da área de supressão vegetal como fator primário de enquadramento para definição da obrigatoriedade de elaboração de Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental.

Recomenda-se que projetos cuja área de supressão de vegetação ultrapasse 100 hectares sejam automaticamente classificados como empreendimentos de significativo impacto ambiental, exigindo a elaboração de EIA/RIMA. Esse parâmetro encontra respaldo na prática administrativa de alguns Estados brasileiros, que apontam a fragmentação de habitats e a perda de biodiversidade como efeitos ampliados em áreas extensas de modificação do uso do solo.

Além do critério de área, a análise evidenciou a importância da localização ambientalmente sensível como fator determinante de impacto. Assim, recomenda-se que empreendimentos localizados em áreas tais como Áreas de Preservação Permanente (APPs), Unidades de Conservação, Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade, zonas de recarga hídrica, corredores ecológicos, ou remanescentes de Caatinga primária sejam automaticamente enquadrados como exigentes de EIA/RIMA, independentemente da extensão da área de supressão envolvida.

O fluxograma apresentado na **Figura 20**, resume a recomendação do presente estudo para enquadramento do tipo de estudo ambiental a ser elaborado por empreendimentos solares fotovoltaicos no Nordeste brasileiro.

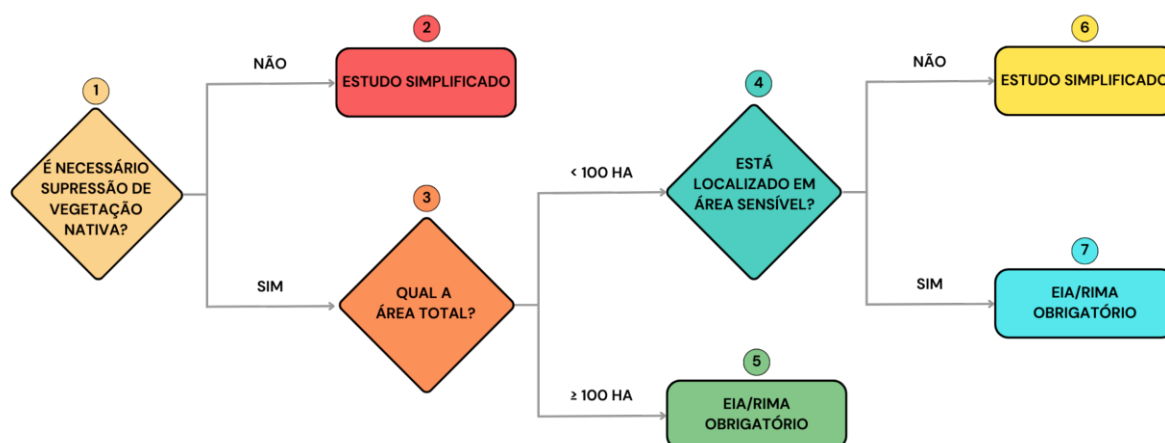


Figura 20 - Fluxograma com critérios propostos para definição do tipo de estudo ambiental aplicável a usinas solares fotovoltaicas, com base na necessidade de supressão de vegetação nativa, área total e localização em área ambientalmente sensível.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Impactos ambientais de avaliação obrigatória

A partir da sistematização apresentada no tópico 4.2, foi possível identificar um conjunto de impactos ambientais classificados como de ocorrência certa em empreendimentos de geração solar fotovoltaica centralizada no Nordeste brasileiro. Tais impactos foram observados de forma recorrente e consistente nos estudos ambientais analisados, independentemente da localização geográfica, do porte do empreendimento ou das características da área de influência direta.

Propõe-se, portanto, que esses impactos componham um bloco mínimo obrigatório de avaliação nos instrumentos de licenciamento ambiental aplicáveis a esse tipo de projeto (EIA/RIMA, RAS ou PCA), de forma a garantir que os principais vetores de interferência ambiental sejam devidamente caracterizados, quantificados e considerados no planejamento de medidas de controle, mitigação e compensação.

A **Tabela 10** apresenta os impactos ambientais considerados de avaliação obrigatória, organizados por meio afetado. Recomenda-se que sua análise seja

exigida em qualquer estudo ambiental submetido à autoridade licenciadora, no contexto de empreendimentos de geração fotovoltaica centralizada.

Tabela 10 - Impactos ambientais propostos para avaliação obrigatória em usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada.

Meio afetado	Impactos ambientais de avaliação obrigatória
Físico	Alteração da paisagem Alteração do nível de ruídos e vibrações Alteração na qualidade do ar Compactação dos solos, desencadeamento e/ou acentuação de processos erosivos Interferência nos recursos hídricos Alteração do microclima* Degradação de áreas* Geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos*
Biótico	Perda e/ou fragmentação de habitat Perda e/ou redução de biodiversidade Pressão sobre a fauna silvestre
Socioeconômico	Aumento da arrecadação tributária Aumento da pressão sobre a infraestrutura local Dinamização da economia local Geração de empregos e capacitação de funcionários Geração de expectativas Interferência no cotidiano da população Risco de acidentes de trabalho e com terceiros

*impactos incluídos por análise crítica da pesquisadora, com base em sua relevância ambiental e alinhamento com temas estratégicos, mesmo sem classificação como de ocorrência certa.

Além dos impactos classificados como de ocorrência certa, propõe-se a inclusão de três impactos adicionais neste bloco obrigatório: geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos, degradação de áreas e impactos sobre o clima local. Embora não tenham sido citados em todos os estudos analisados, a inclusão desses impactos se justifica pelo contexto técnico dos empreendimentos fotovoltaicos de geração centralizada, que demandam estrutura física significativa, envolvem circulação de trabalhadores em diferentes fases do projeto e possuem potencial de alteração microambiental.

A geração de resíduos e efluentes ocorre de forma sistemática ao longo de todo o ciclo de vida das usinas, incluindo o descomissionamento, o que requer planejamento e estrutura adequados para sua gestão. A degradação de áreas, por sua vez, é uma consequência direta da implantação de estruturas, acessos

e canteiros, mesmo em projetos de médio porte. Já os efeitos sobre o clima local, embora pouco abordados nos estudos analisados e na literatura associada, têm sido cada vez mais discutidos no âmbito científico, principalmente diante da emergência climática global. Sua inclusão está alinhada ao princípio da prevenção e busca garantir que alterações microclimáticas, mesmo sutis, sejam ao menos analisadas em contextos territoriais sensíveis.

A ausência frequente desses impactos em estudos ambientais pode refletir fragilidades metodológicas ou subdimensionamento técnico, e não sua irrelevância ambiental. Por isso, sua consideração obrigatória contribui para o fortalecimento dos diagnósticos ambientais, a redução de omissões relevantes e o aprimoramento das medidas de controle ambiental exigidas em processos de licenciamento.

Por fim, reforça-se que a definição deste conjunto mínimo de impactos não exclui a necessidade de análise de outros efeitos específicos que possam surgir conforme as particularidades de cada projeto e território. O objetivo é estabelecer uma base técnica comum para empreendimentos de geração fotovoltaica centralizada (de médio e grande porte), promovendo maior previsibilidade, transparência e rigor técnico no licenciamento ambiental.

4.3.3 Programas ambientais obrigatórios

A partir da análise dos impactos ambientais classificados como de ocorrência certa e das respectivas medidas mitigadoras e potencializadoras identificadas no tópico 4.2, elaborou-se uma proposta de programas ambientais mínimos obrigatórios para empreendimentos de geração solar fotovoltaica centralizada.

A revisão dos estudos ambientais demonstrou que determinados impactos ocorrem de forma sistemática e inevitável nesse tipo de empreendimento, independentemente do porte, localização ou particularidades técnicas. Com base nessa constatação, os programas apresentados neste tópico foram definidos como obrigatórios, por atuarem diretamente sobre os

impactos identificados como de ocorrência certa. Essa abordagem confere objetividade técnica à estruturação do Plano Básico Ambiental (PBA), além de promover padronização, efetividade e maior transparência no processo de licenciamento ambiental.

Esses programas visam assegurar que as ações preventivas, corretivas, compensatórias e potencializadoras sejam sistematizadas no âmbito do Plano Básico Ambiental, garantindo a efetividade na proteção ambiental e a maximização dos benefícios socioambientais decorrentes dos empreendimentos. A **Figura 21** a seguir apresenta a relação dos programas ambientais propostos, vinculando-os aos principais impactos identificados como obrigatórios.

PROGRAMAS RECOMENDADOS	PRINCIPAIS AÇÕES	IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS
PROGRAMA DE MANEJO DE FLORA	- Realizar o resgate de flora - Executar a cubagem do material lenhoso - Implantar Reposição Florestal - Estabelecer corredores ecológicos	- Alteração da paisagem - Degradação de áreas - Perda e/ou fragmentação de habitat - Perda e/ou redução de biodiversidade
PROGRAMA DE MANEJO DE FAUNA	- Realizar o afugentamento, resgate e monitoramento de fauna - Definir e sinalizar áreas de soltura	- Perda e/ou fragmentação de habitat - Pressão sobre a fauna silvestre - Perda e/ou redução da biodiversidade
PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS (PRAD)	- Executar a recuperação/restauração vegetal - Controlar processos erosivos - Realizar a descompactação de solos	- Compactação do solo e processos erosivos - Degradação de áreas - Interferência nos recursos hídricos
PROGRAMA DE MONITORAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS	- Monitorar a qualidade da água superficial/subterrânea e quantidade (se aplicável) - Controlar o lançamento de efluentes líquidos	- Compactação do solo e processos erosivos - Interferência nos recursos hídricos - Geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos
PROGRAMA DE MONITORAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	- Realizar umectação de vias, acessos e etc - Realizar testes de fumaça preta - Fazer manutenção preventiva de equipamentos e máquinas - Inventariar emissões de GEE	- Alteração na qualidade do ar - Alteração do microclima - Interferência no cotidiano da população
PROGRAMA DE MONITORAMENTO DE RUÍDOS E VIBRAÇÕES	- Medir os níveis de ruído - Definir horários para atividades ruidosas - Manter equipamentos em condições adequadas	- Alteração do nível de ruídos e vibrações - Interferência no cotidiano da população
PROGRAMA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E EFLUENTES	- Segregar resíduos na origem - Armazenar e destinar corretamente os resíduos - Implementar planos de contingência	- Interferência nos recursos hídricos - Geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL	Promover atividades de caráter socioambiental para funcionários e comunidades (oficinas, cursos, campanhas etc)	- Interferência no cotidiano da população - Geração de expectativas - Capacitação de funcionários
PROGRAMA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL	- Estabelecer canais de comunicação - Realizar visitas periódicas às comunidades - Gerir conflitos - Alinhar expectativas	- Interferência no cotidiano da população - Aumento da pressão sobre a infraestrutura local - Geração de expectativas
PROGRAMA DE SAÚDE E SEGURANÇA OCUPACIONAL	- Realizar treinamentos e capacitação - Implementar protocolos de segurança, EPIs e sinalização - Monitorar acidentes e incidentes com trabalhadores e terceiros	Risco de acidentes de trabalho e com terceiros
PROGRAMA DE CONTRATAÇÃO DE MÃO DE OBRA E SERVIÇOS	- Priorizar mão de obra e fornecedores locais - Qualificar tecnicamente trabalhadores	- Geração de empregos e capacitação de funcionários - Geração de expectativas - Dinamização da economia local

Figura 21 - Programas ambientais propostos como obrigatórios, com base na relação direta com impactos ambientais considerados certos ou altamente prováveis.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A consolidação desses programas como requisitos mínimos do PBA representa um avanço na qualificação técnica do licenciamento ambiental de usinas solares fotovoltaicas, ao proporcionar maior previsibilidade para

empreendedores e analistas, reduzir omissões recorrentes e fortalecer o caráter preventivo, sistêmico e participativo dos estudos ambientais.

Cabe destacar que o impacto “aumento da arrecadação tributária”, embora classificado como de ocorrência certa, não está vinculado a um programa ambiental específico, uma vez que se trata de um efeito positivo indireto decorrente da implantação e operação do empreendimento. No entanto, sua inclusão entre os impactos de avaliação obrigatória justifica-se pela importância de reconhecer e monitorar os benefícios socioeconômicos gerados localmente, inclusive para fins de planejamento público e diálogo institucional com os municípios afetados.

5. CONCLUSÕES

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo evidenciou um cenário de assimetria na aplicação dos instrumentos de licenciamento ambiental voltados aos empreendimentos de geração solar fotovoltaica centralizada, especialmente nos Estados do Nordeste brasileiro. A ausência de normativas específicas e de critérios técnicos mínimos padronizados gera não apenas insegurança jurídica aos empreendedores (submetidos a exigências distintas conforme a unidade federativa), mas também fragiliza a efetividade ambiental do processo, uma vez que, projetos com potencial significativo de impacto podem ser autorizados com base em estudos simplificados e tecnicamente insuficientes.

Essa flexibilização compromete a função estratégica do licenciamento como instrumento de política pública ambiental. A adoção de abordagens simplificadas para empreendimentos com supressão de vegetação significativa ou intervenção em áreas sensíveis reduz drasticamente a efetividade dos mecanismos de controle, como a exigência de compensação ambiental prevista na legislação federal. Ao flexibilizar o enquadramento, o Estado deixa de exigir contrapartidas ambientais e de destinar recursos às Unidades de Conservação, comprometendo tanto a gestão territorial quanto a sustentabilidade financeira do sistema de proteção ambiental.

Outro ponto crítico identificado diz respeito à ausência de abordagem consistente sobre a fase de descomissionamento, tanto nos estudos ambientais quanto na legislação vigente. A inexistência de normativas específicas que definam responsabilidades, prazos e diretrizes técnicas para o encerramento das atividades, incluindo a gestão de resíduos, representa um risco crescente, especialmente diante da expansão acelerada do setor. A omissão dessa etapa compromete a visão de ciclo de vida do empreendimento e dificulta o planejamento ambiental de longo prazo, revelando uma lacuna que precisa ser urgentemente enfrentada pelo marco regulatório.

As constatações apresentadas neste capítulo reforçam a urgência de revisão dos critérios que orientam o licenciamento ambiental de usinas solares fotovoltaicas de geração centralizada no Brasil. Com base em dados concretos e análise normativa aplicada, demonstrou-se que a ausência de padronização, a fragilidade das exigências técnicas e a omissão de etapas essenciais como o descomissionamento comprometem não apenas a efetividade do controle ambiental, mas a integridade do processo regulatório como um todo.

O fortalecimento do licenciamento exige o estabelecimento de critérios mínimos nacionais, com foco na previsibilidade, na equidade entre empreendimentos e na responsabilidade ambiental intergeracional. Portanto, o presente estudo, não se trata apenas de interpretação: o conteúdo apresentado representa um posicionamento técnico frente a uma urgência regulatória real, concreta e inadiável.

CAPÍTULO 2

INVENTÁRIO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA ETAPA CONSTRUTIVA DE USINA SOLAR FOTOVOLTAICA E PROJEÇÃO DE NEUTRALIDADE DE CARBONO

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **Inventário das emissões de gases de efeito estufa na etapa construtiva de usina solar fotovoltaica e projeção de neutralidade de carbono**. 2025. Orientador: Emanuel Araújo Silva.

RESUMO

Este capítulo apresenta a quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas durante a fase de construção de uma usina solar fotovoltaica de geração centralizada (UFV STL 9), localizada no Semiárido paraibano, bem como a estimativa do período necessário para o alcance da neutralidade de carbono em relação a essas emissões. A metodologia adotada foi baseada no Programa Brasileiro GHG Protocol, abrangendo as emissões diretas (Escopo 1), indiretas pela compra de energia elétrica (Escopo 2) e outras emissões indiretas (Escopo 3), com destaque para a estimativa de emissões pela mudança no uso do solo via inventário florestal. As emissões totais durante a construção somaram 5.627,20 tCO₂e, sendo 44,36% atribuídas ao transporte e distribuição de materiais, 24,78% à combustão móvel e 23,09% à supressão vegetal. A análise florística e fitossociológica da vegetação nativa suprimida revelou um ambiente em estágio secundário de sucessão, com dominância de espécies da Caatinga. Considerando o fator de capacidade da usina e o fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), o empreendimento alcança a neutralidade climática em relação aos gases emitidos na etapa construtiva em aproximadamente 5,7 meses após o início da operação comercial. Ao longo dos 25 anos de vida útil, a usina evitará a emissão de cerca de 279.180,63 tCO₂e. Os resultados destacam a relevância de incluir as etapas de pré-instalação e instalação em inventários corporativos de GEE, além da necessidade de considerar todo o ciclo de vida para avaliar a real contribuição dos empreendimentos renováveis à mitigação climática.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; gases de efeito estufa; inventário de emissões; mudança do uso do solo; neutralidade de carbono.

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **Inventory of Greenhouse Gas Emissions during the Construction Phase of a Centralized Photovoltaic Solar Power Plant and Carbon Neutrality Projection.** 2025. Advisor: Emanuel Araújo Silva.

ABSTRACT

This chapter presents the quantification of greenhouse gas (GHG) emissions generated during the construction phase of a centralized photovoltaic solar power plant (UFV STL 9), located in the Semi-arid region of Paraíba State, Northeastern Brazil, as well as the estimation of the period required to achieve carbon neutrality in relation to these emissions. The adopted methodology was based on the Brazilian GHG Protocol Program, encompassing direct emissions (Scope 1), indirect emissions from purchased electricity (Scope 2), and other indirect emissions (Scope 3), with emphasis on estimating land-use change emissions through forest inventory data. Total emissions during construction amounted to 5,627.20 tCO₂e, with 44.36% attributed to transportation and distribution of materials, 24.78% to mobile combustion, and 23.09% to vegetation clearing. The floristic and phytosociological analysis of the suppressed native vegetation revealed an environment in a secondary stage of succession, dominated by Caatinga species. Considering the plant's capacity factor and the average emission factor of the National Interconnected System (SIN), the project achieves carbon neutrality for construction-phase emissions approximately 5.7 months after the start of commercial operation. Over its 25-year lifespan, the plant will avoid the emission of around 279,180.63 tCO₂e. The results highlight the importance of including pre-installation and installation stages in corporate GHG inventories, as well as the need to consider the entire life cycle to accurately assess the actual contribution of renewable energy projects to climate change mitigation.

Keywords: photovoltaic solar energy; greenhouse gases; emission inventory; land-use change; carbon neutrality.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas provocadas pelos seres humanos, representam uma das maiores ameaças ambientais e socioeconômicas do século XXI, causando generalizadas rupturas na natureza e afetando as vidas de bilhões de pessoas ao redor do mundo (IPCC, 2023). Com isso, organizações estão cada vez mais engajadas em estabelecer metas e planos para gestão e redução das emissões, e assim atuarem diretamente no combate às mudanças climáticas.

A Ação contra a Mudança Global do Clima é um Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS 13) lançado pela Organização das Nações Unidas (ONU) que convoca os países a implementar políticas e ações para mitigar as mudanças climáticas e adaptar-se aos seus impactos. As metas do ODS 13 incluem a integração de medidas climáticas nas políticas nacionais, a melhoria da educação e a conscientização para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas e o cumprimento dos compromissos financeiros assumidos no âmbito do Acordo de Paris (MMA, 2024; UNDP, 2024).

Para isso, o primeiro passo é conhecer as fontes de emissões de gases de efeito estufa dentro da organização, setor ou país e quantificá-las. A elaboração de inventários corporativos, baseados nos padrões e orientações do *GHG Protocol* é o método mais comumente utilizado no mundo (MONZONI *et al.*, 2008). Com um modelo padronizado globalmente, o *GHG Protocol* permite que atores públicos e privados mensurem e reportem de maneira confiável o impacto climático de suas atividades em termos de emissão de gases de efeito estufa, possibilitando o planejamento de ações de mitigação (WRI BRASIL, 2024).

No Brasil, é possível observar o crescimento no número de organizações e na quantidade de inventários publicados no Registro Público de Emissões (RPE), plataforma para divulgação dos inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa das organizações participantes do Programa Brasileiro GHG Protocol. De acordo com o Relatório Anual (ciclo 2023) do Programa Brasileiro GHG Protocol (MONZONI *et al.*, 2023), o número de organizações e inventários publicados em 2022 aumentou 42% em relação a 2021.

A energia solar fotovoltaica tem apresentado um crescimento expressivo tanto no Brasil quanto no cenário global, consolidando-se como uma das principais fontes de energia renovável (IPCC, 2018; IEA, 2020; OLIVEIRA; ARAÚJO FILHO, 2021). No Brasil, a expansão é especialmente notável na região Nordeste, que desponta como um dos principais polos para a instalação de empreendimentos de geração centralizada devido às suas condições climáticas favoráveis, como alta incidência solar e vastas áreas disponíveis para implantação de usinas fotovoltaicas (DANTAS; POMPERMAYER, 2018; LIMA, 2021; ANEEL, 2023).

Durante geração de energia elétrica em usinas fotovoltaicas a liberação de gases de efeito estufa é mínima, uma vez que, as usinas não queimam combustíveis fósseis nem emitem poluentes. No entanto, há emissões significativas de gases de efeito estufa associadas às fases de pré-instalação, instalação, operação e descomissionamento, como por exemplo, extração de matéria-prima, fabricação dos módulos fotovoltaicos, transporte e distribuição dos suprimentos, construção da usina etc. (TAWALBEH *et al.*, 2021; BOŠNJAKOVIC *et al.*, 2023).

Informações sobre os gases de efeito estufa emitidos durante a construção de usinas fotovoltaicas de geração centralizada são escassas, sendo importante a obtenção de dados para conhecer o impacto dos sistemas fotovoltaicos no combate às mudanças climáticas, comparar seu potencial de mitigação de gases de efeito estufa com outros tipos de fontes de energia, especialmente as não renováveis, auxiliar empresas e órgãos ambientais no planejamento de ações relacionadas à compensação ambiental e contribuir com o gerenciamento das emissões.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Calcular as emissões de gases de efeito estufa associadas à fase de construção de uma usina solar fotovoltaica de geração centralizada e projetar o período necessário para a neutralização dessas emissões.

2.2 Específico

1. Identificar as fontes de emissão de gases de efeito estufa associadas a uma usina solar fotovoltaica;
2. Identificar e classificar as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa do estudo de caso;
3. Quantificar as emissões de gases de efeito estufa da etapa construtiva do estudo de caso;
4. Projetar o período necessário para que a usina fotovoltaica do estudo de caso atinja a neutralidade de carbono em relação às emissões da fase construtiva.

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização do estudo de caso

A Usina Solar Fotovoltaica denominada UFV STL 9, utilizada neste estudo de caso, faz parte do Complexo Solar Santa Luzia, pertencente à empresa Rio Alto Energias Renováveis (RAER), e está localizada na zona rural do município de Santa Luzia, no Estado da Paraíba, a 265,3 km da capital, João Pessoa (**Figura 1**).

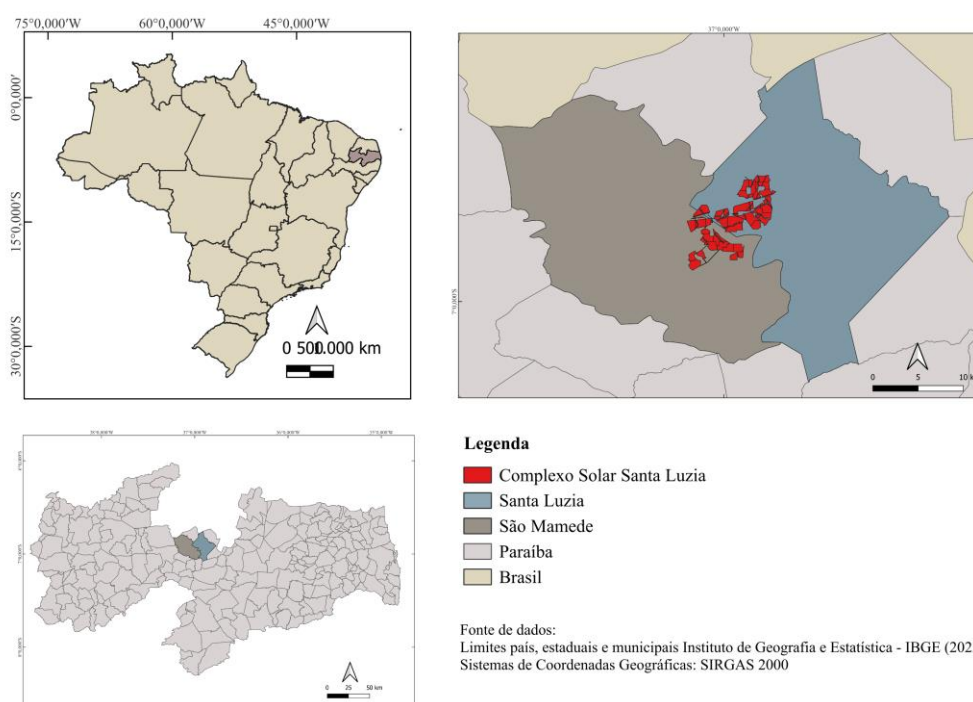


Figura 1- Mapa de localização do Complexo Solar Santa Luzia, empreendimento da empresa Rio Alto Energias Renováveis.

Fonte: Adaptado pelo autor do Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Solar Santa Luzia (2022).

A área do Complexo Solar Santa Luzia está localizada no chamado “Polígono das Secas”, uma região marcada pelo clima semiárido quente e seco (BSh), segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). Esse clima é caracterizado por verões frequentemente muito quentes e invernos que variam de amenos a frios, com baixa precipitação. A região possui duas estações bem definidas: uma estação chuvosa, que ocorre geralmente nos primeiros meses do ano, e uma estação seca, mais intensa de setembro a dezembro. As temperaturas anuais oscilam entre 25,5°C e 30°C, com picos mais altos durante a estação seca. O regime pluviométrico é

irregular, com uma média anual de aproximadamente 630 mm, concentrada em cerca de cinco meses do ano (RAER, 2022).

O Complexo Solar Santa Luzia está situado na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, especificamente na sub-bacia do Rio Seridó. Os principais tipos de solo na área incluem Neossolos Litólicos Eutróficos e Luvisolos Crômicos Órticos, com a presença de afloramentos rochosos. A região é caracterizada pela abundância de minerais primários e argilas de alta atividade, resultando em solos pouco lixiviados, quimicamente ricos, com pH que varia de ligeiramente alcalino a pouco ácido. Em termos de relevo, predominam as formações planas a suavemente onduladas (RAER, 2022).

De acordo com o diagnóstico do meio biótico (flora) presente no EIA do empreendimento (RAER, 2022), a vegetação existente no local de implantação do empreendimento pertence ao Bioma Caatinga, apresenta formação savana-estépica arborizada e presença de elementos xerófitos, com predominância de indivíduos arbóreos de pequeno à médio porte. Foi relatado que as áreas se encontram em estágio de sucessão secundária, ou seja, a biota deste ambiente foi parcialmente alterada por ações antrópicas como agricultura e pecuária. Em relação aos aspectos da fauna silvestre, foi constatado que a área é composta por um grupo de espécies que apresentam certo grau de resiliência e tolerância ao ambiente fragmentado, o que demonstra a capacidade de aclimação e a plasticidade na ocupação de habitat.

De acordo com o Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Solar Santa Luzia, disponibilizado no site do órgão ambiental do Estado da Paraíba (RAER, 2022), o complexo tem capacidade nominal instalada de 1.050 MWac, com instalação de 1.197 MWp, sendo dividido em 21 usinas fotovoltaicas. Além das usinas, fazem parte do empreendimento uma Subestação Elevatória de Tensão 34,5/500kV e uma Linha de Transmissão de 500 kV.

A UFV STL 9 tem potência instalada de 50 MWac (58 MWp), e é composta por 6 STS (Smart Transformer Station), 246 inversores, 1.830 trackers, 3.660 strings e 95.160 módulos monocristalinos bifaciais com vidro duplo. Foram utilizados 67.340 módulos fotovoltaicos com potência de 605 Wp e 27.820 com potência de 610 Wp, todos fornecidos por empresa chinesa (RAER, 2024).

Os módulos apresentam eficiência média da célula de 21,64%, 0,40% de degradação de energia anual, formato de 2465 mm × 1134 mm × 30 mm (incluindo a estrutura) e peso de 34,6 kg (Tipo do módulo: JKM605N-78HL4-BDV). É importante destacar que devido a tecnologia BiFacial a potência do módulo pode aumentar a geração entre 5% e 25% (RAER, 2024).

Para a implantação da UFV STL 9, foi realizada a supressão vegetal de uma área de 91,5 hectares, dos quais 74,2 hectares correspondem à área efetiva da usina (**Figura 2**). Outros 8,6 hectares referem-se a áreas de acesso permanentes e outras áreas que devem permanecer sem vegetação arbórea, como valas com cabos de média e baixa tensão. O restante, 8,7 hectares serão destinados à recuperação ambiental, ou seja, fazem parte do Programa de Recuperação de Áreas Degradadas. Estas últimas, compreendem áreas utilizadas apenas durante a fase de instalação, como acessos provisórios, áreas de estoque de materiais, bota-fora, entre outras (RAER, 2024).



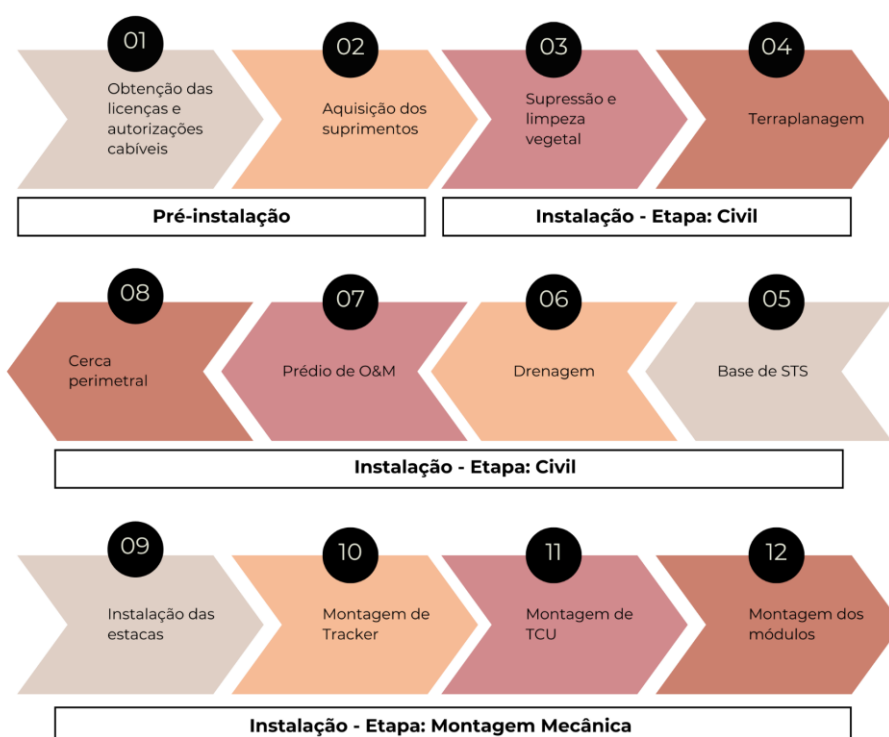
Figura 2 - Classificação das áreas utilizadas pela UFV STL 9. Em destaque: traçado em vermelho representa a área total de intervenção para implantação da usina; polígono em azul, a área efetiva da UFV; polígono em laranja, a área destinada à recuperação ambiental; áreas sem polígono correspondem às zonas de uso permanente da UFV.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em imagem do Google Earth e dados fornecidos pela empresa Rio Alto Energias Renováveis (RAER, 2024).

As atividades na UFV STL 9 iniciaram em março de 2023, com a supressão vegetal, e foram concluídas em fevereiro de 2024, quando a usina iniciou sua operação comercial.

3.2 Fluxo de atividades do estudo de caso

Para auxiliar na identificação e classificação das fontes de emissões de gases de efeito estufa durante a construção da usina, bem como na coleta de dados, foi elaborado um fluxo de atividades seguindo a cronologia de ocorrência das atividades (**Figura 3**). As informações técnicas necessárias foram obtidas por meio de entrevistas com o site manager do projeto e o engenheiro de planejamento da empresa responsável pela usina do estudo de caso.



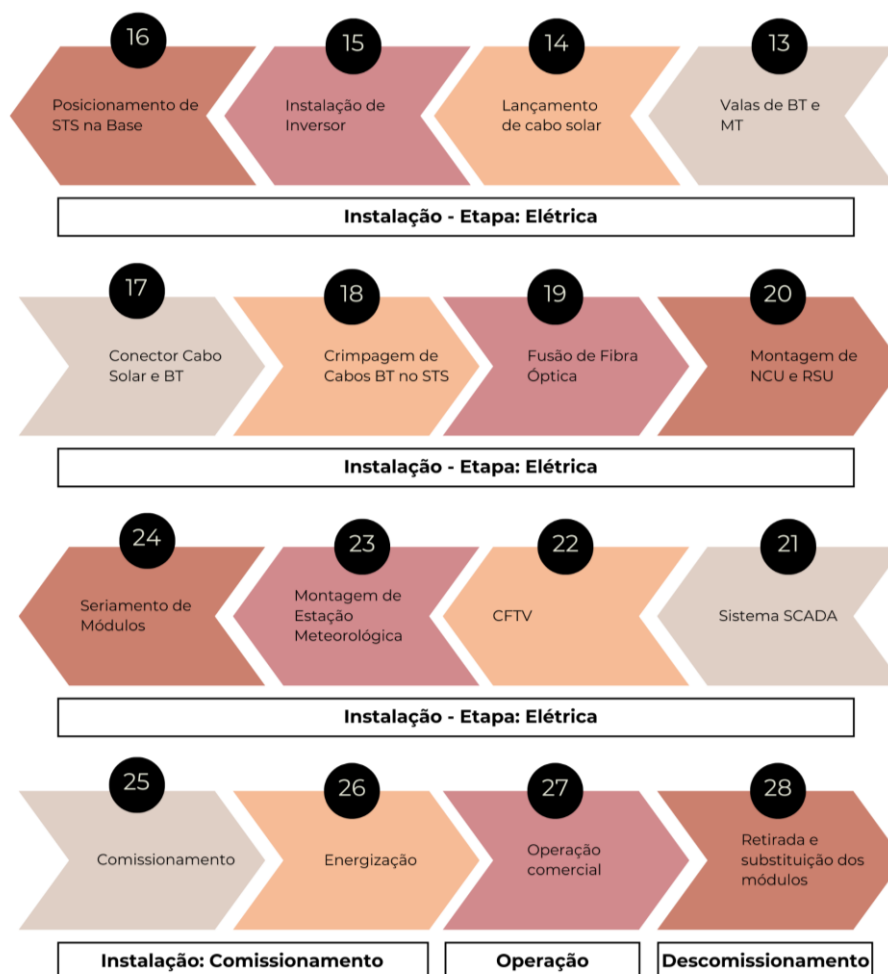


Figura 3 – Fluxograma das etapas de implantação da usina solar fotovoltaica do estudo de caso, organizado em ordem cronológica. As fases de pré-instalação, operação e descomissionamento estão representadas, de forma indicativa.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados fornecidos pela empresa Rio Alto Energias Renováveis (RAER, 2024).

Em resumo, antes o início das atividades de implantação de uma usina fotovoltaica, o empreendimento deve obter as licenças e autorizações pertinentes, como por exemplo, a Licença de Instalação e a Autorização para Uso Alternativo do Solo (Supressão Vegetal). Após isto e aquisição dos suprimentos, inicia-se a construção do empreendimento, que considerando as características técnicas do estudo de caso, tem duração de aproximadamente 12 meses. A operação comercial é iniciada ao término do comissionamento e a previsão de descomissionamento é de 25 anos após a operação.

Com base no fluxo de atividades e nas informações fornecidas pela equipe da empresa, foi elaborado e aplicado um questionário básico de mapeamento ao site

manager do projeto e a equipe responsável pela elaboração do inventário de emissões de gases de efeito estufa da empresa (**Figura 4**). Esse questionário também auxiliou na identificação e classificação das fontes de emissões de gases de efeito estufa, sendo uma peça-chave no levantamento dos dados e informações controladas pela empresa, essenciais para as etapas de coleta de dados e cálculo das emissões.

Questionário de Mapeamento	Empreendimento:	Data:	A empresa possui os dados/informações da atividade?			As atividades são controladas diretamente pela empresa?*		
Há consumo de combustível (diesel, gasolina, etanol etc.) por fontes móveis (ex. maquinário e veículos) para realização das atividades?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Há consumo de combustível (diesel, gasolina, acetileno etc.) por fontes fixas (ex. gerador, compressor etc.) para realização das atividades?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Foi realizado o inventário florestal da área sujeita à supressão vegetal (intervenção)?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Há consumo de energia elétrica em instalações como canteiro de obras e escritório pela compra no Sistema Interligado Nacional (SIN)?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Há uso de equipamentos de ar-condicionado e extintores de incêndio?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Há deslocamento dos funcionários entre sua residência e o trabalho?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Os funcionários realizam viagens a negócios?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Os resíduos sólidos gerados são tratados pela empresa?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
Os efluentes líquidos gerados são tratados pela empresa?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			
A aquisição dos materiais necessários para construção do empreendimento é realizada pela empresa?	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO	☐ SIM ☐ NÃO			

*atividades que ocorrem nas instalações da empresa

Figura 4 - Questionário básico de mapeamento aplicado à equipe técnica da empresa Rio Alto Energias Renováveis para identificação e classificação das fontes de emissão de gases de efeito estufa no estudo de caso.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do empreendimento UFV STL 9.

3.3 Identificação das fontes de emissões de gases de efeito estufa do estudo de caso

A classificação das fontes de emissões de gases de efeito estufa associadas ao setor de geração de energia solar fotovoltaica foi baseada nas diretrizes metodológicas do Programa Brasileiro GHG Protocol (MONZONI *et al.* 2008; FGVCES, 2018a; FGVCES, 2018b; FGVCES, 2019). Esse programa fornece um referencial consolidado para a elaboração de inventários corporativos, com categorias padronizadas de fontes de emissão.

A **Figura 5** apresenta as categorias de fontes de emissões adotadas pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, as quais foram utilizadas como base para a identificação e classificação das emissões no presente estudo de caso.



Figura 5 - Categorias de fontes de emissões de gases de efeito estufa utilizadas em inventários corporativos, conforme o Programa Brasileiro GHG Protocol.

Fonte: Adaptado pelo autor de FGVCES (2018a).

Com base nas categorias de fontes de emissão padronizadas pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, foram identificadas e selecionadas aquelas com potencial de ocorrência em empreendimentos de geração solar fotovoltaica. Inicialmente foram consideradas todas as atividades ao longo do ciclo de vida de uma usina que pudessem gerar emissões de gases de efeito estufa, desde a fabricação dos módulos fotovoltaicos até o descomissionamento.

Para a obtenção dos dados da usina fotovoltaica analisada no estudo de caso, foi adotada a abordagem metodológica proposta pelo GHG Protocol, que organiza as fontes de emissão em escopos (MONZONI *et al.* 2008; FGVCES, 2018a; FGVCES, 2018b; FGVCES, 2019). A escolha dessa metodologia justifica-se pelo fato de que a empresa responsável pela implantação da usina realiza o monitoramento apenas das emissões sobre as quais exerce controle direto. Como exemplo, as emissões associadas à fabricação de módulos fotovoltaicos não são controladas pela empresa (etapa que ocorre fora da cadeia gerenciada pela empresa), o que impossibilita a disponibilização dessas informações no contexto do estudo de caso.

O processo de identificação e classificação das emissões controladas pela empresa foi conduzido com base no fluxo de atividades e no questionário básico de mapeamento apresentados no item 3.2. Além disso, foram realizadas reuniões com os profissionais responsáveis pela elaboração do Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa da empresa. Os inventários corporativos dos anos de 2022 e 2023 da Rio Alto Energias Renováveis encontram-se disponíveis no Registro Público de Emissões (RPE).

3.4 Coleta dos dados

Para coleta dos dados foram elaboradas planilhas-padrão com base nas informações obtidas no questionário básico de mapeamento apresentado no tópico 3.2 e conseqüentemente nas fontes de emissões diretas e indiretas controladas pela empresa. A estrutura das planilhas-padrão seguiu a *“Ferramenta de estimativa de emissões de gases de efeito para fontes intersetoriais”* (Ferramenta GHG Protocol) do Programa Brasileiro GHG Protocol (versão 2024.0.1) (FGV, 2024).

Seguem nos subtópicos os dados solicitados e obtidos junto a empresa, necessários para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa das atividades. Além dessas informações, a gerência do empreendimento disponibilizou o histograma da UFV STL 9 que foi essencial para compreender o período de execução das atividades.

3.4.1 Emissões diretas

Foram coletados os dados de consumo de combustíveis dos veículos e dos equipamentos móveis e estacionários. Além dos combustíveis mais usuais, como o diesel, solicitou-se o consumo de outros tipos de combustíveis específicos, como o gás acetileno, visto que, durante as reuniões com a equipe da empresa, identificou-se a existência de uma oficina mecânica nas instalações do empreendimento.

Para a coleta dos dados de consumo, tanto dos extintores quanto dos sistemas de ar-condicionado, foi orientado o preenchimento das informações referentes a três situações: a carga inicial de unidades novas (quando o equipamento é adquirido vazio e a empresa realiza a primeira carga de gás), a recarga de unidades já existentes (quando a empresa realiza a reposição de gás em equipamentos em uso), e a recuperação do gás de unidades descartadas pela empresa ao longo do período de construção da usina.

Em relação ao inventário florestal, a empresa informou que realiza o inventário antes da supressão da vegetação, como parte do processo de licenciamento ambiental para obtenção da autorização de uso alternativo do solo. Com base nisso, disponibilizou todos os dados referentes ao inventário florestal da área. É importante destacar que foram apresentados à empresa os dados necessários para o cálculo das emissões decorrentes da mudança no uso do solo.

A seguir, de forma ilustrativa, apresenta-se a **Figura 6**, que contém as informações solicitadas e coletadas referentes às fontes de emissões diretas do estudo de caso.

COMBUSTÃO ESTACIONÁRIA				
Registro da fonte	Data / Mês*	Combustível utilizado	Quantidade consumida	Unidade

*opcional

COMBUSTÃO MÓVEL				
Registro da fonte	Data / Mês*	Combustível utilizado	Quantidade consumida	Unidade

*opcional

FUGITIVAS (EQUIPAMENTOS DE AR CONDICIONADO E EXTINTORES)				
Registro da fonte	Data / Mês*	Gás ou composto	Carga/Recarga/Recuperada (kg)*	Capacidade (kg)

*carga: unidades novas
recarga: unidades existentes
recuperadas: unidades dispensadas

MUDANÇAS NO USO DO SOLO*		
Nome científico (espécie)	Nome popular (espécie)	Volume estimado total (m³)

*foi solicitado o Inventário Florestal completo realizado na área suprimida. Caso o empreendimento não disponibiliza-se o inventário, seria necessário as informações de volume total por espécie estimado para a área total suprimida.

Figura 6 - Informações coletadas para o cálculo das emissões diretas de gases de efeito estufa do estudo de caso.

3.4.2 Emissões indiretas

O consumo de energia elétrica adquirida do SIN foi solicitado mensalmente, considerando o período de execução das atividades, a fim de permitir que o cálculo das emissões de gases de efeito estufa fosse realizado com base no Fator de Emissão de cada mês.

Durante a etapa de diagnóstico, identificou-se que o transporte e a distribuição dos produtos adquiridos utilizam apenas os modais rodoviário e hidroviário. Portanto, na etapa de coleta de dados, os transportes ferroviário e aéreo não foram incluídos nas planilhas-base.

Na categoria deslocamento casa-trabalho, a empresa informou que prioriza a contratação de mão de obra local. No entanto, para os colaboradores que não residem no município de instalação do empreendimento, é fornecida uma passagem de ônibus de ida e volta, uma vez ao mês. Dessa forma, na coleta de dados, considerou-se apenas o uso de ônibus de viagem (transporte público), não sendo incluídos transportes por trem, metrô, balsa ou veículos particulares. Além disso, foi solicitado o número de dias trabalhados por ano de cada colaborador.

A seguir, de forma ilustrativa, apresenta-se a **Figura 7**, que contém as informações solicitadas e coletadas referentes às fontes de emissões indiretas do estudo de caso.

ENERGIA COMPRADA		
Registro da fonte	Mês/ano	Consumo (MWh)

TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO (UPSTREAM)				
Registro da fonte	Tipo de veículo	Distância percorrida (km)	Carga transportada (t)	
Registro da fonte	Tipo e subtipo de navio	Tamanho	Distância percorrida (km)	Carga transportada (t)

VIAGENS A NEGÓCIOS			
Registro da viagem	Aeroporto de partida	Aeroporto de chegada	Número de trechos

DESLOCAMENTO CASA-TRABALHO				
Registro do colaborador	Tipo de ônibus	Número de passageiros	Distância percorrida (km)	Dias trabalhados

Figura 7 - Informações coletadas para o cálculo das emissões indiretas de gases de efeito estufa do estudo de caso.

3.5 Cálculo das emissões

Para cálculo das emissões de gases de efeito do estudo de caso, com exceção das emissões pela mudança e uso do solo (supressão vegetal), foi utilizada a “*Ferramenta de estimativa de emissões de gases de efeito para fontes intersetoriais*” do Programa Brasileiro GHG Protocol (versão 2024.0.1) (FGV, 2024). Foram utilizados os valores dos fatores de emissão e dos potenciais de aquecimento global definidos pela ferramenta, considerando o setor de energia.

Os fatores de emissão por geração de eletricidade no Sistema Interligado Nacional (SIN) para inventários corporativos dos meses de janeiro e fevereiro de 2024, foram obtidos diretamente no site do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2024) do Governo Federal, pois na Ferramenta GHG Protocol, só estavam disponíveis os fatores de emissão do ano de 2023. É importante destacar que o fator de emissão do SIN não considera as emissões de NH_4 e N_2O para geração de energia elétrica no Brasil.

As emissões provenientes da supressão da biomassa acima do solo foram calculadas por meio da **Equação (1)**, onde utilizou-se o volume total de madeira estimado por espécie obtido por meio do inventário florestal realizado na área suprimida antes da intervenção. A metodologia adotada para realização do inventário florestal e obtenção dos dados volumétricos é apresentada no tópico 3.5.1.

$$Vt_s \times DB_s = BM_s \times Fc = C_s \times 3,667 = CO_2e \quad (1)$$

Onde:

Vt = volume total de madeira (m^3);

DB = densidade básica da madeira (kg/m^3);

s = espécie vegetal;

BM = biomassa lenhosa (kg);

Fc = fator de conversão de biomassa para carbono (porcentagem de carbono por espécie);

C = quantidade de carbono estocado (kg);

3,667 = fator de conversão de carbono para CO_2 ;

CO_2e = quantidade de dióxido de carbono equivalente (kg).

A biomassa da madeira (BM) foi estimada pela multiplicação da densidade básica (DB) de cada espécie pelo seu volume total (Vt). A densidade foi obtida na

literatura acadêmica, em artigos científicos de estudos realizados na mesma região ou bioma do estudo de caso.

A estimativa do carbono estocado na biomassa das árvores (C) foi obtida pela multiplicação das estimativas de biomassa (BM) pelo teor de carbono da espécie (Fc). O teor de carbono também foi obtido na literatura e para as espécies em que não foram encontrados estudos científicos, foi utilizado o valor *default* da indicação do IPCC (2006) para floresta tropical e subtropical que é de 49% (0,49).

Para estimar a quantidade de dióxido de carbono liberada pela supressão da biomassa acima do solo, multiplicou-se a quantidade de carbono estocado pelo fator de conversão de carbono para CO₂ (3,667). Esse fator reflete a relação entre a massa molecular do CO₂ (44 g/mol) e a do carbono (12 g/mol), sendo amplamente utilizado na literatura para calcular as emissões resultantes da conversão de carbono em dióxido de carbono.

3.5.1 Inventário florestal

O inventário florestal realizado na UFV STL 9 abrangeu uma área total de 91,5 hectares, localizada na zona rural do município de Santa Luzia/PB. No inventário foi adotada a amostragem aleatória simples, onde foram alocadas 27 unidades amostrais, cada uma com dimensão de 20 m x 20 m (400 m²), totalizando uma área amostral de 1,08 hectares.

Dentro de cada unidade amostral (parcela) foram amostrados todos os indivíduos arbóreos vivos com Circunferência a Altura do Peito (CAP_{1,30m}) igual ou superior a seis (6) centímetros, dos quais foram realizadas a identificação da espécie, mensurados a CAP_{1,30m} com fita métrica graduada e, estimada a altura comercial com auxílio de uma vara graduada.

As circunferências mensuradas (CAP) foram convertidas em diâmetro a altura do peito (DAP). Na Caatinga, comumente ocorre indivíduos com mais de um fuste, nestes casos, foi realizado o cálculo de diâmetro equivalente por meio da **Equação (2)** (SOARES; PAULO NETO; SOUZA, 2006):

$$Deq = \sqrt{\sum_i DAP_i^2} \quad (2)$$

Onde:

Deq = Diâmetro equivalente;

DAP_i^2 = Quadrado do diâmetro à altura do peito do *i*-ésimo fuste de um determinado indivíduo.

Após a coleta das informações em campo, os dados foram tabulados e organizados em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel (versão 2506) e posteriormente analisados quanto à suficiência amostral, composição e diversidade florística, parâmetros fitossociológicos e rendimento lenhoso com o auxílio do Microsoft Excel (versão 2506) e do PAST (Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis) (versão 1.81).

3.5.1.1 Composição e diversidade Florística

As espécies foram identificadas *in loco* por meio de nome popular, baseando-se em características dendrológicas das espécies, tais como: folhas, frutos, cascas, caules. É importante destacar que a identificação das espécies amostradas foi realizada por profissionais da área da engenharia florestal e ciências biológicas.

As espécies foram classificadas de acordo com o Sistema *Angiosperm Phylogeny Group* IV (2016), a grafia e sinonímia dos táxons foram comparadas com o site da Lista de Espécies da Flora do Brasil (FLORA DO BRASIL, 2020). Os parâmetros avaliados para composição florística foram: a riqueza da área por meio da lista de espécies; origem e aspectos ecológicos das espécies (grupos ecológicos e síndrome de dispersão); diversidade florística (Índice de Shannon e Equabilidade de Pielou).

3.5.1.2 Parâmetros fitossociológicos

Foram avaliados os parâmetros fitossociológicos da estrutura horizontal e vertical, sendo eles: densidade absoluta e relativa, frequência absoluta e relativa, dominância absoluta e relativa, índice de valor de importância, classes de altura e diâmetro.

As classes de alturas foram estratificadas conforme o desvio padrão das alturas (MARISCAL-FLORES, 1993).

- Estrato I: indivíduos com $h_j < (hm - 1.S)$
- Estrato II: indivíduos com $(hm - 1.S) \leq h_j < (hm + 1.S)$
- Estrato III: indivíduos com $h_j \geq (hm + 1.S)$

Onde:

hm = média das alturas dos indivíduos amostrados;

S = desvio padrão das alturas;

h_j = altura da j -ésima árvore individual.

Após a obtenção destes valores, obtiveram-se os estratos verticais conforme exposto na **Tabela 1**.

Tabela 1- Amplitude de classes de altura (m) em seus respectivos estratos.

Estratos	Amplitude de classe (m)
I	$h_j < 1,60$
II	$1,60 \leq h_j < 2,78$
III	$h_j \geq 2,78$

Para as classes diamétricas, foi considerado a amplitude de quatro (4) centímetros para cada classe (**Tabela 2**).

Tabela 2 - Classes diamétricas e suas respectivas amplitudes.

Classe	Amplitude de Classe (cm)
I	1,91 - 5,91
II	5,91 - 9,91
III	9,91 - 13,91
IV	13,91 - 17,91
V	17,91 - 21,91
VI	21,91 - 25,91
VII	≥ 25,91

3.5.1.3 Estatística do inventário florestal

A suficiência amostral foi realizada com base nos cálculos de volumetria, que resultou em um número ótimo de parcelas para estimar o volume da área objeto de supressão vegetal por meio de uma análise estatística, a qual atendeu a um nível de probabilidade de 90% e um erro amostral pré-estabelecido de até 20%.

3.5.1.4 Rendimento lenhoso

As estimativas de volume lenhoso foram obtidas por meio das áreas transversais (g) e alturas comerciais dos indivíduos amostrados. O volume real e o volume empilhado foram calculados de acordo com a **Equação (3)** e a **Equação (4)**.

$$V_{real} = g \times Ht \times f \quad (3)$$

$$V_{emp} = V_{real} \times fe \quad (4)$$

Onde:

V_{real} = volume real (m^3);

V_{emp} = volume empilhado (st/ha);

g = área transversal (m^2);

Ht = altura total (m);

f = fator de forma (0,9);

fe = fator de empilhamento (2,65).

3.6 Neutralidade de carbono

Para determinar quando a UFV STL 9 atinge a neutralidade de carbono ("net-zero"), considerando os gases de efeito estufa emitidos durante a construção do empreendimento, é necessário calcular as emissões evitadas com a geração de energia elétrica fotovoltaica.

O cálculo das emissões evitadas é realizado multiplicando-se a quantidade de energia gerada em um determinado período pelo Fator de Emissão da rede elétrica do SIN (**Equação 5**), que varia conforme a composição das fontes de energia utilizadas para geração de eletricidade no país (SANQUETTA *et al.*, 2015; RAIMUNDO; SANTOS, 2015; BUIATTI *et al.*, 2016; LIRA *et al.*, 2019).

$$Emi_{ev} = Ger \times Fe \quad (5)$$

Onde:

Emi_{ev} = emissões evitadas (tCO₂);

Ger = energia gerada (MWh ou kWh);

Fe = Fator de Emissão do SIN (tCO₂/MWh ou tCO₂/kWh).

Neste estudo de caso, as emissões evitadas foram estimadas mensalmente, anualmente e ao longo da vida útil dos módulos fotovoltaicos (25 anos). O Fator de Emissão do SIN utilizado foi o valor médio dos últimos 10 anos (2014 a 2023), obtidos diretamente no site do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Governo Federal.

A quantidade de energia gerada foi calculada por mês, ano e também projetada para o total da vida útil dos módulos fotovoltaicos (25 anos) (**Equação 6**).

$$Ger = Pot.Inst \times Fc \times T \quad (6)$$

Onde:

Ger = potência gerada (MWh);

Pot.Inst = potência instalada (MWac);

Fc = fator de capacidade;

T = tempo de operação (h).

O Fator de Capacidade é uma medida da eficiência de produção de energia ao longo do tempo. Ele é variável e representa a razão entre a quantidade real de energia gerada por uma usina em um período específico (mês, trimestre ou ano) e sua potência instalada (MWp) (MME/EPE, 2020). O cálculo pode ser feito pela **Equação (7)** (ONS, 2021).

$$Fc = \left(\frac{Ger}{Ger_{cm}} \right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

Fc = fator de capacidade (%);

Ger = energia gerada (MWh ou kWh);

Ger_{cm} = energia que poderia ser gerada na capacidade máxima, ou seja, se a usina operasse durante 24 horas por dia, todos os dias (MWh ou kWh).

Em usinas fotovoltaicas, o fator de capacidade tende a ser relativamente baixo, pois a geração de energia é influenciada por vários fatores, como radiação solar, localização geográfica, dias nublados e o ciclo dia/noite. De acordo com MME (2020), o fator de capacidade médio para a região Nordeste é de 30%, enquanto para as regiões Sul e Sudeste é de 29%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Principais fontes de emissões de gases de efeito estufa

A identificação das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa foi realizada com base nas categorias estabelecidas pelo Programa Brasileiro GHG Protocol para inventários corporativos. A **Figura 8** apresenta essas categorias, destacando em amarelo aquelas em que foram identificadas fontes de emissão associadas ao setor de energia solar fotovoltaica, considerando as atividades contempladas no estudo de caso.



Figura 8 - Categorias de fontes de emissões de gases de efeito estufa: categorias em amarelo representam aquelas com potencial de emissão associadas à cadeia de valor da energia solar fotovoltaica; categorias em azul não se aplicam ao contexto analisado.

Fonte: Adaptado pelo autor de FGVCES (2018a).

As fontes efetivamente monitoradas pela empresa responsável pela implantação da UFV STL 9 foram classificadas conforme os três escopos de emissão definidos pelo GHG Protocol: Escopo 1 (emissões diretas), Escopo 2 (emissões indiretas pela compra de energia elétrica) e Escopo 3 (outras emissões indiretas). Essa categorização permitiu organizar as fontes de emissão sob responsabilidade da empresa, conforme demonstrado na **Figura 9**.

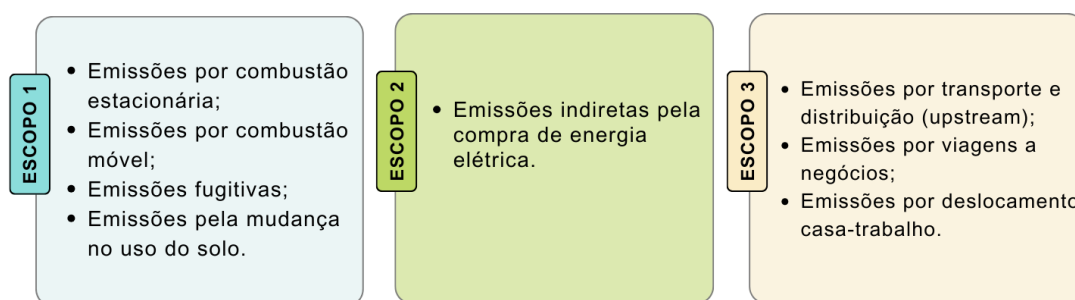


Figura 9 - Classificação das fontes de emissões de gases de efeito estufa controladas pela empresa do estudo de caso, organizadas conforme os Escopos 1, 2 e 3 do Programa Brasileiro GHG Protocol.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados fornecidos pela empresa Rio Alto Energias Renováveis (RAER, 2024).

4.2 Panorama geral das emissões

Durante a fase de construção da UFV STL 9, foram estimadas emissões totais de 5.627,20 toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), considerando exclusivamente as fontes controladas pela empresa. Desse total, 55,48% das emissões são provenientes de fontes do Escopo 1, 44,45% do Escopo 3 e apenas 0,07% do Escopo 2 (**Figura 10**). A fase de construção da usina teve duração aproximada de 12 meses, com início em março de 2023 e conclusão em fevereiro de 2024.

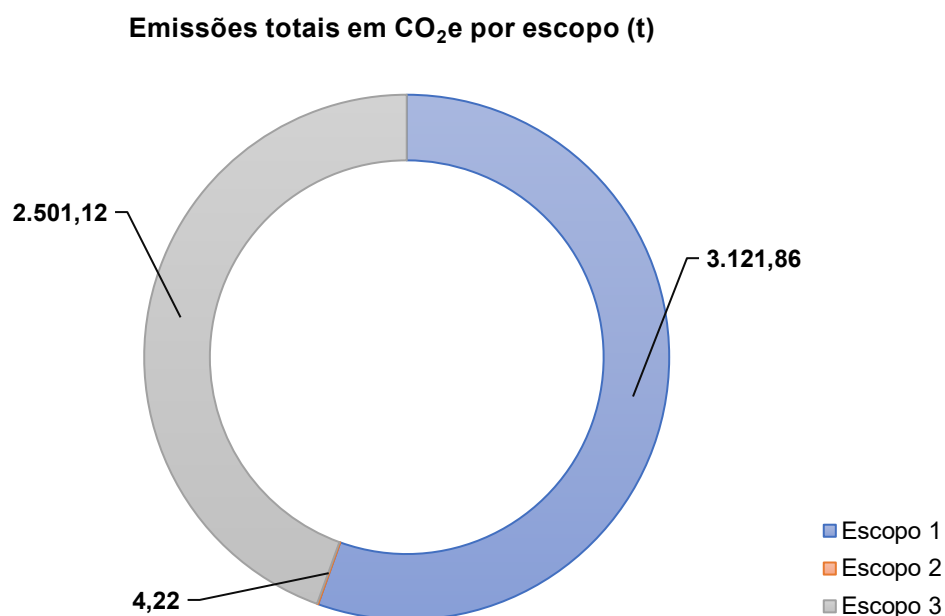


Figura 10 - Distribuição das emissões totais de gases de efeito estufa da UFV STL 9 durante a etapa de construção, classificadas por escopo segundo o Programa Brasileiro GHG Protocol.

4.3 Emissões por categoria

A análise das emissões de gases de efeito estufa por categoria evidencia que o transporte e a distribuição foram os maiores contribuintes para o total estimado, correspondendo a 44,36% das emissões. Em seguida, destacam-se as emissões provenientes da combustão móvel, com 24,78%, e da mudança no uso do solo, que representou 23,09% do total. As demais categorias, incluindo combustão estacionária, emissões fugitivas, compra de energia elétrica, deslocamento casa-trabalho e viagens a negócios, apresentaram participação inferior a 10% nas emissões totais. Os resultados estão consolidados na **Figura 11**.

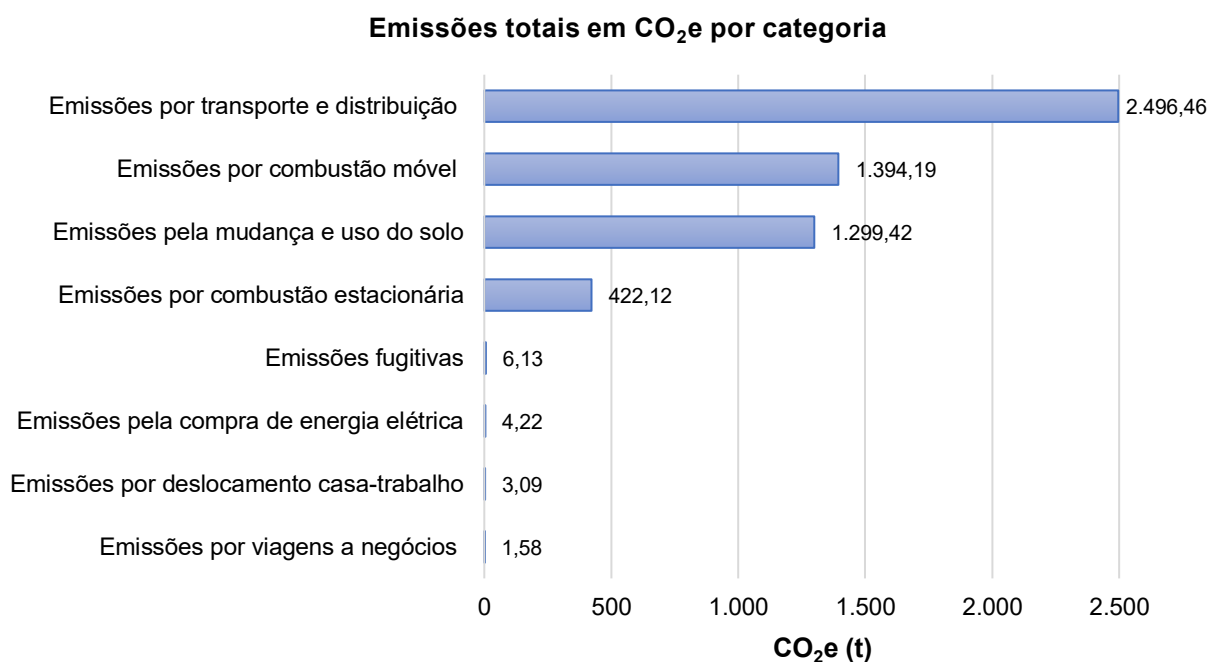


Figura 11 - Distribuição das emissões totais de CO₂e por categoria de fonte emissora, estimadas para a etapa de construção da UFV STL 9.

A fim de aprofundar a análise, os resultados obtidos foram organizados por categoria de fonte emissora. Os subtópicos a seguir apresentam detalhadamente os dados utilizados, os cálculos realizados e a contribuição relativa de cada categoria para as emissões totais de gases de efeito estufa.

4.3.1 Emissões por combustão estacionária

Durante a construção da UFV STL 9, as fontes estacionárias consumiram 180.586,56 litros de óleo diesel comercial e 29,76 kg de acetileno. Esse consumo resultou na emissão estimada de 422,12 toneladas de CO₂e.

Em empreendimentos desse porte e natureza, é comum a instalação de oficinas mecânicas temporárias, que realizam atividades de soldagem e corte de metais. Nessas atividades, o gás acetileno é amplamente utilizado como agente combustível. No entanto, no presente estudo, seu uso correspondeu a apenas 0,02% das emissões totais da categoria, revelando impacto residual no total da combustão estacionária.

Quanto aos equipamentos que operam com óleo diesel, o compressor destacou-se como principal fonte emissora, responsável por 92,18% do consumo total de diesel entre os equipamentos estacionários (**Figura 12**). Esse equipamento é empregado em conjunto com a perfuratriz, sendo essencial para a escavação dos furos destinados à instalação das bases de sustentação dos módulos fotovoltaicos. O compressor fornece ar comprimido de alta pressão à perfuratriz, possibilitando a perfuração eficiente do solo ou da rocha (KARMOUCHE, 2009; FIALHO *et al.*, 2016).

Combustão estacionária: consumo total de óleo diesel por equipamento (l)

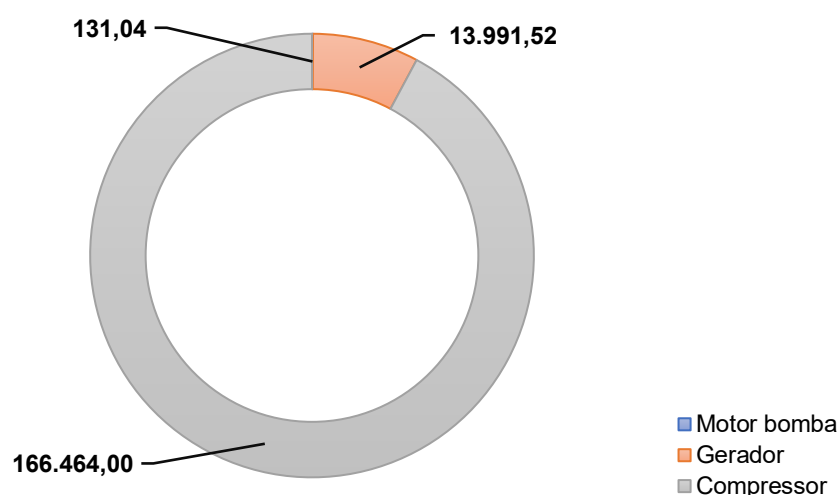


Figura 12 - Distribuição do consumo de óleo diesel comercial por fontes estacionárias durante a etapa de construção da UFV STL 9.

Geradores, por sua vez, são amplamente utilizados para suprir as necessidades energéticas temporárias durante as fases de montagem e comissionamento dos sistemas elétricos e transformadores (STS). O uso de motores-bomba está condicionado à fonte de abastecimento hídrico disponível: quando a água é captada de mananciais naturais, como açudes ou poços, é necessário utilizar esses motores; por outro lado, quando a água é fornecida por caminhões-pipa ou empresas terceirizadas, a utilização do equipamento torna-se dispensável.

4.3.2 Emissões por combustão móvel

Durante a execução das atividades que demandaram o uso de veículos e equipamentos móveis na construção da UFV STL 9, foi registrado o consumo total de 595.488 litros de óleo diesel (comercial). Esse consumo, contabilizado no Escopo 1, resultou na emissão estimada de 1.394,19 toneladas de CO₂e.

A **Figura 13** apresenta o consumo total de diesel por tipo de veículo e equipamento, o qual variou conforme o número de unidades utilizadas, o tempo de operação e a eficiência energética de cada máquina. O caminhão basculante foi responsável pelo maior consumo absoluto de combustível, contribuindo com 18,89% das emissões totais por combustão móvel. Na sequência, destacam-se a escavadeira hidráulica (10,88%) e a motoniveladora (9,67%).

Combustão móvel: consumo total de óleo diesel por veículos e equipamentos (I)

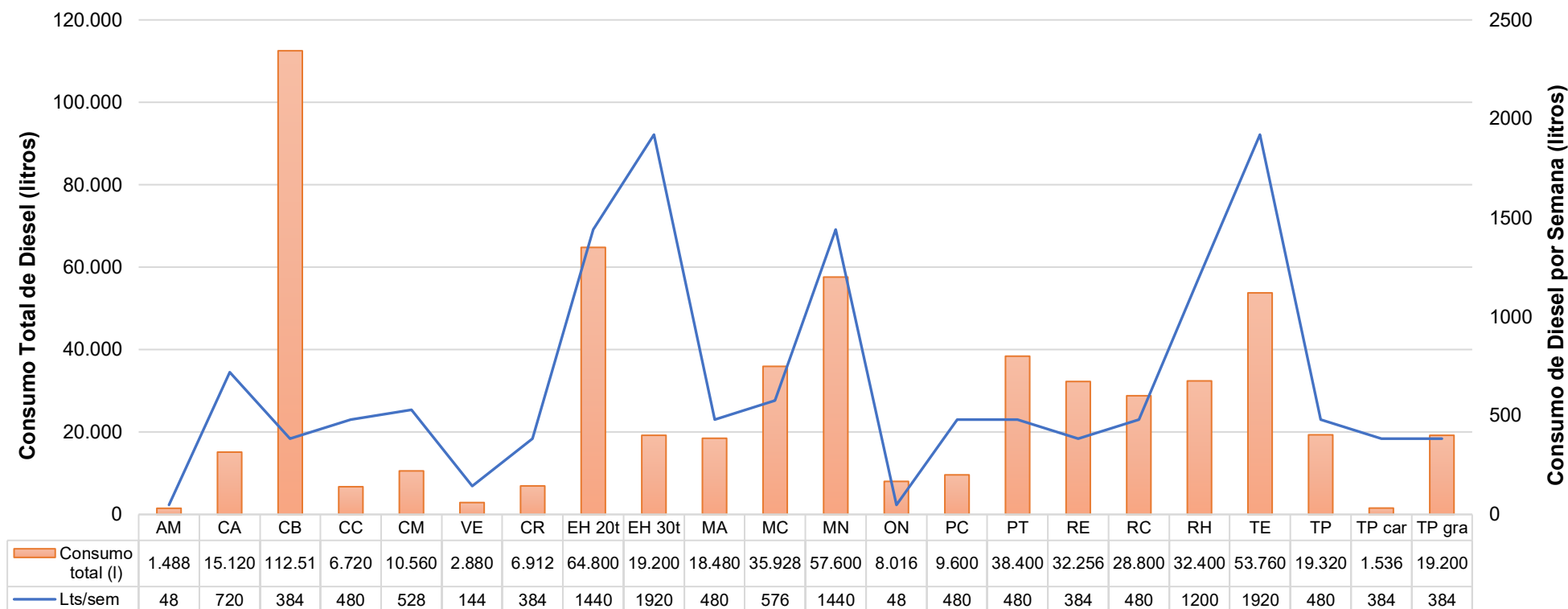


Figura 13 - Distribuição do consumo de óleo diesel comercial por fontes móveis durante a etapa de construção da UFV STL 9.

Legenda - AM: Ambulância; CA: Caminhão; CB: Caminhão basculante 12/14/16m³; CC: Caminhão comboio; CM: Caminhão Munck; VE: Carro 4x4; CR: Cravadora; EH 20t: Escavadeira hidráulica 20 ton; EH 30t: Escavadeira hidráulica 30 ton; MA: Manipulador; MC: Mini-carregadeira; MN: Motoniveladora 120/140 H; ON: Ônibus; PC: Pá carregadeira 924; PT: Pipa traçado 20.000 L; RE: Retroescavadeira; RC: Rolo compactador 12 ton; RH: Rompedor hidráulico; TE: Trator de esteira D6-T ou 750J; TP: Trator de pneus; TP car: Trator de pneu com carroceria; TP gra: Trator de pneu com grade.

Embora o caminhão basculante tenha apresentado menor consumo semanal individual (384 litros), sua ampla utilização e o longo período de operação foram determinantes para o volume final de combustível consumido. De acordo com a RAER (2024), esse tipo de equipamento é indispensável em empreendimentos fotovoltaicos, especialmente durante a movimentação de solo nas fases de terraplanagem, escavação e reaterro de valas, permitindo o transporte e a disposição de grandes volumes de material sem a necessidade de manejo manual.

A **Figura 14** sintetiza os dados de quantidade e tempo de operação dos principais veículos e equipamentos utilizados ao longo da construção da usina, discriminados por tipo de atividade.

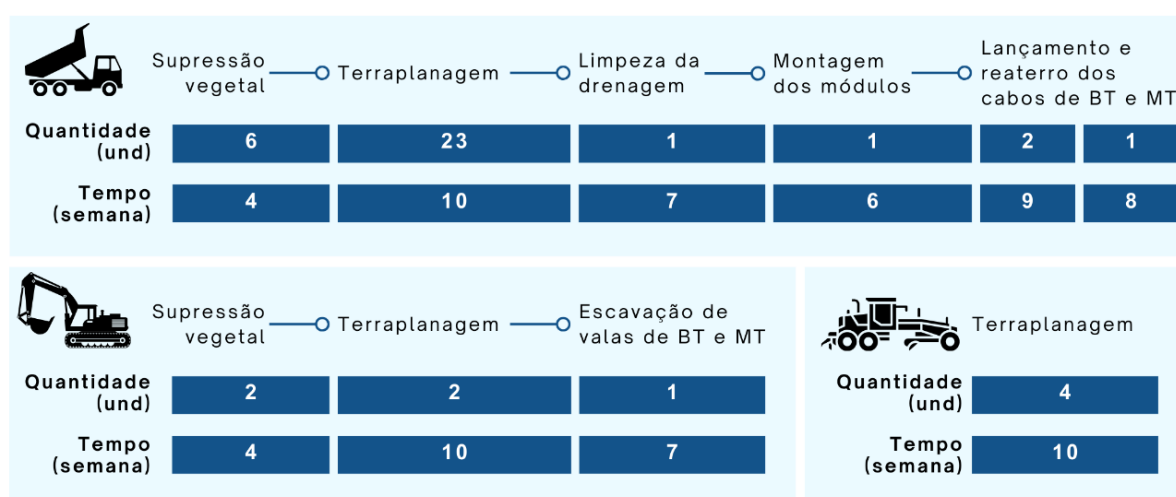


Figura 14 - Resumo da quantidade e tempo de operação dos principais veículos e equipamentos utilizados na construção da UFV STL 9 (caminhão basculante, escavadeira hidráulica e motoniveladora, respectivamente), organizados por tipo de atividade.

Segundo Khan e Huang (2023), máquinas a diesel geram impactos mais significativos ao clima e à camada de ozônio quando comparadas a alternativas híbridas ou elétricas, especialmente durante a fase operacional de sua vida útil. No estudo de caso, a combustão móvel foi responsável por cerca de 25% das emissões totais de GEE durante a construção da UFV STL 9, configurando-se como uma das principais fontes emissoras.

Esse resultado evidencia a importância desse tipo de emissão em empreendimentos fotovoltaicos, sobretudo devido ao uso intensivo de equipamentos movidos a diesel na construção civil. A substituição gradual por máquinas eletrificadas desponta como estratégia promissora de mitigação, contribuindo para a redução das emissões já na fase de implantação e promovendo maior alinhamento ambiental ao longo do ciclo de vida dos projetos.

4.3.3 Emissões fugitivas

As emissões fugitivas contabilizadas no estudo de caso foram provenientes de recargas de equipamentos de ar-condicionado e de extintores de incêndio, totalizando 6,13 toneladas CO₂e, o que corresponde a apenas 0,10% das emissões totais estimadas.

Durante a fase de construção da UFV STL 9, foi realizada a recarga de dois aparelhos de ar-condicionado localizados no canteiro de obras, totalizando o uso de 3,19 kg do gás refrigerante R410A. Também foi efetuada a recarga de um extintor de incêndio do tipo BC, com 6 kg de dióxido de carbono (CO₂), utilizado em treinamento interno da brigada de incêndio da empresa, conforme informações da RAER (2024). A empresa informou que o uso de extintores não é frequente, sendo esses equipamentos acionados apenas em treinamentos e situações emergenciais.

No contexto da energia solar fotovoltaica, as emissões fugitivas não apresentaram grande representatividade, uma vez que se restringiram aos sistemas de refrigeração e extinção de incêndios. No entanto, essa categoria merece atenção por envolver compostos com alto Potencial de Aquecimento Global (GWP), como é o caso do R410A, que, embora não afete a camada de ozônio, possui elevado impacto climático (PANATO, 2020).

A contabilização adequada das emissões fugitivas é fundamental em inventários corporativos de gases de efeito estufa, especialmente aquelas associadas a gases utilizados em equipamentos de segurança e de alta tensão. Entre esses,

destaca-se o hexafluoreto de enxofre (SF₆), utilizado em disjuntores, transformadores e outros dispositivos presentes em subestações elétricas (SANTOS, 2019).

Embora seu uso não tenha sido identificado no estudo de caso, recomenda-se o monitoramento desse composto em empreendimentos do setor, uma vez que é amplamente empregado pela indústria de energia. O SF₆ possui um Potencial de Aquecimento Global (GWP) extremamente elevado (23.500 vezes superior ao do CO₂), sendo considerado um dos gases com maior impacto climático entre os GEE (IPCC, 2014; CUI *et al.*, 2024).

4.3.4 Emissões pela mudança no uso do solo

4.3.4.1 Estatística do inventário florestal

Nas condições estabelecidas, as 27 unidades amostrais foram suficientes para representar a área de estudo, sendo comprovado pelo erro de amostragem de 16,24% (**Tabela 3**).

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos do inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

PARÂMETRO	VALOR
Área total (ha)	91,5
Unidades Amostrais (U.A.)	27
n (número ótimo de U.A.)	18
Média (m ³ /U.A.)	0,5110
Desvio Padrão (m ³ /U.A.)	0,2529
Variância (m ³ /U.A.) ²	0,0640
Variância da Média (m ³ /U.A.) ²	0,0024
Coeficiente de Variação (%)	49,49
Valor de t tabelado	1,7056
Erro de Amostragem (%)	16,24
Intervalo de confiança (m ³ /U.A.) ²	0,4950 < 0,5110 < 0,5270

4.3.4.2 Composição e diversidade florística

A riqueza florística amostrada nas 27 unidades amostrais alocadas na área de implantação da UFV STL 9 resultou na ocorrência de 18 espécies florestais distribuídas em 17 gêneros e 10 famílias botânicas conforme **Tabela 4**.

Tabela 4 - Composição florística do inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

Família	Espécies	Nome comum	Origem	G.E.	S.D.
Anacardiaceae	<i>Myracrodruon urundeuva</i>	Aroeira	Nat	C	Ane
Apocynaceae	<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	Pereiro	Nat	P	Ane
Capparaceae	<i>Capparis flexuosa</i>	Feijão-bravo	Nat	Si	Zoo
Bixaceae	<i>Cochlospermum regium</i>	Algodão-bravo	Nat	NC	Ane
Burseraceae	<i>Commiphora leptophloeos</i>	Umburana de cambão	Nat	St	Zoo
Combretaceae	<i>Combretum leprosum</i>	Mofumbo	Nat	P	Ane
Euphorbiaceae	<i>Croton blanchetianus</i>	Marmeleiro	Nat	P	Aut
	<i>Cnidoscolus quercifolius</i>	Favela	Nat	P	Aut
	<i>Jatropha molíssima</i>	Pinhão bravo	Nat	P	
	<i>Anadenanthera colubrina</i>	Angico	Nat	Si	Aut
Fabaceae	<i>Bauhinia forficata</i>	Mororó	Nat	Si	Aut
	<i>Cenostigma pyramidale</i>	Catingueira	Nat	P	Aut
	<i>Luetzelburgia auriculata</i>	Pau-serrote	Nat	Si	Ane
	<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	Jurema de imbirá	Nat	Si	Aut
	<i>Mimosa tenuiflora</i>	Jurema preta	Nat	P	Aut
	<i>Piptadenia stipulacea</i>	Jurema branca	Nat	Si	Aut
Olacaceae	<i>Ximenia americana</i>	Ameixa do mato	Nat	NC	Zoo
Rhamnaceae	<i>Ziziphus joazeiro</i>	Juazeiro	Nat	P	Zoo

Legenda - G.E: Grupo ecológico; S.D: Síndrome de dispersão; Nat: nativa; P: pioneira; Si: secundária inicial; St: secundária tardia; C: clímax; Ane: anemocórica; Aut: autocórica; Zoo: zoocórica; NC: não classificada.

A florística das unidades amostrais foi composta por espécies nativas do Bioma Caatinga, sendo elas: *Anadenanthera colubrina*, *Aspidosperma pyrifolium*, *Bauhinia forficata*, *Capparis flexuosa*, *Cenostigma pyramidale*, *Cnidoscolus quercifolius*, *Cochlospermum regium*, *Combretum leprosum*, *Commiphora leptophloeos*, *Croton blanchetianus*, *Jatropha molíssima*, *Luetzelburgia auriculata*, *Mimosa*

ophthalmocentra, *Mimosa tenuiflora*, *Myracrodruon urundeuva*, *Piptadenia stipulacea*, *Ximenia americana* e *Ziziphus joazeiro*. Resultados semelhantes foram verificados em áreas de Caatinga (FARIAS *et al.*, 2017; MARQUES *et al.*, 2020).

A família mais abundante em espécies foi a Fabaceae. Esses resultados também foram observados por outros autores nas pesquisas em áreas de Caatinga (MEDEIROS *et al.*, 2018; BATISTA *et al.*, 2019; MARQUES *et al.*, 2020). Em áreas de Caatinga são comuns espécies pertencentes a essa família, em que, esta detém uma alta diversidade de gêneros com ocorrência em maior proporção no nordeste brasileiro, muito em função de suas características fisiológicas e morfológicas (PEREIRA, 2016).

Todas as espécies amostradas no inventário florestal são de origem nativa. No que diz respeito a síndrome de dispersão, foram observadas que os propágulos das espécies são dispersos pela ação dos ventos, dependem dos animais ou desempenham mecanismos próprios para dispersão de frutos e/ou sementes.

As espécies amostradas foram classificadas no grupo ecológico das pioneiras, secundárias iniciais e clímax. Com exceção da *M. urundeuva*, a qual é classificada como clímax, as demais espécies pertencem aos grupos ecológicos pioneiras e secundárias iniciais. A presença dessas espécies evidencia que a área passou por algum tipo de ação antrópica resultando em um ambiente degradado e que atualmente encontra-se em estágio secundário de sucessão ecológica.

O índice de diversidade de Shannon que diz respeito a diversidade florística encontrada no ambiente e varia de 1 a 5, sendo que, quanto maior o valor do índice, maior a diversidade da área em estudo. Já o índice de Pielou tem intervalo de 0 a 1 e diz respeito a uniformidade da distribuição dos indivíduos por espécies. Para a área de implantação da UFV STL 9 foram encontrados valores de 2,29 nat ind⁻¹ para Shannon e 0,79 para Pielou.

Em outras áreas de caatinga antropizadas no semiárido nordestino foram encontrados valores que variaram 1,10 a 2,28 nats.ind⁻¹ para o índice de Shannon (SIZENANDO FILHO *et al.*, 2007; PESSOA *et al.*, 2008; SABINO; CUNHA; SANTANA, 2016; LACERDA; BARBOSA, 2018; LIMA; COELHO, 2018).

4.3.4.3 Parâmetros fitossociológicos

4.3.4.3.1 Estrutura horizontal

Os resultados demonstram que houve a presença de 18 espécies lenhosas, distribuídas em 790 indivíduos mensurados ao longo das 27 unidades amostradas, conforme **Tabela 5**.

Tabela 5 - Parâmetros fitossociológicos da área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

Espécie	Ni	N	AB	DA	DR	FA	FR	DoA	DoR	VI	VI (%)
<i>Anadenanthera colubrina</i>	6	7	0,2108	6,48	0,89	22,22	3,03	0,195	3,85	7,77	2,59
<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	23	148	1,1156	137,04	18,73	85,19	11,62	1,033	20,39	50,74	16,91
<i>Bauhinia cheilantha</i>	18	90	0,1355	83,33	11,39	66,67	9,09	0,125	2,48	22,96	7,65
<i>Cenostigma pyramidale</i>	23	151	1,2024	139,81	19,11	85,19	11,62	1,113	21,97	52,70	17,57
<i>Cnidocolus quercifolius</i>	14	30	0,6430	27,78	3,80	51,85	7,07	0,595	11,75	22,62	7,54
<i>Cochlospermum regium</i>	2	4	0,0682	3,70	0,51	7,41	1,01	0,063	1,25	2,76	0,92
<i>Combretum duarteanum</i>	11	20	0,0775	18,52	2,53	40,74	5,56	0,072	1,42	9,50	3,17
<i>Commiphora leptopoleos</i>	16	31	0,6479	28,70	3,92	59,26	8,08	0,600	11,84	23,84	7,95
<i>Croton blanchetianus</i>	17	103	0,2330	95,37	13,04	62,96	8,59	0,216	4,26	25,88	8,63
<i>Cynophalla flexuosa</i>	3	3	0,0407	2,78	0,38	11,11	1,52	0,038	0,74	2,64	0,88
<i>Jatropha mollissima</i>	22	72	0,0975	66,67	9,11	81,48	11,11	0,090	1,78	22,01	7,34
<i>Luetzelburgia auriculata</i>	1	2	0,0389	1,85	0,25	3,70	0,51	0,036	0,71	1,47	0,49
<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	2	10	0,0377	9,26	1,27	7,41	1,01	0,035	0,69	2,96	0,99
<i>Mimosa tenuiflora</i>	19	72	0,7733	66,67	9,11	70,37	9,60	0,716	14,13	32,84	10,95
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	2	4	0,0119	3,70	0,51	7,41	1,01	0,011	0,22	1,73	0,58
<i>Piptadenia retusa</i>	17	39	0,1146	36,11	4,94	62,96	8,59	0,106	2,09	15,62	5,21
<i>Ximenia americana</i>	1	3	0,0017	2,78	0,38	3,70	0,51	0,002	0,03	0,92	0,31
<i>Ziziphus joazeiro</i>	1	1	0,0216	0,93	0,13	3,70	0,51	0,020	0,39	1,03	0,34
TOTAL		790	5,4718	731,4815	100,0000	733,3333	100,0000	5,0665	100,0000	300,0000	100,0000

Legenda – Ni: Número de parcelas que a espécie ocorre; N: Número de indivíduos amostrados; AB: Área basal da i-ésima espécie; DA: Densidade Absoluta; DR: Densidade Relativa; FA: Frequência Acumulada; FR: Frequência Relativa; DoA: Dominância Absoluta; DoR: Dominância Relativa; VI: Índice de Valor de Importância Absoluto; VI%: Índice de Valor de Importância em percentagem.

Verificou-se que as espécies *C. pyramidale* e *A. pyrifolium* foram as espécies mais abundantes neste estudo, em que, representaram 37,85% dos indivíduos. A *Cenostigma pyramidale* é endêmica da Caatinga, e pode ser encontrada em diversos ambientes. Essa espécie apresenta potencial para recuperação de áreas degradadas, tanto pela sua capacidade fisiológica, como também por ser uma alternativa de sustentabilidade no Bioma Caatinga (QUEIROZ, 2009; DANTAS *et al.*, 2018). Já a *A. pyrifolium* é uma espécie característica da Caatinga, com ampla ocorrência nas regiões semiáridas e de áreas com formação de solos pedregosos.

As espécies que apresentaram os maiores valores de importância ecológica dentro neste ambiente foram: *C. pyramidale*, *A. pyrifolium* e *M. tenuiflora*, as quais juntas representaram 45,43% do valor de importância da comunidade (**Figura 15**). Essas espécies pioneiras são comuns em áreas de Caatinga, apresentam características de fácil adaptação em ambientes com condições adversas, como fácil propagação e regeneração (LUCENA, ALVES E BAKKE, 2017).

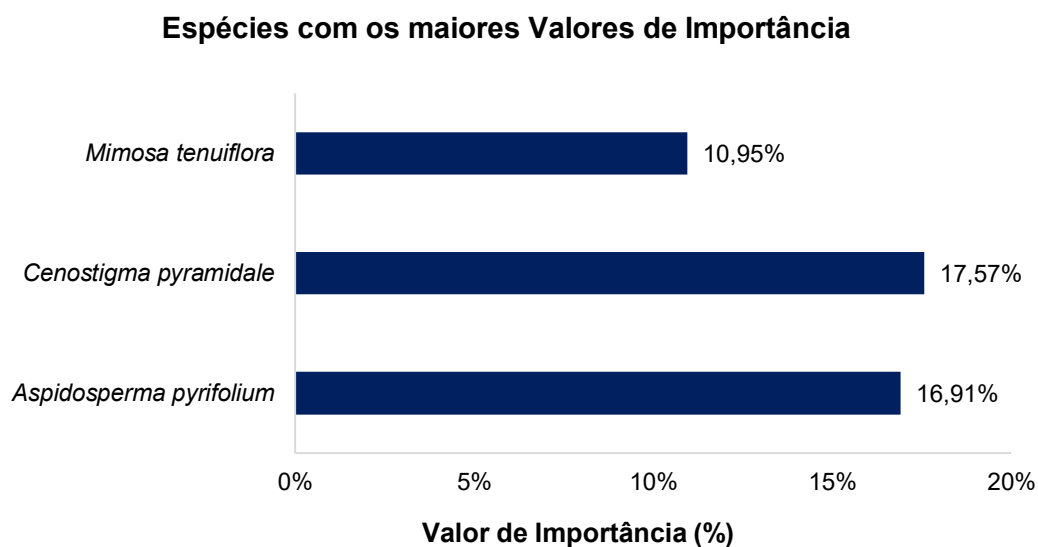


Figura 15 - Espécies com maiores valores de importância do inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

4.3.4.3.2 Estrutura vertical

A distribuição dos indivíduos por classe de altura é apresentada na **Figura 16**, onde a altura média (H_m) constatada nos indivíduos amostrados foi de 2,19 m. Foi verificado maior concentração de indivíduos para o estrato II (intermediário), portanto, 529 indivíduos dos indivíduos (66,96%) apresentaram alturas estimadas com variações de 1,60 m a 2,78 m.

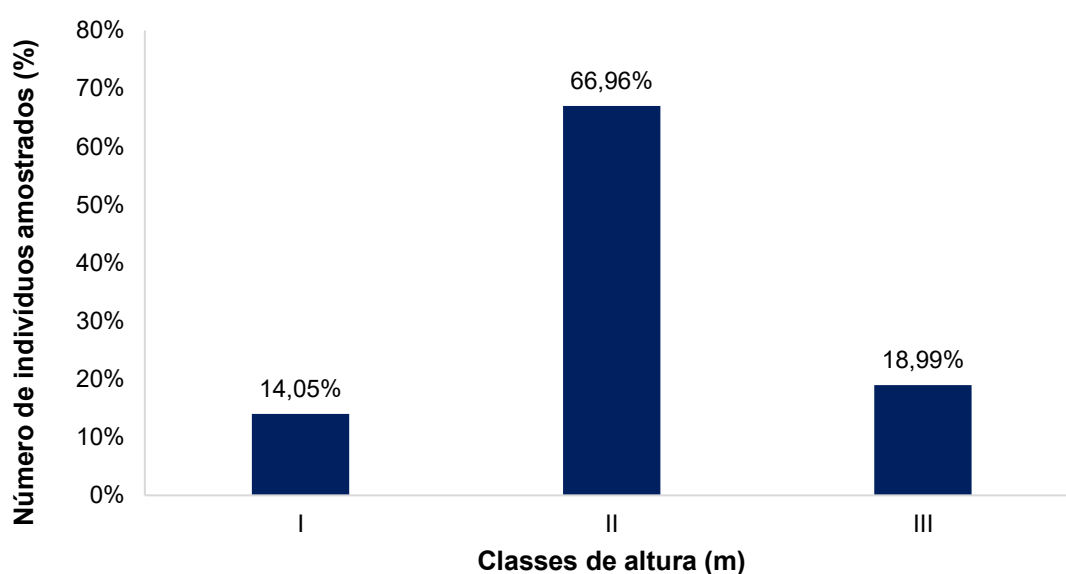


Figura 16 - Classes de altura dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado para implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

Em estudos no semiárido da Caatinga foram observados que há uma tendência de os indivíduos arbóreos apresentarem porte que variam de dois a quatro metros de altura total (ALMEIDA NETO *et al.* 2009; MEDEIROS *et al.*, 2018), sendo esse valor inferior quando se trata da altura comercial, no qual irá variar de acordo com o nível de inclusão dos indivíduos.

4.3.4.3.3 Estrutura diamétrica

Os diâmetros das árvores amostradas variaram de 1,91 cm a 50,56 cm. Observa-se na **Figura 17** a representação gráfica da distribuição dos indivíduos por classe diamétrica. Foi verificado que 77,34% dos indivíduos estão presentes nas primeiras classes diamétricas, ou seja, os diâmetros da grande parte dos indivíduos amostrados variam de 1,91 a 9,90 cm, isto também é constatado pelo valor médio de diâmetro obtido de 7,51 cm para os indivíduos amostrados no inventário florestal da área de implantação da UFV STL 9.

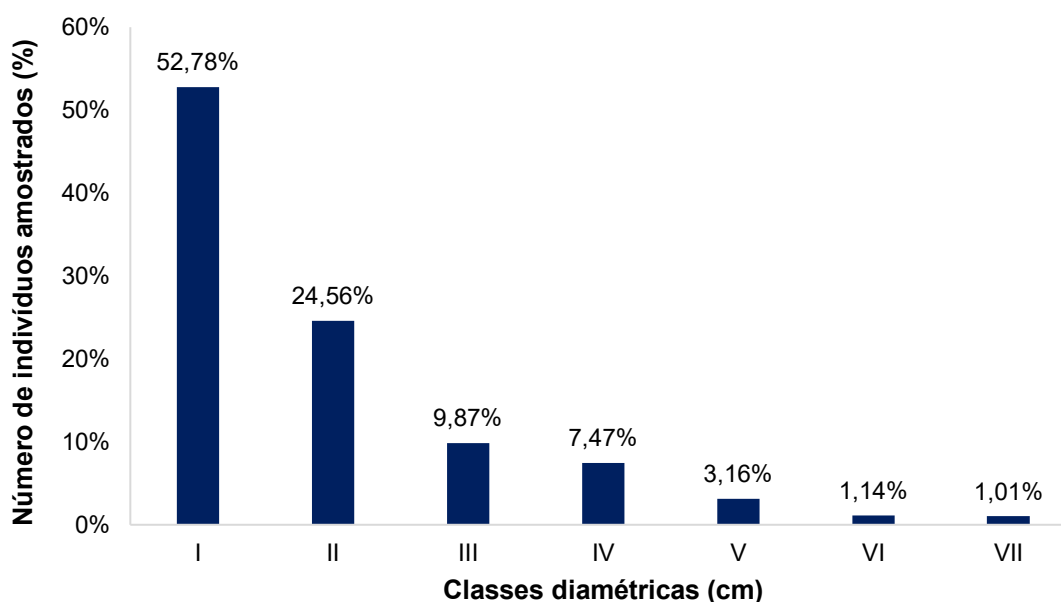


Figura 17 - Classes diamétricas dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado para implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

De acordo com Silva *et al.* (2020), o elevado número de indivíduos nas primeiras classes diamétricas é uma característica recorrente no Bioma Caatinga. Isso se deve à composição florística típica do semiárido, onde o uso da área e o desenvolvimento das espécies florestais influenciam a dinâmica populacional. Com o tempo, essas espécies podem migrar para classes diamétricas posteriores, no entanto, o crescimento é frequentemente limitado pelas condições ambientais adversas da região.

Com isso, observou-se que o gráfico mostra o padrão de distribuição em J-invertido. Para Souza *et al.* (2020), o comportamento dos indivíduos nas classes diamétricas que se assemelha ao J-invertido é característico de florestas nativas inequidâneas que determina a presença de indivíduos pertencentes aos estágios iniciais de desenvolvimento.

4.3.4.3.4 Rendimento lenhoso

A *C. pyramidale* obteve o maior valor de volume amostrado (2,9462 m³/1,08 ha), este dado corrobora com os estudos de estrutura horizontal, em que, esta espécie também se destacou com valores superiores nos parâmetros fitossociológicos avaliados. O volume por parcela em metros cúbicos e por estéreo estão expostos na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Rendimento lenhoso por parcela dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

Parcela	Volume (m ³ /400 m ²)	Volume (st/400 m ²)	Volume (m ³ /ha)	Volume (st/ha)
1	0,3079	1,0221	7,70	25,55
2	0,3081	1,0230	7,70	25,57
3	0,3873	1,2858	9,68	32,15
4	0,9914	3,2913	24,78	82,28
5	1,0681	3,5460	26,70	88,65
6	0,4121	1,3681	10,30	34,20
7	0,7673	2,5475	19,18	63,69
8	0,4259	1,4140	10,65	35,35
9	1,2453	4,1345	31,13	103,36
10	0,7478	2,4828	18,70	62,07
11	0,5651	1,8762	14,13	46,91
12	0,1173	0,3895	2,93	9,74
13	0,4463	1,4817	11,16	37,04
14	0,7532	2,5007	18,83	62,52

15	0,1413	0,4692	3,53	11,73
16	0,5359	1,7792	13,40	44,48
17	0,4913	1,6310	12,28	40,77
18	0,4505	1,4956	11,26	37,39
19	0,6456	2,1433	16,14	53,58
20	0,4589	1,5234	11,47	38,08
21	0,2764	0,9176	6,91	22,94
22	0,2586	0,8585	6,46	21,46
23	0,5732	1,9030	14,33	47,58
24	0,3739	1,2415	9,35	31,04
25	0,2133	0,7080	5,33	17,70
26	0,3718	1,2342	9,29	30,86
27	0,4632	1,5377	11,58	38,44
Média	0,5110	1,6965	12,7748	42,4123

Como pretende-se realizar o cálculo das emissões da mudança no uso do solo pela supressão da biomassa acima do solo por espécie, devido as características específicas de densidade básica e teor de carbono, foi realizado o cálculo do volume por espécie, levando em consideração o somatório do volume de cada espécie nas 27 parcelas inventariadas na área amostral de 1,08 ha, assim como a prospecção do volume de cada espécie em m³ por hectare e estéreo por hectare (**Tabela 7**).

Tabela 7 - Rendimento lenhoso por espécies dos indivíduos amostrados no inventário florestal realizado na área de implantação da UFV STL 9, localizada na zona rural de Santa Luzia/PB.

ESPÉCIE	Volume m³/1,08ha	Volume st/1,08ha	Volume m³/ha	Volume st/ha	Volume m³/91,5ha	Volume st/91,5ha
<i>Anadenanthera colubrina</i>	0,6288	1,6664	0,5823	1,5430	53,2761	141,1817
<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	2,5274	6,6976	2,3402	6,2015	214,1261	567,4342
<i>Bauhinia cheilantha</i>	0,2617	0,6934	0,2423	0,6420	22,1683	58,7460
<i>Cenostigma pyramidale</i>	2,9462	7,8075	2,7280	7,2292	249,6114	661,4703
<i>Cnidoscolus quercifolius</i>	1,8971	5,0272	1,7565	4,6549	160,7241	425,9189
<i>Cochlospermum regium</i>	0,1823	0,4832	0,1688	0,4474	15,4487	40,9392
<i>Combretum duarteanum</i>	0,1645	0,4359	0,1523	0,4036	13,9347	36,9270
<i>Commiphora leptopoleos</i>	2,0279	5,3738	1,8777	4,9758	171,8051	455,2834
<i>Croton blachentianus</i>	0,4714	1,2493	0,4365	1,1567	39,9397	105,8403
<i>Cynophalla flexuosa</i>	0,0916	0,2428	0,0848	0,2248	7,7635	20,5734
<i>Jatropha mollissima</i>	0,1551	0,4110	0,1436	0,3805	13,1387	34,8176
<i>Luetzelburgia auriculata</i>	0,1020	0,2702	0,0944	0,2502	8,6388	22,8927
<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	0,0742	0,1967	0,0687	0,1821	6,2883	16,6640
<i>Mimosa tenuiflora</i>	1,9137	5,0714	1,7720	4,6958	162,1366	429,6620
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	0,0286	0,0758	0,0265	0,0702	2,4237	6,4227
<i>Piptadenia retusa</i>	0,2633	0,6977	0,2438	0,6460	22,3068	59,1130
<i>Ximenia americana</i>	0,0027	0,0072	0,0025	0,0066	0,2289	0,6066
<i>Ziziphus joazeiro</i>	0,0582	0,1543	0,0539	0,1429	4,9345	13,0763
TOTAL	13,7968	36,5615	12,7748	33,8532	1168,8940	3097,5691

4.3.4.4 Emissões pela remoção da biomassa acima do solo

As emissões pela supressão da biomassa acima do solo representaram a terceira maior fonte de emissão de dióxido de carbono do estudo de caso (1.299,42 tCO₂e). O nome das espécies, porcentagem de carbono, densidade básica e volume total estimado são apresentados na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Volume total estimado das espécies registradas no inventário florestal do estudo de caso, com dados de porcentagem de carbono e densidade básica utilizados no cálculo das emissões de dióxido de carbono equivalente.

Nome Científico	C (%)	DB (kg/m³)	Vol _t estimado (m³)
<i>Anadenanthera colubrina</i>	49	780	53,2761
<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	47,2	620	214,1261
<i>Bauhinia cheilantha</i>	47,4	970	22,1683
<i>Cenostigma pyramidale</i>	44,7	790	249,6114
<i>Cnidoscolus quercifolius</i>	49	550	160,7241
<i>Cochlospermum regium</i>	49	490	15,4487
<i>Combretum duarteanum</i>	46,0	680	13,9347
<i>Commiphora leptophloeos</i>	43,9	290	171,8051
<i>Croton blachentianus</i>	46,9	660	39,9397
<i>Capparis flexuosa</i>	49	700	7,7635
<i>Jatropha mollissima</i>	49	290	13,1387
<i>Luetzelburgia auriculata</i>	47,2	370	8,6388
<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	49	712	6,2883
<i>Mimosa tenuiflora</i>	47,0	900	162,1366
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	49	845	2,4237
<i>Piptadenia retusa</i>	46,8	760	22,3068
<i>Ximenia americana</i>	43,9	290	0,2289
<i>Ziziphus joazeiro</i>	49	672	4,9345

Legenda – C: teor de carbono; DB: densidade básica; Vol_t: volume total.

Dentre as espécies inventariadas, *Cenostigma pyramidale* apresentou o maior volume total, bem como a maior estimativa de emissões de dióxido de carbono, seguida das espécies *Mimosa tenuiflora* e *Aspidosperma pyrifolium* (**Figura 18**). Estas

três espécies representam mais de 60% das emissões totais estimadas para a vegetação removida. É importante destacar, que as emissões de CO₂e são diretamente influenciadas pelo volume de madeira, pois quanto maior o volume suprimido mais dióxido de carbono será liberado para o meio ambiente.

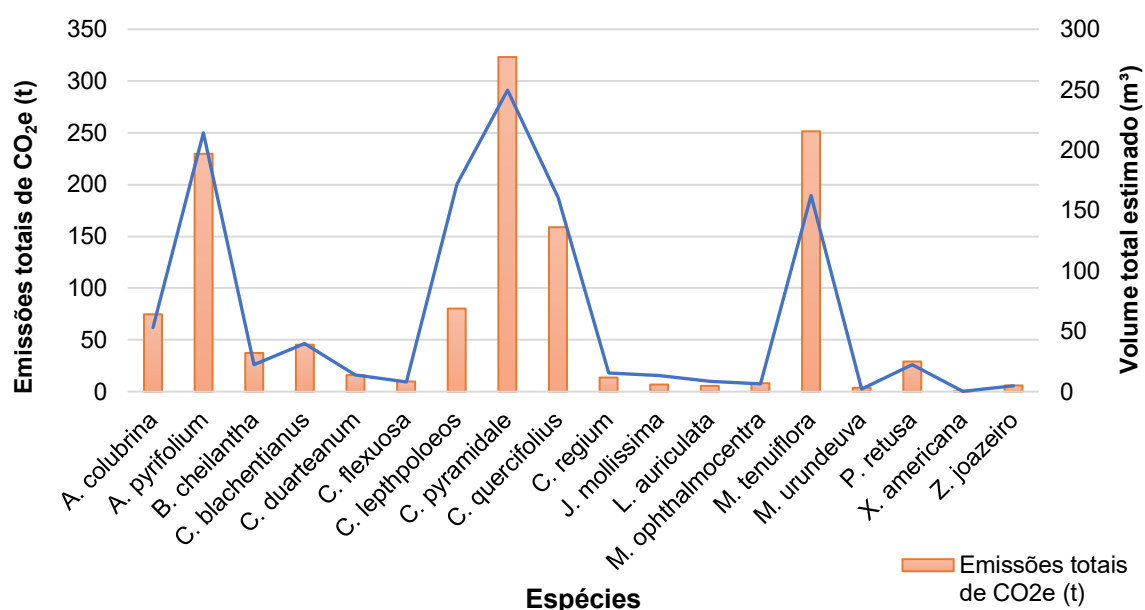


Figura 18 - Volume de madeira e emissões totais de dióxido de carbono por espécie estimados para a UFV STL 9.

4.3.5 Emissões pela compra de energia elétrica

Durante o período de construção da usina fotovoltaica, o consumo de energia elétrica totalizou 104,56 MWh, o que resultou na emissão de 4,22 toneladas de CO₂e (**Tabela 9**). Esse consumo refere-se ao canteiro de obras do Complexo Solar Santa Luzia, cuja área total é de aproximadamente 34 hectares, e contempla as seguintes estruturas operacionais e de apoio: prédio administrativo com copa, salas de reunião e banheiros, ambulatório, área de vivência, refeitório, vestiário, almoxarifado, oficina, carpintaria, viveiro, além de áreas destinadas ao estacionamento e ao estoque de materiais (RAER, 2024).

Tabela 9 - Emissões de dióxido de carbono provenientes da compra de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional.

Ano	Mês	Consumo (MWh)	Fator Médio Mensal (tCO ₂ /MWh)*	Emissões (tCO ₂)
2023	março	9,0459	0,0296	0,2675
	abril	9,2393	0,0340	0,3144
	maio	9,1165	0,0295	0,2690
	junho	6,9168	0,0528	0,3651
	julho	7,2182	0,0495	0,3574
	agosto	8,7057	0,0419	0,3648
	setembro	8,4971	0,0343	0,2917
	outubro	11,5206	0,0387	0,4462
	novembro	11,0097	0,0529	0,5827
	dezembro	6,9011	0,0459	0,3165
2024	janeiro	5,4162	0,0421	0,2280
	fevereiro	10,9704	0,0376	0,4122
Total		104,5573	-	4,2156

*Fatores de Emissão disponíveis pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

As emissões de gases de efeito estufa provenientes da compra de energia elétrica, quando estimadas com base nos fatores de emissão disponibilizados mensalmente pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), estão sujeitas a variações ao longo do tempo. Essa flutuação ocorre em função das mudanças na composição da matriz elétrica nacional, refletindo a maior ou menor participação de fontes renováveis e não renováveis em cada mês. Assim, o fator de emissão está diretamente relacionado ao comportamento da matriz energética brasileira, conforme mencionado por Flizikowski (2012).

Ao consultar o Registro Público de Emissões, observa-se que diversas empresas do setor de eletricidade, como ENERGISA, Elera Renováveis e ELETROBRAS, têm apresentado redução nas emissões de gases de efeito estufa associadas à compra de energia elétrica (Escopo 2) ao longo dos períodos de relato. No inventário da empresa Enerva foi reportado que a usina solar Futura I, com

potência instalada de 31,47 MW, emitiu apenas 1,24 toneladas de CO₂e em 2023 no Escopo 2 (PBGHG PROTOCOL, 2024).

4.3.6 Emissões por transporte e distribuição

Nessa categoria, inclusa no Escopo 3 do estudo de caso, foram contabilizadas as emissões provenientes dos principais materiais utilizados para a construção de uma usina fotovoltaica, são eles: módulos, trackers, inversores, transformadores (STs) e cabos elétricos. Com exceção dos cabos, todos os demais materiais foram adquiridos de fornecedores sediados na China, exigindo transporte hidroviário internacional até o Porto de Suape, em Pernambuco (distância total: 19.855 km), seguido por transporte rodoviário até o município de Santa Luzia/PB (distância total: 390 km).

Das emissões totais estimadas para essa categoria (2.496,46 tCO₂e), 88,59% são provenientes do transporte hidroviário e 11,41% do transporte rodoviário. O transporte marítimo foi realizado por navios cargueiros porta-contêineres enquanto o transporte terrestre foi efetuado por caminhões. Apenas os cabos elétricos foram adquiridos nacionalmente, sendo transportados por via rodoviária de Belo Horizonte/MG até Santa Luzia/PB (distância total: 2.222 km). A **Figura 19** apresenta a quantidade de viagens por tipo de modal e por material transportado.

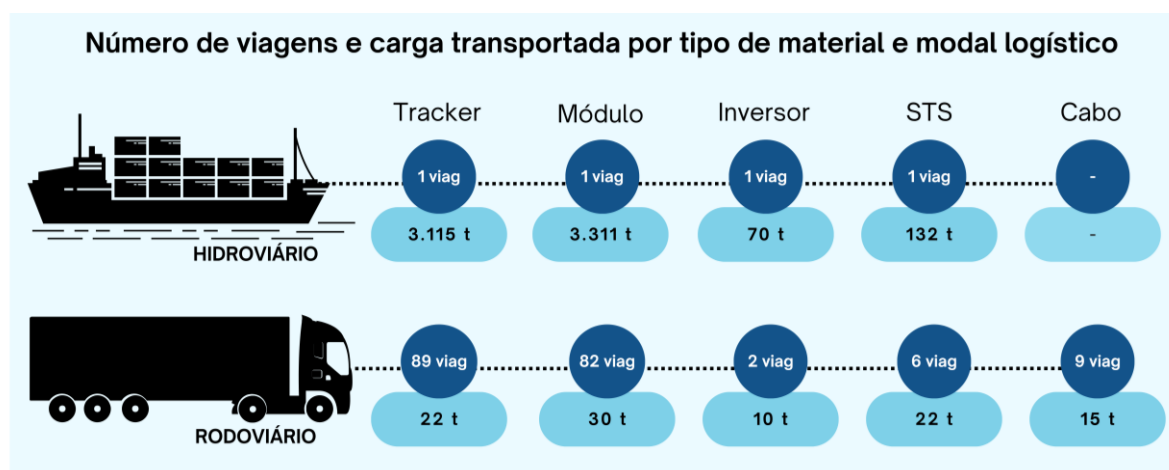


Figura 19 - Representação do número de viagens realizadas e das respectivas cargas transportadas por tipo de material utilizado na construção da UFV STL 9, discriminados por modal logístico (rodoviário e hidroviário)

Legenda – viag: número de viagens; t: toneladas.

Para o transporte terrestre, os veículos foram classificados conforme o tipo de material transportado: caminhões articulados com capacidade superior a 33 toneladas foram utilizados para o transporte dos módulos fotovoltaicos; caminhões rígidos acima de 17 toneladas, para os trackers e STSs; e caminhões rígidos com capacidade entre 7,5 e 17 toneladas, para os cabos e inversores. No transporte marítimo, os módulos foram transportados por navios porta-contêiner classificados na faixa de 5.000 a 7.999 TEU, enquanto os demais materiais foram embarcados em navios com capacidade entre 3.000 e 4.999 TEU.

Essa categoria de emissão está diretamente relacionada à origem dos materiais, ao local de instalação do empreendimento e ao tipo de veículo utilizado no transporte. Em empreendimentos de geração centralizada com potência equivalente, o volume de materiais tende a ser semelhante, o que reforça a influência do modal e da logística adotada sobre o impacto climático.

Devido à grande quantidade de módulos fotovoltaicos demandada por projetos de larga escala, muitas empresas optam por adquiri-los dos principais fabricantes globais, localizados predominantemente na China. Essa escolha é motivada tanto pela competitividade dos preços quanto pelo domínio tecnológico desses fabricantes. Segundo a IEA (2022) e o Portal Solar (2024), a China concentra os maiores fornecedores mundiais de equipamentos para geração de energia solar, especialmente painéis fotovoltaicos, contribuindo significativamente para a redução global de custos e a aceleração da transição energética limpa.

4.3.7 Emissões por deslocamento casa-trabalho e por viagens a negócios

Na categoria deslocamento casa-trabalho, foram consideradas as emissões de gases de efeito estufa associadas aos funcionários que não residem no município de implantação da usina. Segundo a RAER (2024), 30 funcionários técnicos contratados para o empreendimento residiam em outros municípios e realizavam, mensalmente, o deslocamento entre o local de trabalho e suas residências. Esse deslocamento foi realizado por ônibus de viagem e considerado ida e volta em frequência mensal, com

base em 230 dias úteis de trabalho por ano. As emissões resultantes totalizaram 3,09 toneladas de CO₂e.

É importante destacar que os demais colaboradores, residentes no próprio município da usina, utilizaram transporte coletivo (ônibus urbano) para deslocamento diário. Como esses veículos estavam a serviço do empreendimento, suas emissões foram contabilizadas na categoria de combustão móvel.

Na categoria viagens a negócios, foram consideradas 10 viagens aéreas realizadas por representantes da empresa entre os Estados de São Paulo e Paraíba, com o objetivo de participar de reuniões presenciais relacionadas ao empreendimento. Essas viagens geraram a emissão de 1,58 toneladas de CO₂e.

As emissões de gases de efeito estufa associadas às categorias deslocamento casa-trabalho e viagens a negócios apresentam variabilidade significativa, uma vez que estão diretamente ligadas às características operacionais de cada projeto. O número de colaboradores deslocados, a distância percorrida, a frequência das viagens e o modal de transporte utilizado são fatores que influenciam diretamente essa variabilidade. Assim, essas emissões não seguem um padrão fixo e podem variar de acordo com as especificidades de cada empreendimento.

4.4 Neutralidade de carbono

A UFV STL 9 de potência instalada de 50 MWac, com fator de capacidade de 32%, gera mensalmente 11.680,00 MWh resultando em uma geração estimada por ano de 140.160,00 MWh. Com base na geração de energia fotovoltaica e no fator médio de emissão do SIN dos últimos 10 anos ($Fe = 0,08525 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$), o empreendimento neutraliza as 5.627,20 toneladas de CO₂e, emitidas durante a etapa de construção, em aproximadamente 5,7 meses após o início da operação comercial.

Desta forma, os gases de efeito estufa emitidos durante o período de março de 2023 a fevereiro de 2024, fase de construção do empreendimento, contabilizados nas categorias de combustão estacionária, combustão móvel, emissões fugitivas, mudanças no uso do solo, transporte e distribuição (*upstream*), deslocamento casa-trabalho e viagens a negócios, são neutralizados até agosto de 2024 (**Figura 20**).

**Estimativa da neutralização das emissões de gases de efeito estufa
com base na geração de energia**

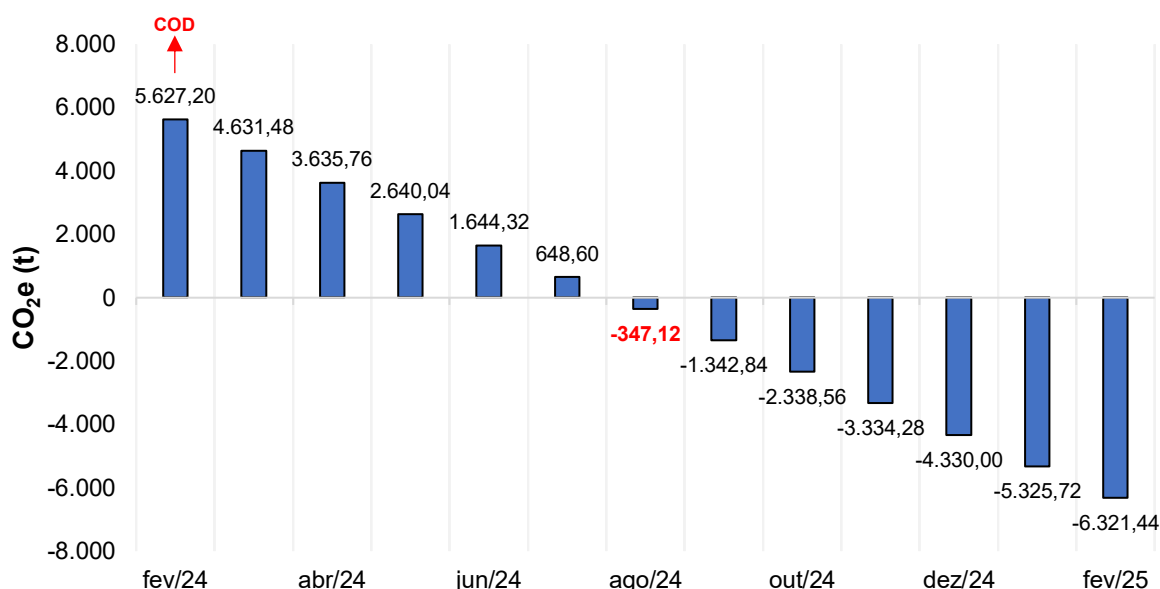


Figura 20 - Estimativa da neutralização das emissões de gases de efeito estufa do estudo de caso, considerando as emissões geradas durante a fase de construção e as emissões evitadas por meio da geração de energia fotovoltaica a partir do início da operação comercial (COD).

Após a identificação da data prevista da neutralização das emissões do estudo de caso, estima-se que, ao evitar as emissões de 995,72 tCO₂e por mês, o que corresponde a 11.948,64 tCO₂e por ano, a usina fotovoltaica analisada evitará, ao longo de 25 anos de operação comercial, a emissão de aproximadamente 279.180,63 tCO₂e na atmosfera. Para essa projeção, foram consideradas a taxa de degradação anual dos módulos fotovoltaicos (0,4%) e a compensação das 5.879,05 tCO₂e emitidas durante a fase de construção do empreendimento, já neutralizadas nos primeiros meses de operação.

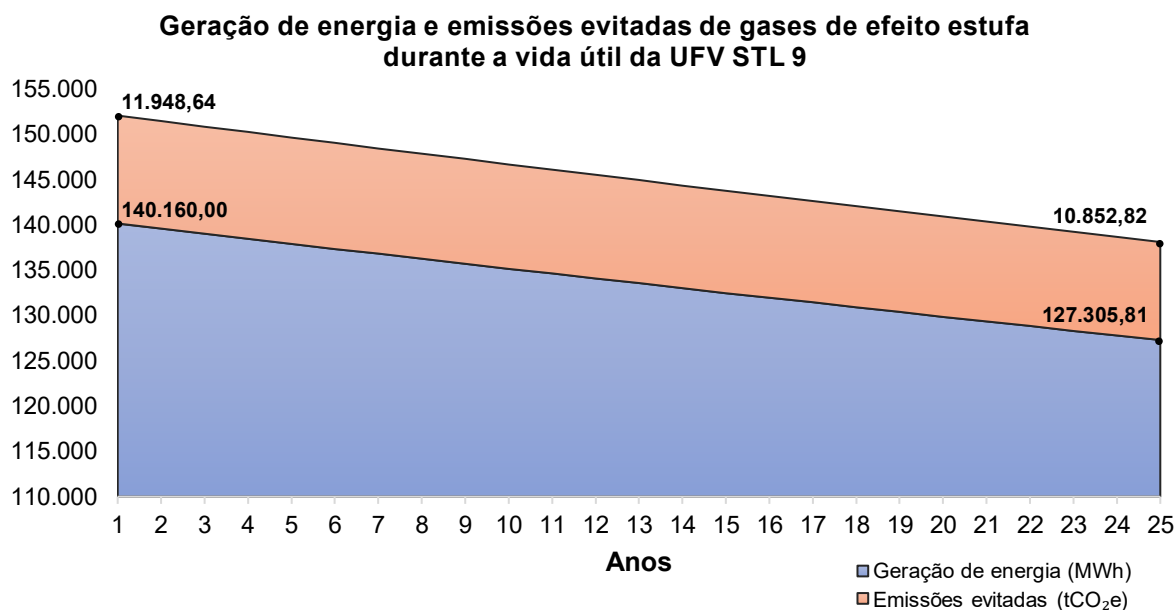


Figura 21 - Estimativa da geração de energia elétrica e das emissões evitadas de gases de efeito estufa ao longo dos 25 anos de vida útil da UFV STL 9, considerando a taxa anual de degradação de 0,4% nos módulos fotovoltaicos.

Para a empresa responsável pela construção, operação e manutenção da usina fotovoltaica, compreender o tempo necessário para a neutralização das emissões diretas de gases de efeito estufa (Escopo 1) é um elemento estratégico relevante. Sob essa ótica, destacam-se como principais fontes emissoras, sob controle direto do empreendimento, as categorias de combustão estacionária, combustão móvel, emissões fugitivas e mudanças no uso do solo, cujas emissões somam 3.121,86 toneladas de CO₂e. A neutralização desse montante é estimada para ocorrer em aproximadamente 3,1 meses após o início da operação comercial, previsto para junho de 2024.

Conforme apontado por Silva e Raadal (2019) e Schultz (2021), a etapa de maior emissão de gases de efeito estufa em projetos fotovoltaicos é a de pré-instalação, especialmente devido à produção dos módulos fotovoltaicos, que envolve a extração e beneficiamento de matérias-primas como o silício. No presente estudo, as emissões associadas à pré-instalação e à operação da usina não foram consideradas, uma vez que não são controladas diretamente pela empresa e não estavam disponíveis no escopo da análise.

A quantificação das emissões de gases de efeito estufa ao longo das fases de um empreendimento de geração de energia renovável é essencial para definir o momento em que o projeto atinge efetivamente a neutralidade de carbono. Este marco, conforme demonstrado no estudo de caso, não é alcançado imediatamente após o início da geração de energia, sendo necessário um período adicional de operação para que as emissões iniciais sejam totalmente compensadas.

Assim, a estimativa do tempo necessário para neutralização permite avaliar com maior precisão a contribuição líquida do empreendimento para a mitigação das mudanças climáticas ao longo de sua vida útil. Esse tipo de análise é relevante não apenas para fins regulatórios e de sustentabilidade corporativa, mas também para reforçar a importância das energias renováveis na transição para uma economia de baixo carbono.

5. CONCLUSÕES

A implantação de uma usina fotovoltaica de 50 MWac, denominada UFV STL 9, localizada na região Nordeste do Brasil, resultou na emissão de 5.627,20 toneladas de CO₂e, correspondendo a uma intensidade de carbono de 112,54 toneladas de CO₂e por MWac construído.

A usina tem potencial para gerar mensalmente 11.680,00 MWh de energia renovável, evitando a emissão de 995,72 toneladas de CO₂e por mês, ao substituir fontes convencionais da matriz elétrica nacional. A energia gerada é injetada no Sistema Interligado Nacional e distribuída para consumo final, contribuindo com a mitigação das emissões setoriais.

Considerando o volume de energia mensal gerado e o fator médio de emissão adotado, estima-se que as emissões totais de gases de efeito estufa decorrentes da fase de construção serão neutralizadas em aproximadamente seis meses após o início da operação comercial da usina.

A categoria de transporte e distribuição foi responsável pela maior parcela das emissões, evidenciando a necessidade e importância de incorporação das categorias do Escopo 3 nos inventários corporativos de gases de efeito estufa.

Para aprimorar a estimativa das emissões de gases de efeito estufa durante a construção de uma usina fotovoltaica, recomenda-se ampliar o escopo de categorias analisadas, incluindo o transporte de outros insumos relevantes, bem como as emissões associadas a outras categorias, como o tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos.

Em relação ao ciclo de vida completo de empreendimentos fotovoltaicos, que abrange as etapas de pré-instalação, instalação, operação e descomissionamento, ressalta-se a importância de pesquisas que contemplem emissões de CO₂e associadas à extração e beneficiamento de matérias-primas, ao processo de fabricação dos módulos fotovoltaicos e à destinação final dos componentes ao final da vida útil do sistema.

Ainda que a conversão da radiação solar em eletricidade não envolva emissões diretas de gases de efeito estufa, o presente estudo demonstra que há emissões

relevantes associadas às fases anteriores e posteriores à operação comercial. Assim, é essencial que os cálculos de emissões evitadas, frequentemente utilizados em metas e relatórios de sustentabilidade corporativa, considerem as emissões relativas a todo o ciclo de vida do empreendimento, especialmente nas fases de pré-instalação, instalação e descomissionamento.

CAPÍTULO 3

SunMetricsC: PLATAFORMA APLICADA À ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E NEUTRALIZAÇÃO DE CARBONO EM PROJETOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **SunMetricsC: plataforma aplicada à estimativa de emissões de gases de efeito estufa e neutralização de carbono em projetos de energia solar fotovoltaica.** 2025. Orientador: Emanuel Araújo Silva.

RESUMO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento, estrutura e validação da SunMetricsC, uma plataforma web criada para quantificar as emissões de gases de efeito estufa e estimar a neutralidade de carbono em empreendimentos de geração solar fotovoltaica. A plataforma foi baseada nas diretrizes metodológicas do Programa Brasileiro GHG Protocol, com adaptações específicas ao contexto das usinas solares. A plataforma contempla seis categorias principais de fontes emissoras e permite ainda o cálculo das emissões evitadas com base na energia gerada, projetando o tempo necessário para a neutralização das emissões totais. Sua interface é intuitiva, com funcionalidades voltadas à inserção simplificada de dados, visualização gráfica dos resultados e geração automática de relatórios. A validação da SunMetricsC foi conduzida por meio de análises estatísticas comparativas com os resultados obtidos manualmente pela ferramenta oficial do Programa Brasileiro GHG Protocol, utilizando como estudo de caso o empreendimento UFV STL 9. Os resultados demonstraram elevada consistência e precisão da plataforma, atestando sua aplicabilidade prática em empreendimentos de geração solar. A flexibilidade de uso, a interface amigável, a estrutura modular por categoria de fontes emissoras e a incorporação de funcionalidades inéditas, como a projeção da neutralidade de carbono e o cálculo das emissões por supressão vegetal, ampliam seu potencial de utilização como ferramenta de apoio à gestão ambiental, ao monitoramento de compromissos climáticos e à formulação de estratégias de mitigação no setor de energia renovável.

Palavras-chave: plataforma web; gases de efeito estufa; energia solar fotovoltaica; neutralidade de carbono; supressão vegetal.

AZEVEDO, Sebastiana Renata Vilela. **A Platform Applied to Estimating Greenhouse Gas Emissions and Carbon Neutralization in Photovoltaic Solar Energy Projects**. 2025. Advisor: Emanuel Araújo Silva.

ABSTRACT

This chapter presents the development, structure and validation of SunMetricsC, a web platform created to quantify greenhouse gas emissions and estimate the carbon neutrality of photovoltaic solar power projects. This platform was based on the methodological guidelines of the Brazilian GHG Protocol Program, with specific adaptations to the context of solar power plants. The platform encompasses six main categories of emission sources and also allows for the calculation of avoided emissions based on the energy generated, projecting the time required for full carbon neutralization. Its interface is intuitive, featuring functionalities for simplified data input, graphical visualization of results, and automatic report generation. Validation of SunMetricsC was carried out through comparative statistical analyses between the results obtained manually using the official tool of the Brazilian GHG Protocol Program and those generated by the platform, using the UFV STL 9 solar plant as a case study. The results demonstrated high consistency and accuracy, confirming its practical applicability to solar energy projects. Its flexibility of use, user-friendly interface, modular structure organized by emission source categories, and the incorporation of innovative features, such as carbon neutrality projection and emission calculation from vegetation clearing, enhance its potential as a tool for environmental management, climate commitment monitoring, and the formulation of mitigation strategies within the renewable energy sector.

Keywords: web platform; greenhouse gases; photovoltaic solar energy; carbon neutrality; vegetation clearing.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do enfrentamento às mudanças climáticas, governos, empresas e consumidores têm buscado, cada vez mais, não apenas se adaptar e conviver com os impactos já em curso, mas também mitigar suas causas, com ênfase na redução das emissões de gases de efeito estufa resultantes de suas atividades (CUCCHIELLA *et al.*, 2017).

Uma das estratégias mais adotadas para quantificação dos gases é a elaboração de inventários, que representam a etapa inicial de uma abordagem estruturada voltada ao gerenciamento das emissões e à proposição de ações mitigadoras (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022; DIAS *et al.*, 2023). Ao possibilitarem a quantificação dos principais focos emissores, os inventários oferecem subsídios técnicos essenciais para o planejamento de medidas corretivas e para o cumprimento de metas estabelecidas em compromissos voluntários ou regulatórios.

Observa-se, portanto, uma demanda crescente por ferramentas que possibilitem tanto a estimativa das emissões de gases de efeito estufa quanto a projeção de medidas de compensação de carbono, considerando as especificidades de diferentes setores e atividades produtivas (ALVES, 2018). A existência de soluções acessíveis, com linguagem simplificada e aplicabilidade prática, tem potencial para ampliar o engajamento de empreendedores, gestores públicos e técnicos ambientais na adoção de estratégias efetivas de mitigação (KELLER *et al.*, 2014).

Nesse contexto, destacam-se as denominadas calculadoras de carbono, que consistem em ferramentas desenvolvidas para estimar as emissões de gases de efeito estufa associadas a diferentes tipos de atividades, podendo abranger desde ações individuais até processos produtivos de maior escala. Estas variam em complexidade e abrangência, indo desde modelos simplificados voltados ao público geral até sistemas mais robustos, utilizados por empresas e instituições para a quantificação de emissões em seus empreendimentos.

Embora desempenhem um papel relevante na sensibilização e no apoio à gestão ambiental, observa-se, nos últimos anos, uma proliferação de calculadoras de carbono online, o que tem gerado preocupações quanto à consistência dos resultados

obtidos, dada a variação de metodologias adotadas por essas ferramentas (BIRNIK, 2013; ALVES, 2018). Muitas dessas calculadoras apresentam limitações quanto ao detalhamento metodológico, ao escopo das fontes emissoras consideradas e à rastreabilidade dos dados, o que reforça a necessidade do desenvolvimento de soluções específicas e tecnicamente consistentes para setores com dinâmicas próprias.

Alves (2018) avaliando 15 calculadoras individuais de carbono disponibilizadas em websites do Brasil, concluiu que existem discrepâncias entre os fatores de emissão e os fatores de conversão utilizados pelas calculadoras, demonstrando a necessidade de padronização, e que, no geral, as calculadoras não disponibilizam informações sobre seus métodos e estimativas.

Nesse cenário de crescente demanda por ferramentas confiáveis e padronizadas, destacam-se as soluções desenvolvidas pelo *GHG Protocol*, amplamente utilizadas no contexto global. Essas ferramentas permitem que empresas desenvolvam inventários abrangentes e confiáveis de suas emissões de gases de efeito estufa.

O *GHG Protocol* disponibiliza ferramentas intersetoriais, ferramentas personalizadas para cada país, ferramentas específicas para alguns setores e ajudam países e cidades a monitorarem o progresso em direção às suas metas climáticas (GHG PROTOCOL, 2025). No Brasil, o Programa Brasileiro GHG Protocol é responsável pela adaptação do método *GHG Protocol* ao contexto brasileiro e desenvolvimento de ferramentas de cálculo para estimativas de emissões de gases do efeito estufa (FGV, 2025).

Apesar da existência de metodologias amplamente aceitas, como o *GHG Protocol*, capazes de orientar a elaboração de inventários corporativos, ainda são escassas as iniciativas voltadas à construção de ferramentas adaptadas às realidades setoriais específicas, como o da geração de energia solar fotovoltaica, sobretudo ferramentas que projetem emissões evitadas com a geração de energia renovável.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver uma plataforma web para empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica, capaz de quantificar as emissões de gases de efeito estufa e projetar o tempo necessário para sua neutralização com base na geração de energia renovável.

2.2 Específicos

1. Desenvolver plataforma de quantificação de emissões de gases de efeito estufa para empreendimentos de energia solar fotovoltaica, utilizando a metodologia do *GHG Protocol*, visando a sua customização para esse setor;
2. Implementar uma funcionalidade para estimativa de emissões evitadas pela geração de energia solar fotovoltaica;
3. Implementar funcionalidade para projeção do tempo necessário para neutralização de gases de efeito estufa relacionados à empreendimentos de energia solar fotovoltaica;
4. Aplicar a plataforma desenvolvida em dados reais de uma usina solar fotovoltaica, visando validação e análise de eficiência do modelo proposto.

3. METODOLOGIA

3.1 Identificação das fontes de emissão

As atividades associadas à instalação e operação de empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica envolvem diferentes processos que resultam na emissão de gases de efeito estufa. Com base nas análises realizadas no Capítulo 2, identificaram-se como principais categorias emissoras no setor: combustão estacionária, combustão móvel, emissões fugitivas, mudança no uso do solo, tratamento de resíduos sólidos, tratamento e disposição de efluentes líquidos, compra de energia elétrica, transporte e distribuição, viagens a negócios, deslocamento casa/trabalho, bens de capital e tratamento de fim de vida de produtos vendidos.

Para o desenvolvimento da plataforma SunMetricsC, foram consideradas apenas as emissões relacionadas às fases de instalação e operação de uma usina fotovoltaica, sendo desconsideradas aquelas associadas à produção de materiais (fase pré-implantação) e ao descomissionamento do empreendimento. A plataforma concentra-se nas categorias que, segundo evidências do Capítulo 2, apresentam maior relevância para o setor solar nas fases consideradas, a saber: combustão estacionária, combustão móvel, mudança no uso do solo, emissões fugitivas, compra de energia elétrica e transporte e distribuição.

Dentro de cada uma dessas categorias, foram selecionadas as fontes de emissão mais representativas ou recorrentes em empreendimentos solares fotovoltaicos. Essa seleção orientou a definição dos parâmetros a serem utilizados na plataforma, como os tipos de equipamentos, combustíveis e insumos normalmente empregados no setor, bem como os respectivos fatores de emissão. A **Figura 1** apresenta um panorama das categorias e fontes de emissão contempladas, evidenciando o escopo setorial específico da plataforma desenvolvida.

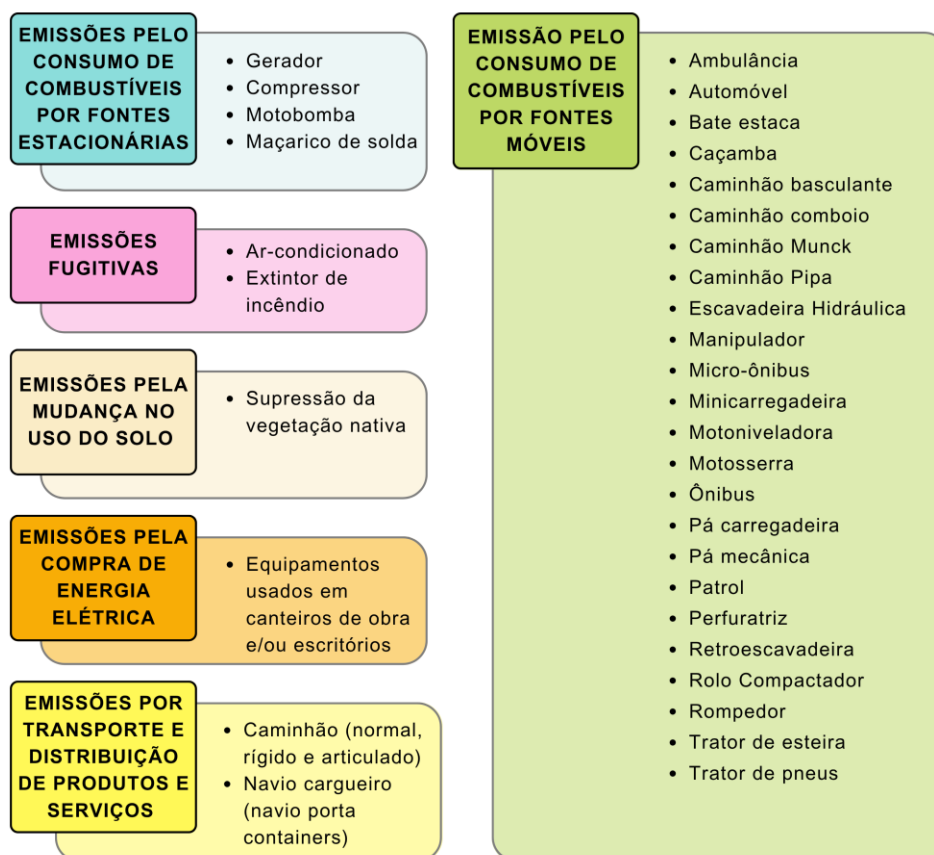


Figura 1- Categorias e principais fontes de emissão de gases de efeito estufa aplicáveis a empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Fatores de emissão

De acordo com o IPCC (2019), fatores de emissão são coeficientes que quantificam as emissões ou remoções de um gás por unidade de atividade. Normalmente, são baseados em amostras de dados de medição, cujos resultados são consolidados para representar uma taxa média de emissão característica de determinado nível de atividade, sob condições operacionais específicas. Esses parâmetros são fundamentais para estimativas de emissões e permitem a conversão de dados de atividade em dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Neste estudo, foram utilizados os fatores de emissão disponibilizados na *Ferramenta de Estimativa de Gases de Efeito Estufa para Fontes Intersectoriais* do

Programa Brasileiro GHG Protocol (Ferramenta GHG Protocol, versão 2024.0.1). Essa ferramenta consolida fatores baseados em referências nacionais e internacionais amplamente reconhecidas, tais como: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006); Ministério de Meio Ambiente (MMA; 2014); Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022); Government conversion factors for Company Reporting (DEFRA/UK, 2023).

3.2.1 Fatores de emissão para combustão estacionária

A **Tabela 1** apresenta os combustíveis considerados na plataforma SunMetricsC, com suas respectivas composições em frações fósseis e biocombustíveis. A seleção contempla combustíveis comumente utilizados, ou com potencial de uso, em atividades relacionadas a empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica, particularmente na categoria de combustão estacionária. As proporções de mistura adotadas refletem os percentuais médios comerciais no Brasil, conforme registrado na Ferramenta GHG Protocol (versão 2024.0.1), e foram integradas à base de cálculo da plataforma.

Tabela 1 - Composição dos combustíveis utilizados na combustão estacionária.

Combustível	Und	O combustível é formado por		Porcentagem da mistura	
		Combustível fóssil	Biocombustível	Combustível fóssil	Biocombustível
Acetileno	kg	Acetileno	-	100,00%	-
Etanol	L	-	Etanol Hidratado	-	100,00%
Gasolina Automotiva (comercial)	L	Gasolina Automotiva (pura)	Etanol Anidro	73,00%	27,00%
Óleo Diesel (comercial)	L	Óleo Diesel (puro)	Biodiesel (B100)	88,50%	11,50%

Legenda – Und: unidade

A **Tabela 2** apresenta os fatores de emissão de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) utilizados na plataforma, organizados por tipo de

combustível e fração correspondente (fóssil ou biocombustível). Os valores foram obtidos segundo os parâmetros do Programa Brasileiro GHG Protocol, conforme descrito no item 3.2.

Tabela 2 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis e biocombustíveis em fontes estacionárias.

Combustível	Fatores de emissão - combustível fóssil			Fatores de emissão - biocombustível		
	CO ₂ (kg/un)	CH ₄ (kg/un)	N ₂ O (kg/un)	CO ₂ (kg/un)	CH ₄ (kg/un)	N ₂ O (kg/un)
Acetileno	3,38462	-	-	-	-	-
Etanol	-	-	-	1,51008	0,00006	0,00001
Gasolina Automotiva (comercial)	2,23899	0,00010	0,00002	1,58194	0,00007	0,00001
Óleo Diesel (comercial)	2,63091	0,00011	0,00002	2,45601	0,00010	0,00002

Legenda – CO₂: dióxido de carbono; CH₄: metano; N₂O: óxido nitroso.

3.2.2 Fatores de emissão para combustão móvel

A **Tabela 3** apresenta os combustíveis considerados na plataforma desenvolvida, com suas respectivas composições em frações fósseis e biocombustíveis, aplicáveis à categoria de combustão móvel. Os combustíveis selecionados foram definidos com base nas fontes móveis comumente utilizadas, ou com potencial de uso em empreendimentos fotovoltaicos, incluindo automóveis, caminhões, máquinas pesadas e equipamentos específicos de obras, como escavadeiras, perfuratrizes, motoniveladoras, entre outros. As proporções de mistura adotadas refletem os percentuais médios comerciais no Brasil, conforme registrado na Ferramenta GHG Protocol (versão 2024.0.1), e foram integradas à base de cálculo da plataforma.

Tabela 3 - Composição dos combustíveis utilizados na combustão móvel.

Combustível	Und	O combustível é formado por:		Porcentagem da mistura	
		Combustível fóssil	Biocombustível	Combustível fóssil	Biocombustível
Biodiesel (B100)	L	-	Biodiesel (B100)	-	100,00%
Etanol	L	-	Etanol Hidratado	-	100,00%
Gás Natural Veicular (GNV)	m³	Gás Natural Veicular (GNV)	-	100,00%	-
Gasolina Automotiva (comercial)	L	Gasolina Automotiva (pura)	Etanol Anidro	73,00%	27,00%
Óleo Diesel (comercial)	L	Óleo Diesel (puro)	Biodiesel (B100)	88,50%	11,50%

A **Tabela 4** apresenta os fatores de emissão de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), por tipo de combustível e fração correspondente (fóssil ou biocombustível), conforme incorporado à lógica de cálculo da plataforma. Esses fatores permitem estimar as emissões associadas ao consumo de combustíveis por fontes móveis utilizados em obras e operações de usinas fotovoltaicas. Os valores foram obtidos segundo os parâmetros do Programa Brasileiro GHG Protocol, conforme descrito no item 3.2.

Tabela 4 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis e biocombustíveis em fontes móveis.

Combustível	Fatores de emissão - combustível fóssil			Fatores de emissão - biocombustível		
	CO ₂ (kg/un)	CH ₄ (kg/un)	N ₂ O (kg/un)	CO ₂ (kg/un)	CH ₄ (kg/un)	N ₂ O (kg/un)
Biodiesel (B100)	-	-	-	2,43100	0,00033	0,00002
Etanol	-	-	-	1,45700	0,00038	0,00001
Gás Natural Veicular (GNV)	1,99900	0,00339	0,00011	-	-	-
Gasolina Automotiva (comercial)	2,21200	0,00081	0,00026	1,52600	0,00022	0,00001
Óleo Diesel (comercial)	2,60300	0,00014	0,00014	2,43100	0,00033	0,00002

Legenda – CO₂: dióxido de carbono; CH₄: metano; N₂O: óxido nitroso.

3.2.3 Fatores de emissão para as emissões fugitivas

Para as emissões fugitivas, foram consideradas três fontes potenciais de liberação de gases de efeito estufa em empreendimentos de geração solar fotovoltaica: os equipamentos de refrigeração e ar-condicionado (RAC), os extintores de incêndio e os dispositivos elétricos que utilizam hexafluoreto de enxofre (SF₆), como disjuntores e equipamentos de subestação. Nesses casos, diferentemente das emissões por combustão, não são utilizados fatores de emissão convencionais. Em vez disso, aplica-se diretamente o Potencial de Aquecimento Global (GWP) de cada gás ou composto, que indica sua equivalência em termos de dióxido de carbono (CO₂e).

A **Tabela 5** apresenta os gases e compostos considerados na plataforma, com seus respectivos valores de GWP, baseados no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2014), utilizados diretamente na estimativa das emissões.

Tabela 5 - Fatores de emissão por utilização de gases com potencial de emissão fugitiva.

Fonte	Gás ou composto	Und	GWP
Equipamento de refrigeração e ar-condicionado (RAC)	R410A	kg	1.923,5
	HFC-32	kg	677
Extintor de incêndio	CO ₂	kg	1
	HFC-227ea	kg	3.350
Outros	SF ₆	kg	23.500

Legenda – R410A: mistura de HFC-32 e HFC-125; HFC-32: difluormetano; CO₂: dióxido de carbono; HFC-227ea: heptafluoropropano; SF₆: hexafluoreto de enxofre; GWP: Potencial de Aquecimento Global.

3.2.4 Fator de emissão para mudança no uso do solo

Para a conversão de carbono estocado na biomassa em dióxido de carbono (CO₂), utiliza-se um fator estequiométrico que relaciona as massas molares do carbono (12 g/mol) e do CO₂ (44 g/mol). Essa relação reflete a composição molecular do CO₂, formado por um átomo de carbono ligado a dois átomos de oxigênio. Assim,

a massa de carbono é multiplicada pelo fator 44/12, ou 3,6667, para estimar a quantidade equivalente de CO₂ liberada para a atmosfera. Esse fator de conversão é adotado internacionalmente em inventários de emissões e está formalmente estabelecido nas Diretrizes do IPCC (2006).

3.2.5 Fatores de emissão pela compra de energia elétrica

A quantificação das emissões de gases de efeito estufa pela compra de energia elétrica baseada na localização utiliza como fator de emissão a média para geração da eletricidade do Sistema Interligado Nacional (SIN).

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2024), os fatores de emissão médios de CO₂ para energia elétrica a serem utilizados em inventários corporativos ou de outra natureza têm como objetivo estimar a quantidade de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica determinada. O cálculo considera a média das emissões de todas as usinas que estiveram em operação ao longo do período, incluindo fontes renováveis e não renováveis, e não se restringe às emissões das usinas que operam apenas em momentos de maior demanda (geração marginal).

O fator de emissão considerado na plataforma foi a média dos fatores de emissão dos últimos 10 anos (2014 a 2023). A **Tabela 6** apresenta os fatores médios anuais e a média correspondente.

Tabela 6 - Fatores de emissão por utilização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (2014 a 2023).

Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)										Média (tCO ₂ /MWh)
2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
0,1355	0,1244	0,0817	0,0927	0,074	0,075	0,0617	0,1264	0,0426	0,0385	0,0853

Fonte: Brasil (2023).

3.2.6 Fatores de emissão para o transporte e distribuição

A **Tabela 7** apresenta os fatores de emissão por transporte rodoviário, considerando diferentes tipos de caminhões, faixas de capacidade de carga e gases emitidos. Os dados adotados na plataforma referem-se exclusivamente ao uso de diesel comercial, combustível predominante nesse modal, composto por frações fósseis e porção de biodiesel, conforme estabelecido pelas misturas vigentes no Brasil. Os veículos selecionados representam os principais modelos utilizados ou com potencial de uso em atividades logísticas de empreendimentos fotovoltaicos.

Tabela 7 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis e biocombustíveis em fontes rodoviárias.

Tipo de veículo	Fatores de emissão – Óleo Diesel			Fatores de emissão – Biodiesel		
	CO ₂ (kg/t.km)	CH ₄ (kg/t.km)	N ₂ O (kg/t.km)	CO ₂ (kg/t.km)	CH ₄ (kg/t.km)	N ₂ O (kg/t.km)
Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 t)	0,53082	0,00003	0,00003	0,49575	0,00007	0,00000
Caminhão - rígido (7,5 a 17 t)	0,36694	0,00002	0,00002	0,34269	0,00005	0,00000
Caminhão - rígido (acima de 17 t)	0,15932	0,00001	0,00001	0,14879	0,00002	0,00000
Caminhão - rígido (média)	0,18464	0,00001	0,00001	0,17244	0,00002	0,00000
Caminhão - articulado (3,5 a 33 t)	0,11997	0,00001	0,00001	0,11204	0,00002	0,00000
Caminhão - articulado (acima de 33 t)	0,07690	0,00000	0,00000	0,07182	0,00001	0,00000
Caminhão - articulado (média)	0,07790	0,00000	0,00000	0,07275	0,00001	0,00000
Caminhão - caminhão (média)	0,10047	0,00001	0,00001	0,09383	0,00001	0,00000

Legenda – t: toneladas; CO₂: dióxido de carbono; CH₄: metano; N₂O: óxido nitroso.

A **Tabela 8** apresenta os fatores de emissão por transporte hidroviário, com foco em navios cargueiros do tipo porta-contêineres, classificados por capacidade em TEU (Twenty-foot Equivalent Unit). Para esse modal, a plataforma considera exclusivamente o uso de diesel puro (100% fóssil), refletindo a realidade predominante da matriz energética marítima. Esse transporte está relacionado ao deslocamento de

grandes volumes de equipamentos e materiais destinados à implantação de usinas fotovoltaicas.

Tabela 8 - Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis em fontes hidroviárias.

Tipo de navio	Subtipo	Tamanho	Fatores de emissão		
			CO ₂ (kg/t.km)	CH ₄ (kg/t.km)	N ₂ O (kg/t.km)
Navio cargueiro	Navio porta containers	acima de 8.000 TEU	0,01250	0,00000	0,00000
		5.000 a 7.999 TEU	0,01660	0,00000	0,00000
		3.000 a 4.999 TEU	0,01660	0,00000	0,00000
		2.000 a 2.999 TEU	0,02000	0,00000	0,00000
		1.000 a 1.999 TEU	0,03210	0,00000	0,00000
		0 a 999 TEU	0,03630	0,00000	0,00000

Legenda – TEU: Twenty-foot Equivalent Unit; CO₂: dióxido de carbono; CH₄: metano; N₂O: óxido nítrico.

3.3 Cálculo das emissões de gases de efeito estufa

O cálculo das emissões de gases de efeito estufa apresentado nesta seção segue as diretrizes metodológicas do *GHG Protocol* (WRI/WBCSD, 2004), amplamente reconhecido como referência internacional para contabilização de emissões corporativas. Todas as fórmulas empregadas derivam da equação geral ($Emissões = Atividade \times Fator\ de\ Emissão$), recomendada pelo protocolo, e foram adaptadas ao contexto brasileiro a partir das planilhas oficiais do Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV/WRI BRASIL, 2022), que incorporam parâmetros de conversão e fatores de emissão aplicáveis ao Brasil. Com exceção das emissões pela mudança no uso do solo, todas as equações específicas detalhadas nos subtópicos a seguir foram extraídas do Programa Brasileiro GHG Protocol (Ferramenta GHG Protocol, versão 2024.0.1), garantindo aderência às boas práticas de inventário de emissões.

Adicionalmente, todas as emissões calculadas foram convertidas para dióxido de carbono equivalente (CO_2e) por meio da multiplicação pelo potencial de aquecimento global (GWP) de cada gás, garantindo a uniformidade dos resultados.

Neste estudo, adotaram-se os valores do GWP definidos pelo Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2014), considerando um horizonte de 100 anos: 1 para o dióxido de carbono (CO_2), 28 para o metano (CH_4) e 265 para o óxido nitroso (N_2O). Esses coeficientes permitem expressar as emissões em unidades equivalentes de dióxido de carbono, viabilizando a comparabilidade entre os diferentes gases de efeito estufa analisados.

Em conformidade com as diretrizes do GHG Protocol, as emissões de dióxido de carbono (CO_2) de origem biogênica – como aquelas provenientes da queima de biocombustíveis – não foram incluídas nos cálculos de emissões de gases de efeito estufa totais, em nenhuma das categorias abordadas. Esse tipo de emissão é considerado neutro em termos de impacto climático, pois o carbono emitido foi previamente removido da atmosfera por meio da fotossíntese (WRI BRASIL, 2015).

Neste sentido, a FGVces (2018a) recomenda que as emissões de CO_2 biogênico sejam contabilizadas separadamente das outras emissões de gases de efeito estufa. Ressalta ainda que os demais gases liberados nas mesmas atividades, como CH_4 e N_2O , devem ser integralmente contabilizadas nas respectivas categorias das fontes emissoras.

3.3.1 Emissões por combustão estacionária e móvel

Este subtópico apresenta a **Equação (8)**, utilizada para estimar as emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis em fontes estacionárias e móveis. O cálculo é realizado com base na quantidade de combustível consumido, nos fatores de emissão específicos de cada tipo de combustível e gás emitido, e no respectivo Potencial de Aquecimento Global (GWP), permitindo expressar os resultados em dióxido de carbono equivalente (CO_2e).

$$\left(\frac{Qnd_a \times Fe_{ab}}{1000} \right) \times GWP_b = CO_2e \quad (8)$$

Onde:

Qnd = quantidade do combustível consumido pela fonte estacionária ou móvel (kg ou litros);

Fe = fatores de emissão (kg/unidade de combustível);

a = tipo de combustível;

b = tipo de gás;

GWP = Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global);

CO₂e = quantidade de dióxido de carbono equivalente emitido (t).

3.3.2 Emissões fugitivas

As emissões fugitivas contempladas na plataforma referem-se a gases de efeito estufa utilizados em sistemas de refrigeração e ar-condicionado, extintores de incêndio e equipamentos elétricos, como disjuntores, comumente empregados em instalações de geração solar fotovoltaica.

Para a estimativa dessas emissões, adotou-se a aplicação direta do Potencial de Aquecimento Global (GWP) de cada gás ou composto, conforme os valores apresentados na **Tabela 5** e baseados no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2014). A **Equação (9)** foi utilizada para o cálculo das emissões, convertendo a massa do gás emitido em sua equivalência em dióxido de carbono (CO₂e).

$$\left(\frac{Qnd \times GWP_b}{1000} \right) = CO_2e \quad (9)$$

Onde:

Qnd = quantidade utilizada do gás ou composto (kg);

GWP = Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global);

b = tipo do gás ou composto;

CO₂e = quantidade de dióxido de carbono equivalente emitido (t).

3.3.3 Emissões pela mudança no uso do solo

As emissões de dióxido de carbono (CO_2) resultantes da supressão vegetal em áreas destinadas à implantação de empreendimentos de geração solar fotovoltaica são estimadas com base na biomassa lenhosa removida. A plataforma considera o volume de madeira suprimida por espécie vegetal e utiliza parâmetros técnicos para conversão em carbono e, posteriormente, em dióxido de carbono equivalente (CO_2e).

O cálculo é realizado a partir da multiplicação do volume total de madeira (em m^3) pela densidade básica da madeira (em kg/m^3), resultando na biomassa lenhosa acima do solo (em kg). Em seguida, aplica-se o teor de carbono da espécie vegetal, que corresponde à fração de carbono presente na biomassa. Na ausência de dados específicos, a plataforma adota o valor padrão de 49% de carbono (ou 0,49), conforme recomendado pelo IPCC (2006) para florestas tropicais e subtropicais.

Por fim, a quantidade de carbono obtida é convertida em dióxido de carbono equivalente por meio do fator estequiométrico 3,6667, que reflete a razão entre as massas molares do CO_2 (44 g/mol) e do carbono (12 g/mol), conforme mencionado no subtópico 3.2.4, do Capítulo 3, sobre fatores de emissão. A **Equação (1)**, apresentada no Capítulo 2, representa o modelo de cálculo utilizado.

3.3.4 Emissões pela compra de energia elétrica

As emissões de gases de efeito estufa associadas à compra de energia elétrica referem-se à eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN). Para fins de cálculo, a plataforma considera a quantidade total de eletricidade adquirida (em MWh) e aplica o fator médio de emissão de CO_2 do SIN, expresso em toneladas de CO_2 por megawatt-hora (tCO_2/MWh).

Como padrão, é adotado o valor correspondente à média dos fatores mensais dos últimos dez anos (2014 a 2023), conforme detalhado no subtópico 3.2.5 (**Tabela 6**), do Capítulo 3. No entanto, a plataforma também permite que o usuário insira manualmente o fator de emissão de sua escolha, garantindo maior flexibilidade e compatibilidade com diferentes metodologias de inventário.

A **Equação (10)** expressa o modelo de cálculo adotado:

$$EE \times Fe = CO_e \quad (10)$$

Onde:

EE = quantidade de eletricidade comprada, proveniente do SIN (MWh)

Fe = fator de emissão do SIN (tCO₂/MWh)

CO₂e = quantidade de dióxido de carbono equivalente (t).

3.3.5 Emissões por transporte e distribuição

Este subtópico apresenta o cálculo das emissões de gases de efeito estufa associadas ao transporte e à distribuição de produtos, equipamentos e insumos utilizados na implantação e operação de empreendimentos de geração solar fotovoltaica. As emissões são estimadas com base no tipo de modal (rodoviário ou hidroviário), na carga transportada, na distância percorrida e na quantidade de veículos e/ou embarcações.

No transporte rodoviário, considera-se a utilização exclusiva de óleo diesel comercial, composto por frações de combustível fóssil e biocombustível. A equação utilizada incorpora um parâmetro de mistura que reflete essa composição, permitindo o cálculo das emissões com base nas frações correspondentes.

No caso do transporte hidroviário, considera-se exclusivamente a utilização de óleo diesel puro (sem adição de biocombustível). O cálculo das emissões é realizado com base no tipo e no tamanho do navio empregado, conforme os fatores de emissão específicos definidos para cada categoria.

Em ambos os modais, os resultados obtidos são convertidos em dióxido de carbono equivalente (CO₂e) mediante a aplicação do potencial de aquecimento global (GWP) correspondente a cada gás, assegurando a padronização e comparabilidade das emissões calculadas.

As **Equações (11) e (12)** representam, respectivamente, os modelos de cálculo aplicados aos modais rodoviário e hidroviário.

$$\left(\frac{Q_{nd} \times D_{ta} \times C_{ta} \times \%C \times Fe_{ab}}{1000} \right) \times GWP_b = CO_2e \quad (11)$$

$$\left(\frac{Q_{nd} \times D_{ta} \times C_{ta} \times Fe_{ab}}{1000} \right) \times GWP_b = CO_2e \quad (12)$$

Onde:

Q_{nd} = quantidade de veículos e/ou embarcações utilizadas (unidade);

D_t = distância percorrida (km);

C_t = carga total transportada (t);

Fe = fatores de emissão (kg/t.km);

$\%C$ = porcentagem da mistura do combustível utilizado (de acordo com os tipos de veículos, foi considerado apenas o uso de diesel comercial, composto por combustível fóssil e biocombustível);

GWP = Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global);

a = informações do veículo ou navio utilizado;

b = tipo de gás;

CO_2e = quantidade de dióxido de carbono equivalente emitido (t).

3.5.6 Sumarização das emissões

Após o cálculo das emissões em cada categoria (combustão estacionária e móvel, emissões fugitivas, mudança no uso do solo, compra de energia elétrica e transporte e distribuição), a plataforma realiza a sumarização das emissões totais (**Equação 13**). Esse processo consiste na agregação dos resultados parciais expressos em dióxido de carbono equivalente (CO_2e), gerando o inventário consolidado de emissões do empreendimento.

$$E_{tot} = EC_{est} + EC_{mov} + EF + EMUS + EEE + ETD \quad (13)$$

Onde:

E_{tot} = emissões totais de gases de efeito estufa (tCO₂e);

EC_{est} = emissões por combustão estacionária (tCO₂e);

EC_{mov} = emissões por combustão móvel (tCO₂e);

EF = emissões fugitivas (tCO₂e);

EEE = emissões pela compra de energia elétrica (tCO₂e);

ETD = emissões por transporte e distribuição (tCO₂e).

Essa abordagem permite não apenas a visualização das contribuições relativas de cada categoria emissora, como também serve de base para etapas posteriores da análise, tais como a verificação da neutralidade de carbono, além de auxilia o empreendimento no planejamento de ações compensatórias. A sumarização é realizada automaticamente pela plataforma, assegurando consistência metodológica e padronização com base nos parâmetros definidos neste capítulo.

Essa abordagem permite não apenas a visualização das contribuições relativas de cada categoria emissora, como também serve de base para etapas posteriores da análise, tais como a verificação da neutralidade de carbono e o planejamento de ações compensatórias por parte do empreendimento. A sumarização é realizada automaticamente pela plataforma, assegurando consistência metodológica e padronização com base nos parâmetros definidos neste capítulo.

3.4 Emissões evitadas e neutralidade de carbono

O cálculo automatizado das emissões evitadas foi incorporado na plataforma SunMetricsC já que esta é voltada para empreendimentos de geração solar fotovoltaica, que durante sua fase operacional gera eletricidade sem emissões diretas de gases de efeito estufa ou outros poluentes atmosféricos. Esse cálculo é apresentado em três escalas temporais: mensal, anual e ao longo da vida útil do empreendimento.

A estimativa das emissões evitadas é realizada com base na multiplicação da energia elétrica gerada no período avaliado pelo fator de emissão médio da matriz elétrica brasileira, conforme demonstrado na **Equação (5)**. Esse fator reflete a intensidade média de emissões do Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando a proporção entre fontes fósseis e renováveis utilizadas na geração de eletricidade no Brasil (SANQUETTA *et al.*, 2015; RAIMUNDO; SANTOS, 2015; BUIATTI *et al.*, 2016; LIRA *et al.*, 2019).

Na versão atual da plataforma, foi adotado o valor médio dos fatores de emissão do SIN dos últimos dez anos (2014 a 2023), conforme apresentado na **Tabela 6** (vide subtópico 3.2.5 do Capítulo 3). Embora esse valor esteja atualmente fixado no sistema, futuras atualizações da ferramenta poderão incorporar valores atualizados anualmente, conforme disponibilidade de dados oficiais.

A partir desse resultado, a plataforma SunMetricsC projeta o momento em que o empreendimento atinge a neutralidade de carbono (*net-zero*), isto é, o ponto em que o volume acumulado de emissões evitadas se iguala ou supera as emissões de gases de efeito estufa geradas ao longo do ciclo considerado pelo usuário (por exemplo, apenas as fases de implantação, operação ou outro recorte temporal definido conforme os objetivos do inventário).

3.5 Tecnologias utilizadas

A plataforma SunMetricsC foi desenvolvida como um sistema web leve e funcional, voltado para avaliação automatizada das emissões de gases de efeito estufa em empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica. Sua estrutura é baseada inteiramente em tecnologias front-end, permitindo que seja executado diretamente em navegadores, sem necessidade de instalação.

A linguagem principal utilizada é o JavaScript, responsável por toda a lógica de cálculo, manipulação de dados e interações com a interface (MOZILLA FOUNDATION, 2024). A estrutura da página foi desenvolvida em HTML5 (W3C, 2014), enquanto a apresentação visual é controlada por CSS3 (W3C, 2023),

garantindo uma interface responsiva, acessível e compatível com diferentes dispositivos.

A lógica de cálculo implementa as fórmulas descritas na metodologia deste trabalho, organizadas em módulos JavaScript reutilizáveis, de fácil manutenção e atualização. O sistema permite que o usuário selecione categorias de emissão, adicione múltiplas fontes para cada categoria e visualize os resultados consolidados em tempo real.

Para visualização gráfica foi incorporada a biblioteca Chart.js, que permite a exibição dinâmica da distribuição das emissões por categoria ou por fonte. A exportação dos dados é viabilizada por meio das bibliotecas SheetJS (xlsx), que permite gerar arquivos compatíveis com Excel, e jsPDF, utilizada para gerar relatórios automáticos em formato PDF.

A **Figura 2** resume a arquitetura funcional da plataforma e as tecnologias utilizadas em seu desenvolvimento.

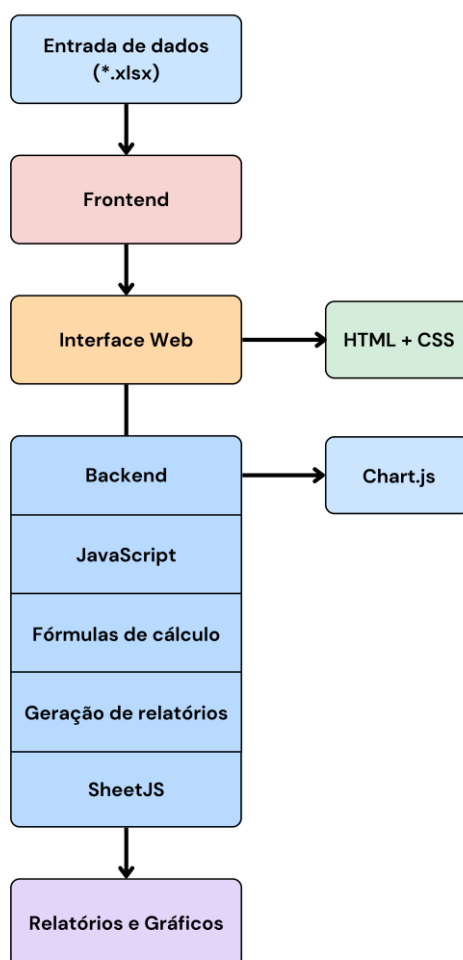


Figura 2 - Fluxograma ilustrativo da estrutura tecnológica da plataforma SunMetricsC, com destaque para os componentes de entrada, interface, processamento, visualização e geração de relatórios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os recursos externos são carregados por meio de CDNs (Content Delivery Networks) que reduz o tempo de carregamento do sistema e facilita sua execução em ambientes com infraestrutura limitada. O sistema é estruturado como uma aplicação web do tipo single-page (SPA), onde todos os componentes interagem de forma dinâmica na mesma interface.

3.6 Validação

A validação da plataforma SunMetricsC teve como objetivo aferir a exatidão dos resultados gerados em relação às metodologias consolidadas de quantificação de emissões de gases de efeito estufa, assegurando sua aplicabilidade prática para empreendimentos de geração solar fotovoltaica.

Para isso, foi utilizado como estudo de caso o empreendimento UFV STL 9, cujo dados foram cedidos pela empresa Rio Alto Energias Renováveis. Os dados de entrada utilizados na plataforma correspondem aos mesmos previamente analisados no Capítulo 2, onde foram aplicadas manualmente as planilhas da Ferramenta GHG Protocol (versão 2024.0.1) para o cálculo das emissões.

Cabe destacar que, conforme mencionado no Capítulo 2 (subtópico 3.5), apenas a categoria de mudança no uso do solo (supressão vegetal) foi calculada com base em metodologia específica, distinta daquela sugerida pelo GHG Protocol. No entanto, os resultados obtidos por esse método foram posteriormente organizados e inseridos na planilha da ferramenta oficial para fins de uniformização. Os resultados apresentados neste capítulo consideram exclusivamente a comparação entre os valores obtidos por meio da Ferramenta GHG Protocol e aqueles gerados pela plataforma SunMetricsC, sendo que os dados de todas as categorias (incluindo a de supressão vegetal) foram consolidados na planilha da ferramenta para fins de uniformização e clareza na apresentação dos resultados.

A validação estatística dos resultados obtidos pela plataforma SunMetricsC foi conduzida por meio de testes de normalidade e de comparação pareada com os valores calculados manualmente utilizando a Ferramenta GHG Protocol. Os dados de emissões de gases de efeito estufa correspondem as seguintes categorias: combustão estacionária; combustão móvel; fugitivas; mudanças no uso do solo; compra de energia elétrica; e transporte e distribuição.

Inicialmente, foi realizada uma análise estatística descritiva com o objetivo de caracterizar o comportamento geral dos dados. Para cada conjunto de resultados foram calculadas as seguintes medidas: média, mediana, desvio padrão, variância, valor mínimo e valor máximo.

A verificação da normalidade da distribuição dos dados foi feita por meio do Teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), apropriado para amostras pequenas. A partir dos resultados desse teste, definiu-se o teste de hipótese a ser aplicado. No caso em que a distribuição foi considerada normal, utilizou-se o Teste t Pareado (STUDENT, 1908), quando a normalidade não foi atendida, foi aplicado o Teste de Wilcoxon (WILCOXON, 1945).

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software Microsoft Excel, versão 2506, com o auxílio do suplemento Real Statistics Resource Pack, utilizado para aplicação do teste de Shapiro-Wilk.

Além da validação estatística por categoria, também foi realizada a aplicação global da plataforma SunMetricsC para obtenção dos resultados consolidados de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica, da estimativa das emissões evitadas associadas a essa geração e da projeção do tempo necessário para que o empreendimento atinja a neutralidade de carbono.

Essa etapa teve como objetivo verificar a coerência geral dos resultados fornecidos pela plataforma SunMetricsC em relação aos dados obtidos manualmente e apresentados no Capítulo 2. Para tanto, foram inseridas na plataforma as informações reais do empreendimento UFV STL 9, incluindo os dados operacionais e as emissões totais de gases de efeito estufa geradas durante a fase de implantação.

Em relação às emissões totais, foram considerados dois cenários, com o intuito de avaliar a influência dos diferentes sistemas de cálculo sobre a projeção da neutralidade de carbono: (i) as emissões totais estimadas pela Ferramenta GHG Protocol (Capítulo 2) e (ii) as emissões totais estimadas pela plataforma SunMetricsC (Capítulo 3).

Não foram aplicados testes estatísticos nessa análise complementar, uma vez que os resultados utilizados não estavam estruturados por categoria de emissão e seguiram uma abordagem distinta da aplicada na ferramenta. A apresentação dos resultados foi realizada de forma visual, com o intuito de demonstrar a interface prática e a aplicabilidade das funcionalidades consolidadas da plataforma.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estrutura e funcionalidades gerais

A plataforma web denominada SunMetricsC permite a estimativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em seis categorias diretamente relacionadas à implantação e operação de usinas solares fotovoltaicas: combustão estacionária, combustão móvel, emissões fugitivas, mudança no uso do solo (supressão vegetal), compra de energia elétrica e transporte e distribuição (modais rodoviário e hidroviário).

Além do inventário de emissões, a plataforma possibilita a estimativa de geração de energia, o cálculo de emissões evitadas com base na energia renovável produzida e a projeção do tempo necessário para neutralização das emissões geradas.

Por ser um sistema web, o acesso à plataforma SunMetricsC pode ser feito por qualquer dispositivo com conexão à internet. Atualmente, o uso é aberto e não requer cadastro prévio, permitindo que qualquer usuário realize os cálculos diretamente. Além disso, o usuário pode optar por preencher apenas as categorias desejadas, não sendo obrigatório o fornecimento de dados em todas as fontes para a estimativa das emissões totais.

A interface da SunMetricsC foi projetada para ser intuitiva e acessível a usuários com diferentes níveis de familiaridade com inventários de gases de efeito estufa. De acordo com Hillier *et al.* (2011), é fundamental que calculadoras de carbono adotem abordagens acessíveis, especialmente quando destinadas a não-especialistas, o que reforça a importância de uma interface simplificada e funcional. Nesse sentido, a estrutura de entrada de dados da plataforma, segmentada por categoria e tipo de fonte, orienta o preenchimento e reduz a complexidade da etapa de coleta.

Conforme descrito na metodologia do presente Capítulo, a plataforma foi desenvolvida com base no Programa Brasileiro GHG Protocol, com adaptações específicas para o setor fotovoltaico. As categorias e fontes de emissão foram filtradas e ajustadas a partir da realidade operacional do setor, o que resultou em uma

ferramenta mais direcionada, prática e eficiente para empreendimentos solares fotovoltaicos.

Esse recorte metodológico, embora reduza a abrangência da plataforma em relação a inventários corporativos gerais, representa um avanço significativo ao possibilitar uma análise mais acurada e aplicável à realidade das usinas solares, além de fortalecer a capacidade das empresas do setor em cumprir metas ambientais e elaborar estratégias de mitigação mais robustas. Segundo Alves (2018), o desenvolvimento de ferramentas computacionais voltadas ao cálculo de emissões e à compensação de carbono não apenas contribui para o avanço científico, como também possui relevância política e social.

4.2 Funcionalidades por aba

A interface da plataforma SunMetricsC foi desenvolvida com foco em acessibilidade, clareza visual e orientação ao usuário. Na tela inicial (aba *Início*), destaca-se a identidade visual da plataforma, com um logotipo composto por elementos gráficos que simbolizam a energia solar fotovoltaica (sol) e o cálculo de emissões (gráfico de barras), sintetizando visualmente o propósito da plataforma. O menu principal está organizado em abas intuitivas (*Início*, *Sobre*, *Tutorial* e *Contato*), acessíveis tanto por meio da barra superior quanto pela navegação lateral (**Figura 3**).



Figura 3 - Interface inicial da plataforma SunMetricsC.

Ainda, a aba *Início* apresenta uma introdução funcional à plataforma com destaque para o botão *Comece Agora*, que direciona o usuário diretamente à área de inserção de dados para cálculo das emissões de gases de efeito estufa. Essa interface inicial visa facilitar a navegação, reduzindo a curva de aprendizagem mesmo para usuários com pouca familiaridade com ferramentas de inventário de emissões.

A aba *Sobre* reúne as principais informações institucionais e metodológicas da plataforma (**Figura 4**). Nesta aba, o usuário encontra uma explicação sintética sobre os objetivos da SunMetricsC, seu público-alvo e os fundamentos técnicos que embasam seu funcionamento, com destaque para a adaptação da metodologia do Programa Brasileiro GHG Protocol ao contexto da energia solar fotovoltaica. Além disso, essa aba também contempla a seção *Criadores*, onde são apresentados os desenvolvedores, conferindo transparência e credibilidade científica ao projeto.

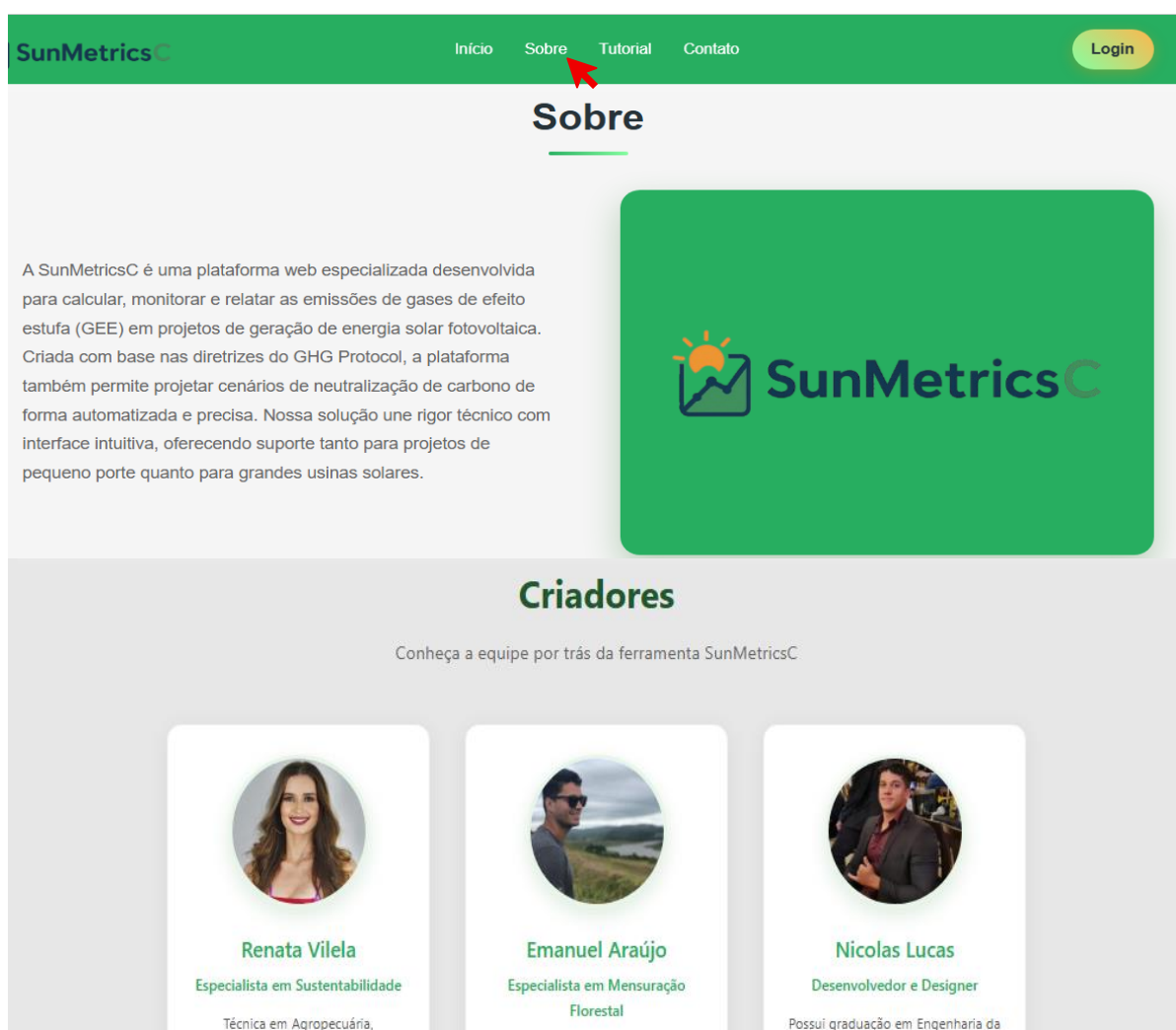


Figura 4 - Interface da aba *Sobre* da plataforma SunMetricsC.

A aba *Tutorial* oferece um guia prático de utilização, com instruções passo a passo sobre as etapas de preenchimento, cálculo e visualização dos resultados. (Figura 5). Essa seção busca garantir autonomia ao usuário, por meio de explicações simplificadas e ilustrações das telas da plataforma, exemplificando os principais campos de entrada (*inputs*) e os resultados gerados (*outputs*).

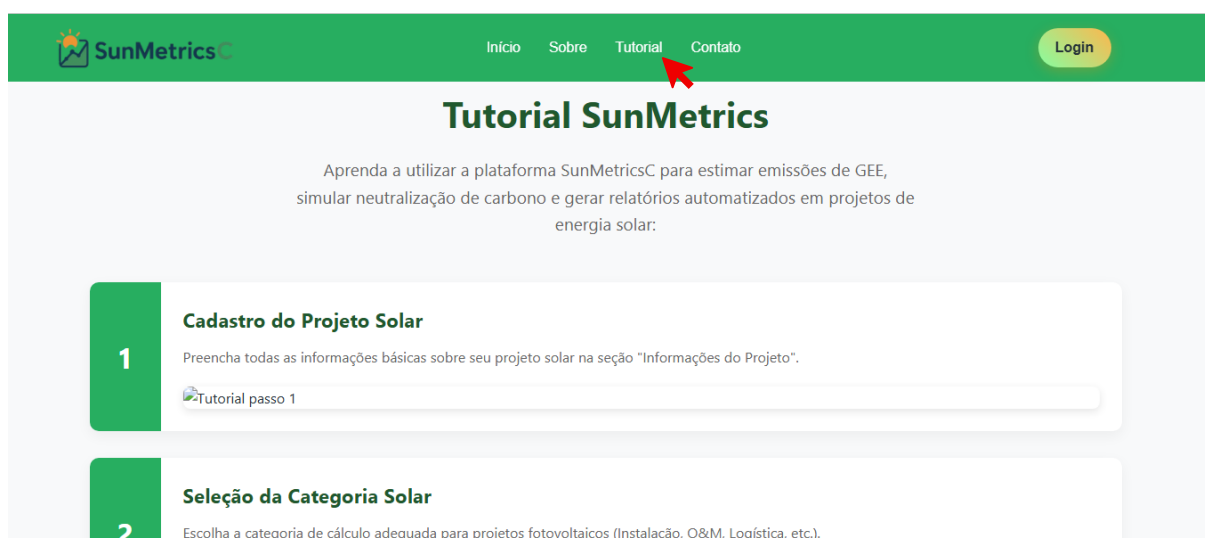


Figura 5 -Interface da aba *Tutorial* da plataforma SunMetricsC.

Por fim, a aba *Contato* disponibiliza os canais de comunicação com a equipe responsável pela plataforma (**Figura 6**). Essa seção contempla, ainda, observações sobre a versão atual da plataforma, incluindo eventuais termos de uso, caráter de versão beta e orientações para contribuições, testes ou sugestões de melhoria por parte dos usuários.

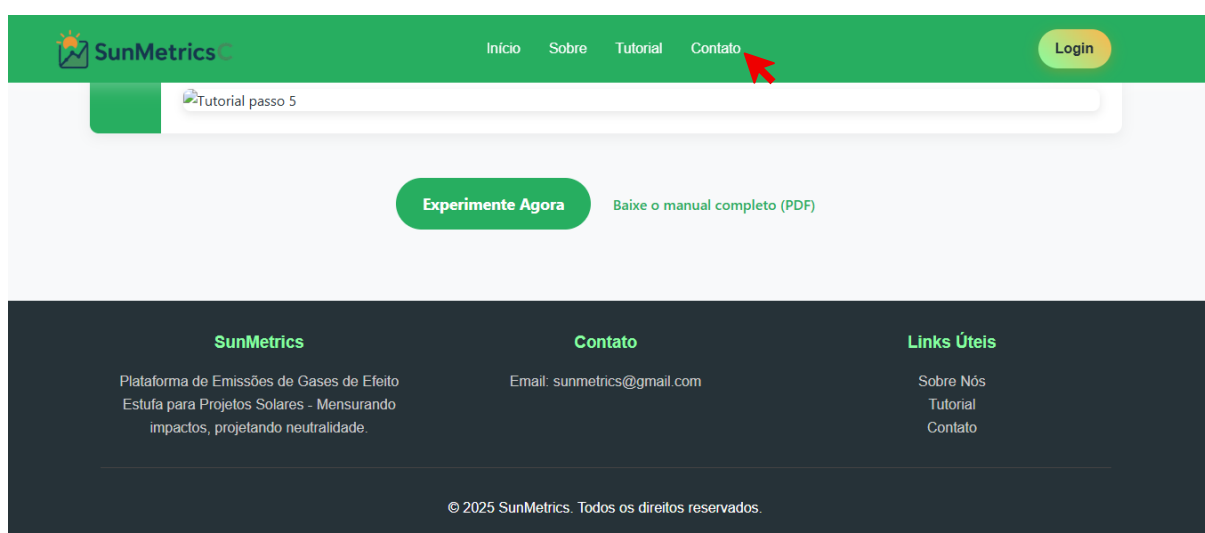


Figura 6 – Interface da aba *Contato* da plataforma SunMetricsC.

4.3 Estrutura de cálculo e lógica de funcionamento

O usuário é direcionado à área de cálculo clicando no botão *Comece Agora*, localizado na tela inicial da plataforma (**Figura 3**). Esse comando conduz à interface principal de cálculo da SunMetricsC, onde se encontram os campos para preenchimento das informações do projeto e os módulos destinados ao cálculo das emissões de gases de efeito estufa por categoria (**Figura 7**).

Figura 7 - Interface inicial da área de cálculo da plataforma SunMetricsC, destacando os campos de informações do projeto e os módulos de navegação lateral por categoria de emissão.

A primeira etapa dessa interface envolve o preenchimento do formulário *Informações do Projeto*, no qual o usuário insere dados básicos como nome do empreendimento, projeto, responsável técnico, e-mail de contato, Estado, bioma e observações complementares (**Figura 7**). Embora essas informações não interfiram diretamente nos cálculos, são essenciais para garantir a rastreabilidade dos inventários gerados e a personalização dos relatórios.

A plataforma opera com base em um sistema de cálculo automatizado, estruturado a partir das equações e parâmetros técnicos descritos na metodologia do

Capítulo 3. A lógica computacional foi organizada em módulos independentes, localizados no menu lateral esquerdo, cada um correspondente a uma categoria de emissão de gases de efeito estufa: combustão estacionária, combustão móvel, emissões fugitivas, compra de energia elétrica, supressão vegetal (mudança no uso do solo) e transporte e distribuição (modais rodoviário e hidroviário). Além disso, há um módulo dedicado à projeção da neutralidade de carbono (**Figura 8**).

Figura 8 - Interface destacando os módulos de navegação lateral da plataforma SunMetricsC.

Cada módulo apresenta campos específicos para a inserção dos dados, os quais alimentam diretamente as fórmulas estabelecidas na metodologia. A partir da entrada das informações pelo usuário, os cálculos são executados automaticamente, gerando os resultados consolidados por categoria e por fonte emissora. Para acessar cada módulo, o usuário deve clicar sobre o nome da categoria no menu lateral e iniciar a inserção das informações desejadas.

Além disso, todos os módulos de cálculo disponibilizam o botão *Adicionar Fonte*, localizado na parte inferior de cada interface (**Figura 9**). Essa funcionalidade permite ao usuário inserir múltiplas fontes emissoras dentro da mesma categoria, o

que é especialmente útil em empreendimentos que utilizam diversos combustíveis, equipamentos ou espécies vegetais, por exemplo. Cada fonte adicionada é processada de forma independente, possibilitando a discriminação das emissões por item, aumentando a precisão do inventário e a riqueza das análises.

Figura 9 - Interface destacando o botão *Adicionar fonte*, presente em todas as categorias de cálculo de emissões de gases de efeito estufa da plataforma SunMetricsC.

4.3.1 Módulo: combustão estacionária

O módulo de combustão estacionária permite estimar as emissões de gases de efeito estufa associadas à queima de combustíveis em equipamentos fixos, como geradores, compressores e outros sistemas que operam no local do empreendimento. A estrutura da interface foi desenvolvida com foco na simplicidade e objetividade do preenchimento, com campos previamente definidos que guiam o usuário na inserção correta das informações.

O usuário deve, inicialmente, escolher um nome para a fonte inventariada (**Figura 10, 1**), selecionar o tipo de combustível utilizado (**Figura 10, 2**), com base em

uma lista suspensa que contempla os principais combustíveis adotados para essa categoria, tais como óleo diesel e gasolina automotiva. Em seguida, deve-se informar a quantidade consumida de combustível (**Figura 10, 3**). A unidade de medida correspondente sairá automaticamente (litros ou kg, conforme aplicável).

The image shows the 'Combustão Estacionária' (Stationary Combustion) module in the SunMetricsC platform. The interface is divided into a sidebar and a main content area. The sidebar contains a navigation menu with icons and labels for various categories: 'Início' (Home), 'Combustão Estacionária' (Stationary Combustion), 'Combustão Móvel' (Mobile Combustion), 'Energia Elétrica' (Electric Energy), 'Transporte e Distribuição' (Transport and Distribution), 'Emissões Fugitivas' (Fugitive Emissions), 'Supressão Vegetal' (Vegetal Suppression), and 'Neutralidade de Carbono' (Carbon Neutrality). The main content area is titled 'Combustão Estacionária' and contains a form for entering data. The form has three main sections: 'Nome da Fonte' (Source Name) with a text input field, 'Combustível' (Fuel) with a dropdown menu, and 'Consumo' (Consumption) with a text input field. The 'Combustível' dropdown is currently set to 'Gasolina Automotiva (comercial)'. Below the form, there are three buttons: '+ Adicionar Fonte' (Add Source), 'Limpar Categoria' (Clear Category), and a large green 'Calcular Emissões' (Calculate Emissions) button. At the bottom of the form, there are two tabs: 'Resumo' (Summary) and 'Por Categoria' (By Category). Red circles with numbers 1, 2, and 3 highlight the 'Nome da Fonte' input, the 'Combustível' dropdown, and the 'Consumo' input, respectively.

Figura 10 – Interface do módulo de *Combustão Estacionária* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados.

Os dados inseridos alimentam automaticamente a fórmula de cálculo estabelecida no Capítulo 3, baseada no uso do fator de emissão específico do combustível selecionado. O usuário ao clicar em *Calcular Emissões* (**Figura 11, 1**), o cálculo é realizado, e as emissões emitidas pela fonte selecionada são apresentadas na aba *Resumo* (**Figura 11, 2**).

SunMetricsC

Início

- Combustão Estacionária
- Combustão Móvel
- Energia Elétrica
- Transporte e Distribuição
- Emissões Fugitivas
- Supressão Vegetal
- Neutralidade de Carbono
- Ver Dashboard de Emissões

Nome da Fonte: Teste 2

Combustível: Óleo Diesel (comercial)

Consumo: 1

Unidade: litros

+ Adicionar Fonte

Limpar Categoria

Calcular Emissões 1

2 **Resumo** Por Categoria

Nome da Fonte	Emissões (tCO ₂ e)
Teste 1	0,0016 tCO ₂ e
Teste 2	0,0023 tCO ₂ e

Figura 11 - Interface do módulo de *Combustão Estacionária* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os comandos de cálculo e visualização de resultados por fonte adicionada.

4.3.2 Módulo: combustão móvel

O módulo de combustão móvel foi desenvolvido para estimar as emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis em veículos utilizados no transporte terrestre, especialmente durante a fase de implantação de usinas solares fotovoltaicas. Esse tipo de emissão, classificado no Escopo 1 pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, é particularmente relevante no setor de construção civil, dada a intensa movimentação de equipamentos, máquinas, veículos e equipes ao longo da obra.

A interface do módulo apresenta campos organizados para facilitar o preenchimento por parte do usuário, com foco na praticidade e padronização das informações inseridas (**Figura 12**). Inicialmente, o usuário deve nomear a fonte inventariada (**Figura 12**, 1) e selecionar, por meio de lista suspensa, o tipo de combustível utilizado (**Figura 12**, 2), como óleo diesel ou gasolina automotiva, previamente definidos conforme a metodologia apresentada no Capítulo 3. Em

seguida, é necessário indicar a quantidade consumida (**Figura 12, 3**) e a unidade de medida correspondente, é automaticamente ajustada pelo sistema (litros ou m³).

The screenshot shows the SunMetricsC web application interface. On the left is a dark sidebar with the SunMetricsC logo and a navigation menu. The 'Combustão Móvel' option is highlighted with a red arrow. The main content area is titled 'Combustão Móvel' and contains a form with the following fields:

- Nome da Fonte:** A text input field with the placeholder 'Identifique esta fonte'. It is highlighted with a red circle labeled '1'.
- Combustível:** A dropdown menu showing 'Gasolina Automotiva (comercial)'. It is highlighted with a red circle labeled '2'.
- Consumo:** A text input field with the placeholder 'Quantidade consumida'. It is highlighted with a red circle labeled '3'.
- Unidade:** A dropdown menu showing 'litros'.

Below the form are three buttons: '+ Adicionar Fonte' (blue), 'Limpar Categoria' (dark grey), and 'Calcular Emissões' (green). At the bottom, there are two tabs: 'Resumo' and 'Por Categoria', with 'Por Categoria' being the active tab.

Figura 12 - Interface do módulo de *Combustão Móvel* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados.

A fórmula de cálculo é automaticamente ativada quando o usuário aciona o botão *Calcular Emissões*, e os resultados são apresentados na aba *Resumo*, com o detalhamento das emissões geradas por fonte emissora (**Figura 13**).

Figura 13 - Interface do módulo de *Combustão Móvel* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os comandos de cálculo e visualização de resultados por fonte adicionada.

4.3.3 Módulo: fugitivas

O módulo de emissões fugitivas da plataforma SunMetricsC permite estimar as emissões de gases de efeito estufa associadas à recarga de gases utilizados em sistemas de climatização, refrigeração e em equipamentos elétricos, como disjuntores e transformadores. Esta categoria contempla, exclusivamente, os casos de reposição de gases, não sendo considerada, nesta versão da plataforma, a contabilização de gases provenientes de unidades novas ou de equipamentos descartados.

Após nomear a fonte, a interface do módulo apresenta um campo de seleção com os principais gases comumente utilizados no setor, como o R-410A, HFC-32, CO₂, HFC-227ea e o SF₆ (**Figura 14**, 1 e 2, respectivamente). Em seguida, o usuário deve inserir a quantidade recarregada (em kg), e o sistema realiza o cálculo automático das emissões com base no potencial de aquecimento global (GWP) específico do gás informado, conforme descrito na metodologia do Capítulo 3 (**Figura 14**, 3 e 4, respectivamente). Os resultados das emissões são apresentados por fonte cadastrada na aba *Resumo* (**Figura 14**, 5).

Figura 14 - Interface do módulo de *Emissões Fugitivas* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados, os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.

4.3.4 Módulo: supressão vegetal (mudança no uso do solo)

O módulo de supressão vegetal foi desenvolvido para estimar as emissões de gases de efeito estufa decorrentes da mudança no uso do solo, especificamente aquelas associadas à supressão da biomassa acima do solo para implantação de usinas solares fotovoltaicas. Esta categoria está associada ao Escopo 1 do Programa Brasileiro GHG Protocol, considerando a liberação de carbono armazenado na biomassa florestal quando a vegetação é suprimida.

A interface do módulo solicita ao usuário três informações principais para cada fonte de emissão cadastrada (geralmente associada a uma espécie vegetal): o volume de madeira (**Figura 15, 2**); a densidade da madeira (**Figura 15, 3**); e o teor de carbono da biomassa (**Figura 15, 4**). Por padrão, o teor de carbono é preenchido automaticamente com o valor de 49%, conforme recomendado pelo IPCC (2006) para florestas tropicais e subtropicais, mas o campo pode ser editado pelo usuário para inserir valores específicos de determinadas espécies. Com base nas informações fornecidas, o sistema aplica automaticamente a fórmula de cálculo descrita na metodologia (Capítulo 3), convertendo o carbono contido na biomassa em emissões

de CO₂e. Os resultados das emissões são apresentados por fonte cadastrada na aba *Resumo* (Figura 15, 5).

The screenshot shows the SunMetricsC interface for the 'Supressão Vegetal' module. The sidebar on the left contains navigation options: 'Início', 'Combustão Estacionária', 'Combustão Móvel', 'Energia Elétrica', 'Transporte e Distribuição', 'Emissões Fugitivas', 'Supressão Vegetal' (highlighted with a red arrow), and 'Neutralidade de Carbono'. Below the sidebar is a button 'Ver Dashboard de Emissões'. The main form is titled 'Supressão Vegetal' and contains the following fields:

- 1. 'Espécie:' dropdown menu.
- 2. 'Volume de Madeira (m³):' input field with the value '100'.
- 3. 'Densidade (kg/m³):' input field with the value '100'.
- 4. 'Teor de Carbono (%):' input field with the value '49'.

Below the input fields are two buttons: '+ Adicionar Fonte' and 'Limpar Categoria'. A green bar at the bottom contains the button 'Calcular Supressão'. Below this bar is a tabbed interface with 'Resumo' (highlighted with a red circle 5) and 'Por Categoria'. The 'Resumo' tab displays the result: 'Nome da espécie' and '17,9667 tCO₂e'.

Figura 15 - Interface do módulo de *Supressão Vegetal* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados, os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.

Diferentemente de outras abordagens baseadas em estimativas médias por bioma, a SunMetricsC permite que o cálculo seja realizado com base em dados reais de inventário florestal do local do empreendimento. Essa estratégia confere maior precisão aos resultados, respeitando as especificidades das espécies vegetais suprimidas. Espécies diferentes apresentam variações consideráveis em termos de densidade e teor de carbono da biomassa, o que impacta diretamente no resultado das emissões. Ao permitir o detalhamento por espécie, a plataforma amplia a confiabilidade dos resultados e reforça sua adequação técnica para aplicações reais no setor.

Alves (2018), ao desenvolver um software integrado para inventário de emissões de gases de efeito estufa voltado a três níveis de cálculo (individual, eventos e propriedade), destacou que a etapa de estimativa das variações no estoque de carbono da biomassa vegetal ainda poderia ser aprimorada. O autor sugeriu, inclusive,

a incorporação de ferramentas baseadas em inventário florestal ao software, reforçando a importância de abordagens como a proposta na SunMetricsC.

Considerando o contexto dos empreendimentos solares fotovoltaicos de grande porte, frequentemente localizados em áreas rurais com vegetação nativa, presume-se que os dados primários do inventário florestal estejam disponíveis, uma vez que esse levantamento geralmente é exigido como parte do processo de licenciamento ambiental. Dessa forma, o módulo de supressão vegetal da SunMetricsC se mostra particularmente útil e aplicável a esse tipo de projeto, consolidando-se como uma ferramenta alinhada às exigências regulatórias e aos princípios da mensuração transparente das emissões de gases de efeito estufa.

Essa funcionalidade da plataforma SunMetricsC, ao estimar as emissões provenientes da remoção da biomassa acima do solo com base em dados primários provenientes de inventário florestal, contribui para o preenchimento de uma lacuna metodológica identificada na literatura. Colomb *et al.* (2013) destacam que a contabilização das emissões por mudança no uso do solo é um desafio recorrente nas calculadoras de carbono existentes. Até a versão 2023.0.3, a Ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol contemplava apenas a opção de relato das emissões oriundas da mudança no uso do solo. A inclusão do memorial de cálculo específico para essas emissões só foi implementada na versão 2024.0, o que reforça a relevância da abordagem adotada na SunMetricsC.

4.3.5 Módulo: compra de energia elétrica

O módulo de energia elétrica da plataforma SunMetricsC foi desenvolvido para estimar as emissões indiretas de gases de efeito estufa associadas à compra de eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional. Essa categoria, inserida no Escopo 2 do Programa Brasileiro GHG Protocol, contempla o consumo de energia adquirida de terceiros para o funcionamento de equipamentos e estruturas no empreendimento solar.

Após nomear a fonte, a interface do módulo solicita duas informações principais do usuário: o valor total de consumo de energia elétrica (**Figura 16, 2**) e o fator de

emissão correspondente (**Figura 16**, 3). Por padrão, a plataforma apresenta o fator de emissão pré-preenchido com a média dos fatores mensais do Sistema Interligado Nacional referentes ao período de 2014 a 2023, conforme apresentado na metodologia do Capítulo 3. No entanto, esse campo permanece editável, permitindo ao usuário utilizar o fator mensal, anual ou específico de sua preferência, o que amplia a flexibilidade e a personalização do cálculo. Ao clicar em *Calcular Emissões*, o sistema realiza o cálculo automático das emissões associadas e os resultados são apresentados por fonte cadastrada na aba *Resumo* (**Figura 16**, 4 e 5, respectivamente).

The screenshot shows the 'Energia Elétrica' (Electric Energy) module in the SunMetricsC platform. The interface is divided into a sidebar on the left and a main content area. The sidebar contains navigation links for various emission categories, with 'Energia Elétrica' highlighted. The main content area features a form for entering data, with five red circles highlighting key elements: 1. 'Nome da Fonte' (Source Name) input field; 2. 'Consumo (MWh)' (Consumption) input field; 3. 'Fator de Emissão (tCO2/MWh)' (Emission Factor) input field, which is pre-filled with '0,0853'; 4. 'Calcular Emissões' (Calculate Emissions) button; and 5. The 'Resumo' (Summary) tab in the results section, which displays the calculated emission value of '0,0853 tCO2e'.

Figura 16 - Interface do módulo de *Energia Elétrica* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados, os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.

4.3.6 Módulo: transporte e distribuição (modais rodoviário e hidroviário)

O módulo de transporte e distribuição da plataforma SunMetricsC foi estruturado para estimar as emissões de gases de efeito estufa provenientes do deslocamento de materiais e equipamentos empregados na construção de usinas solares fotovoltaicas. Esta categoria de emissão, classificada como Escopo 3 do Programa Brasileiro GHG Protocol, representa uma fração relevante da pegada de

carbono de empreendimentos do setor, especialmente quando os insumos são adquiridos em regiões distantes ou em outros países.

A plataforma contempla dois modais logísticos: o transporte rodoviário e o transporte hidroviário. Ao selecionar a categoria *Transporte e Distribuição*, o usuário é direcionado inicialmente para o modal rodoviário. Para incluir uma fonte desse modal, é necessário nomeá-la, selecionar o tipo de veículo e inserir os dados de distância percorrida, carga transportada por viagem e número de viagens realizadas (**Figura 17**, 1 a 5, respectivamente).

A interface do módulo "Transporte e Distribuição" da plataforma SunMetricsC apresenta um formulário para registrar fontes de emissão rodoviárias. O formulário é dividido em seções numeradas de 1 a 5:

- 1**: Nome da Fonte (Rodoviário): Campo de texto para "Nome da fonte_rod".
- 2**: Tipo de Veículo: Menu suspenso com a opção selecionada "Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 toneladas)".
- 3**: Distância (km): Campo de texto com o valor "100".
- 4**: Carga (toneladas): Campo de texto com o valor "10".
- 5**: Quantidade de Veículos: Campo de texto com o valor "1".

Na base do formulário, há três botões: "+ Adicionar Fonte" (azul), "Limpar Categoria" (cinza) e "Calcular Emissões" (verde).

Figura 17 - Interface do módulo de *Transporte e Distribuição* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados do modal rodoviário.

Para adicionar fontes do modal hidroviário, o usuário deve clicar em *Adicionar Fonte* e digitar “hidroviário” na caixa de identificação da fonte (**Figura 18**, 1). Em seguida, deve nomear a fonte, selecionar o tipo de embarcação e preencher as informações referentes à distância percorrida, carga por viagem e número de viagens (**Figura 18**, 2 a 6, respectivamente). A seleção correta do modal e do tipo de veículo e/ou embarcação é essencial, pois os fatores de emissão aplicados variam de acordo com a tecnologia e o combustível predominante de cada categoria.

SunMetricsC

Transporte e Distribuição

Nome da Fonte (Rodoviário):

Nome da fonte_rod

Tipo de Veículo:

Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 toneladas)

Distância (km):

100

Carga (toneladas):

10

Quantidade de Veículos:

1

+ Adicionar Fonte

Limpar Categoria

Calcular Emissões

SunMetricsC

Transporte e Distribuição

Nome da Fonte (hidroviário):

Identifique esta fonte

Tipo de navio cargueiro porta containers (por tamanho em TEU):

acima de 8.000 TEU

Distância (km):

Distância percorrida

Carga (toneladas):

Carga transportada

Quantidade de Embarcações:

1

+ Adicionar Fonte

Limpar Categoria

Calcular Emissões

Figura 18 - Interface do módulo de *Transporte e Distribuição* da plataforma SunMetricsC, com destaque para adição de fonte e campos de entrada de dados do modal hidroviário.

Assim como nas demais categorias, a estimativa de emissões de gases de efeito estufa por tipo de fonte inserida é apresentada na aba *Resumo*, após o usuário acionar o botão *Calcular Emissões* (Figura 19).

SunMetricsC

[Início](#)

- Combustão Estacionária
- Combustão Móvel
- Energia Elétrica
- Transporte e Distribuição
- Emissões Fugitivas
- Supressão Vegetal
- Neutralidade de Carbono

[Ver Dashboard de Emissões](#)

Nome da Fonte (rodoviário):
Rodoviário_Test_2

Tipo de Veículo:
Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 toneladas)

Distância (km):
1

Carga (toneladas):
1

Quantidade de Veículos:
1

[+ Adicionar Fonte](#)

[Limpar Categoria](#)

[Calcular Emissões](#) **1**

2 [Resumo](#) [Por Categoria](#)

Hidroviário_Test_1	0,0000 tCO ₂ e
Rodoviário_Test_2	0,0005 tCO ₂ e

Figura 19 - Interface do módulo de *Transporte e Distribuição* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os comandos de cálculo e a visualização de resultados por fonte adicionada.

Conforme apresentado na metodologia (Capítulo 3), os fatores de emissão adotados para o modal rodoviário foram definidos com base na classificação dos caminhões por porte, enquanto para o modal hidroviário consideraram-se embarcações do tipo porta-contêiner, seguindo as diretrizes do Programa Brasileiro GHG Protocol.

A estrutura flexível do módulo permite que diferentes materiais, rotas, veículos e embarcações sejam inseridos individualmente, o que facilita a contabilização detalhada das emissões associadas a cada etapa da logística de suprimentos. Tal funcionalidade é particularmente relevante no contexto da geração solar fotovoltaica, onde a importação de componentes (como módulos, inversores e sistemas de rastreamento) é comum, gerando emissões relevantes nas etapas *upstream* do ciclo de vida do projeto.

4.3.7 Visualização e exportação dos resultados

As emissões totais de gases de efeito estufa, expressas em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), provenientes das fontes inseridas nos módulos de cálculo da plataforma SunMetricsC, são apresentadas na aba *Resumo* (**Figura 20**, 1). À medida que novas fontes são adicionadas, em qualquer módulo da plataforma, o sistema atualiza automaticamente o valor consolidado das emissões, permitindo que o usuário acompanhe os resultados de forma contínua durante todo o processo.

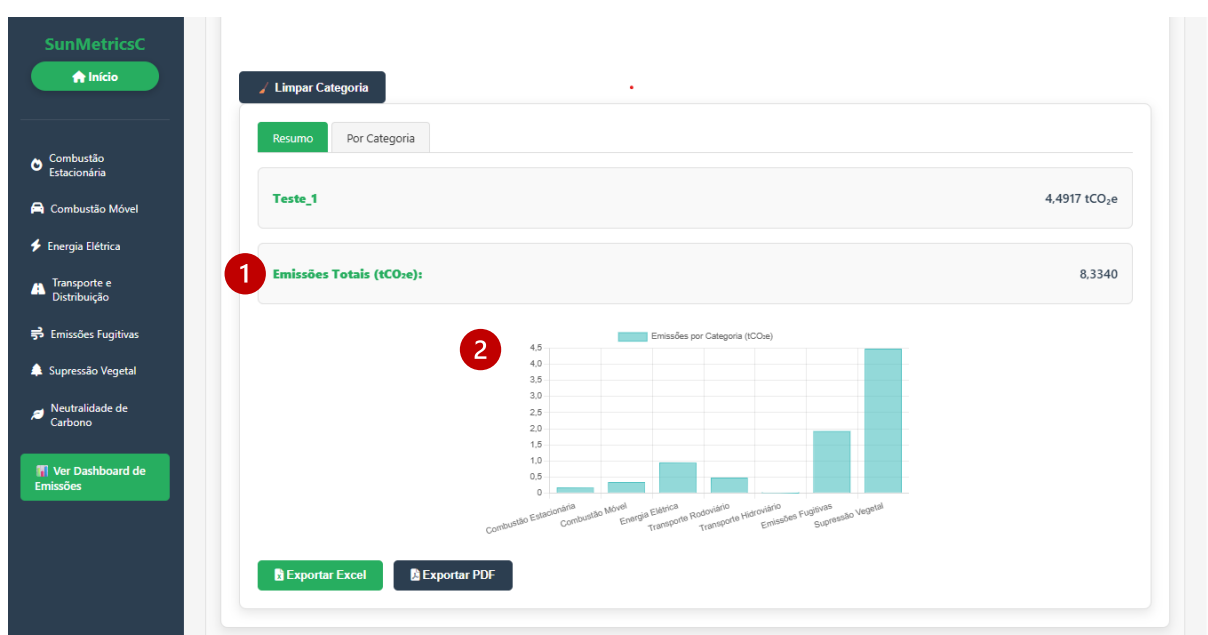


Figura 20 - Interface da aba *Resumo* da plataforma SunMetricsC, com destaque para as emissões totais de gases de efeito estufa estimadas e o gráfico de barras com os valores consolidados por categoria.

Nota: os dados apresentados são fictícios e utilizados apenas para fins ilustrativos.

Além da apresentação numérica, a aba *Resumo* disponibiliza também um gráfico de barras que ilustra visualmente a contribuição relativa de cada categoria de emissão para o total calculado (**Figura 20**, 2). Essa representação gráfica facilita a compreensão dos dados durante a inserção das informações, permitindo ao usuário uma análise rápida e intuitiva dos principais focos emissores no inventário de gases de efeito estufa.

Complementarmente, a aba *Por Categoria* fornece uma listagem detalhada dos valores totais de emissões por categoria, todos expressos em tCO₂e (**Figura 21**). Assim como a aba *Resumo*, essa seção pode ser acessada a qualquer momento durante o preenchimento dos dados, facilitando o monitoramento da contribuição relativa de cada módulo para o total de emissões.

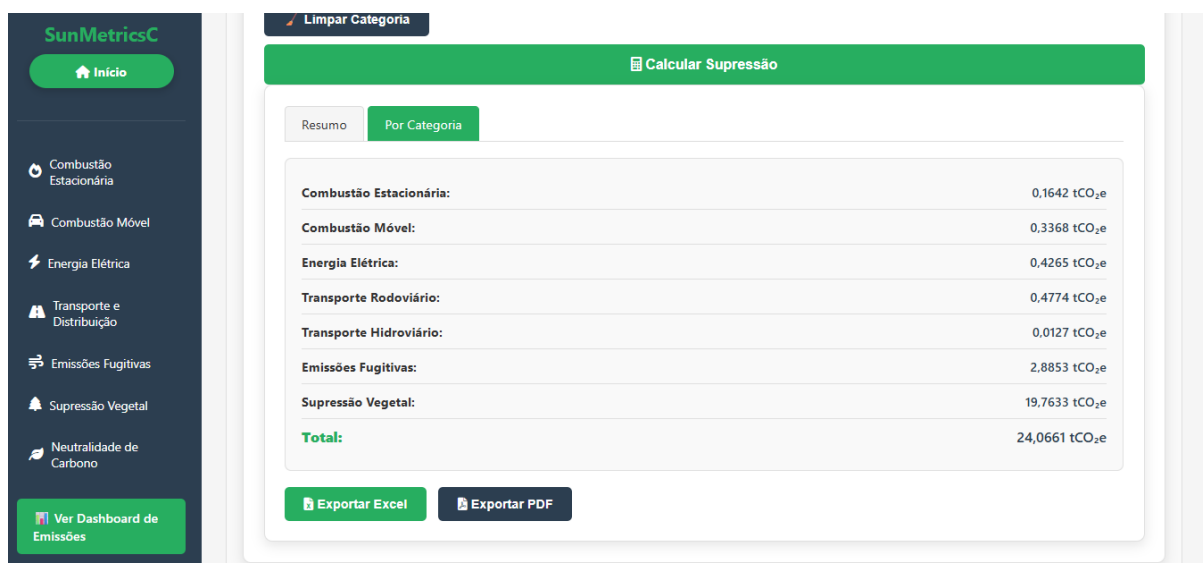


Figura 21 - Interface da aba *Por Categoria*, com a listagem consolidada das emissões totais de gases de efeito estufa por categoria.

Nota: os dados apresentados são fictícios e utilizados apenas para fins ilustrativos.

A plataforma também oferece funcionalidades de exportação automática dos resultados, permitindo o download em dois formatos principais: PDF, que gera um relatório formatado com identificação do projeto, dados inseridos e demais informações pertinentes; e Excel, que apresenta os dados brutos consolidados, facilitando análises complementares. Essa flexibilidade amplia as possibilidades de uso da plataforma, permitindo sua integração a relatórios técnicos, documentos de licenciamento ambiental e inventários corporativos de emissões.

4.4 Neutralidade de carbono

Após a realização do inventário de emissões de gases de efeito estufa, a plataforma SunMetricsC permite ao usuário estimar as emissões evitadas decorrentes da geração de energia renovável, bem como calcular o tempo necessário para que o projeto atinja a neutralidade de carbono.

Para isso, o módulo *Neutralidade de Carbono* requer a inserção de informações básicas sobre o empreendimento, como potência instalada, fator de capacidade, vida útil operacional, data de início da operação e o total de emissões de gases de efeito estufa associadas ao projeto (**Figura 22**).

Figura 22 - Interface do módulo *Neutralidade de Carbono* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os campos de entrada de dados.

A partir desses dados, a plataforma estima a geração de energia elétrica mensal e anual, assumindo operação contínua ao longo da vida útil especificada (**Figura 23**). Ressalta-se que, nesta versão, não são consideradas perdas por degradação dos módulos fotovoltaicos, sendo adotada uma curva constante de geração. A estimativa das emissões evitadas, expressa por mês, ano e acumulado, utiliza como referência o fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional dos últimos dez anos, fixado inicialmente em 0,0853 tCO₂e/MWh, conforme descrito no Capítulo 3.

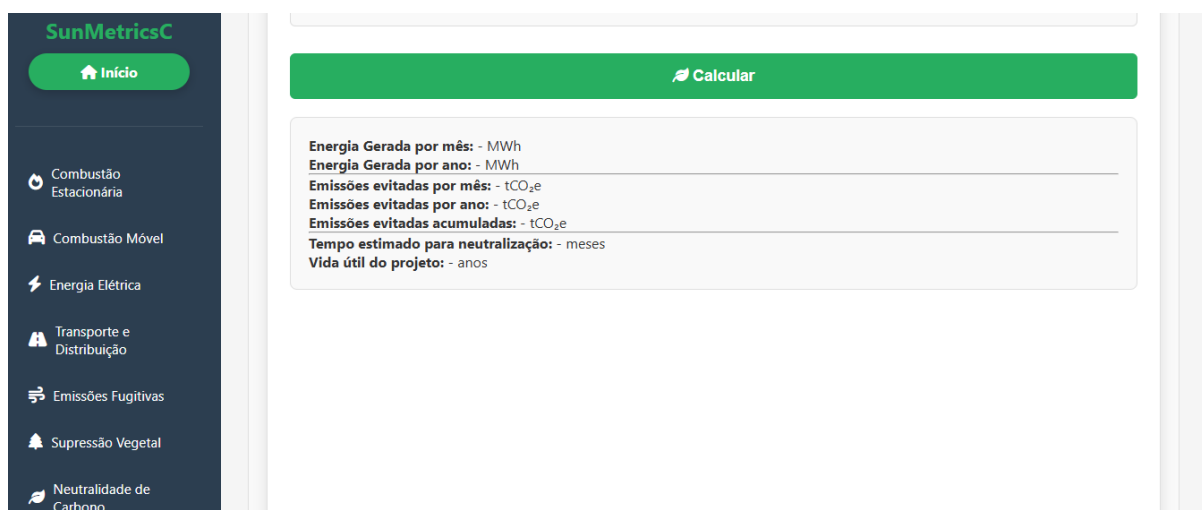


Figura 23 - Interface do módulo *Neutralidade de Carbono* da plataforma SunMetricsC, com destaque para os comandos de cálculo e a visualização de resultados.

Com base na energia gerada e nas emissões evitadas acumuladas, a SunMetricsC calcula automaticamente o tempo necessário para que as emissões totais associadas ao projeto sejam neutralizadas (**Figura 23**). Além dos resultados numéricos, a plataforma gera um gráfico de linhas que ilustra visualmente o ponto de neutralidade de carbono ao longo do tempo, facilitando a interpretação do momento em que as emissões geradas são efetivamente compensadas (**Figura 24**).

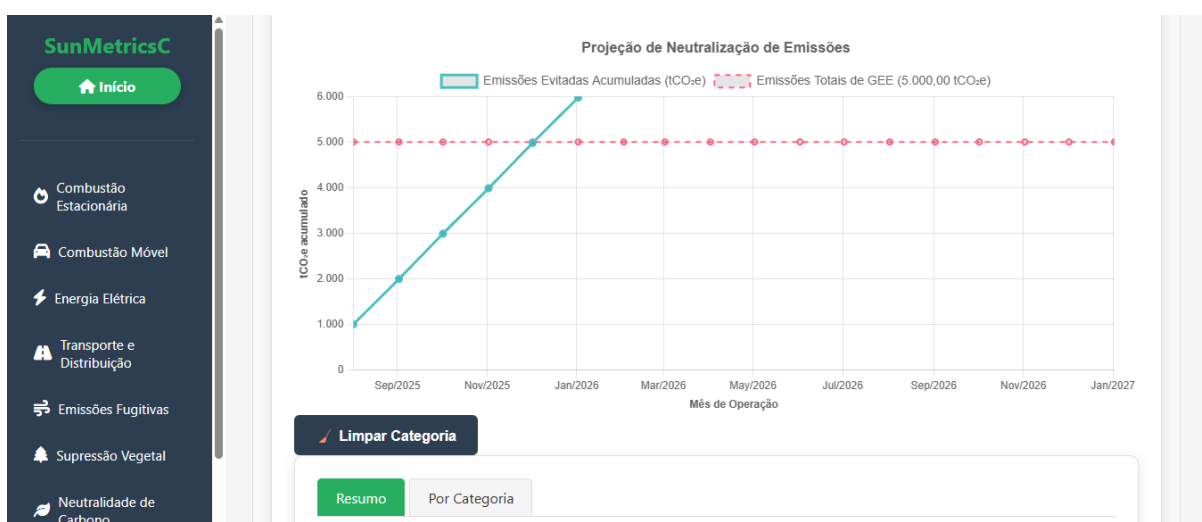


Figura 24 - Interface da aba *Neutralidade de Carbono* da plataforma SunMetricsC, com destaque para o gráfico de linhas com a projeção da neutralidade das emissões de gases de efeito estufa.

Nota: os dados apresentados são fictícios e utilizados apenas para fins ilustrativos.

As funcionalidades da aba *Neutralidade de Carbono* oferecem um diferencial à plataforma ao permitir uma visão clara do balanço de emissões do projeto, auxiliando empresas na comunicação de metas ambientais, elaboração de estratégias de compensação e validação de compromissos de sustentabilidade. O uso dessa plataforma também reforça a importância da análise integrada do ciclo de vida dos empreendimentos, contemplando não apenas as emissões geradas, mas também os benefícios ambientais potenciais ao longo da operação.

4.5 Validação dos resultados

4.5.1 Emissões de gases de efeito estufa

A validação dos resultados obtidos pela plataforma SunMetricsC foi realizada por meio da comparação com os valores calculados manualmente, utilizando a Ferramenta GHG Protocol (versão 2024.0.1). Para garantir total precisão na análise, foram utilizados os dados completos do empreendimento, sem abreviações de casas decimais. Desta forma, a planilha original de dados da usina apresentada no Capítulo 2 foi integralmente consultada como base de comparação.

As emissões de gases de efeito estufa foram estimadas nas seis categorias contempladas no escopo da plataforma. Para as categorias *Combustão Estacionária* e *Combustão Móvel*, os dados de entrada corresponderam ao total consumido por tipo de combustível. A categoria *Emissões Fugitivas* seguiu o mesmo padrão, considerando o total recarregado por tipo de gás. Já para as categorias *Supressão Vegetal* (Mudança no Uso do Solo) e *Transporte e Distribuição* (modais rodoviário e hidroviário), os dados de entrada foram inseridos de forma desagregada, por espécie vegetal e por tipo de material transportado, respectivamente.

Na categoria Compra de Energia Elétrica, adotou-se o uso de fatores mensais de emissão do Sistema Interligado Nacional, conforme utilizado nos cálculos manuais realizados com a Ferramenta GHG Protocol. Essa padronização de parametrização garantiu total alinhamento entre as duas abordagens.

Conforme apresentado na **Tabela 9**, os resultados obtidos pela SunMetricsC demonstraram total correspondência com os valores calculados manualmente pela Ferramenta GHG Protocol em todas as categorias avaliadas. Essa equivalência reforça a confiabilidade e a precisão dos cálculos automatizados realizados pela plataforma.

Tabela 9 - Emissões de gases de efeito estufa (tCO₂e) por categoria, obtidas pela Ferramenta GHG Protocol e pela plataforma SunMetricsC.

Categoria	Ferramenta GHG Protocol (tCO₂e)	Plataforma SunMetricsC (tCO₂e)
Combustão estacionária	422,1169	422,1169
Combustão móvel	1.394,1868	1.394,1868
Fugitivas	6,1323	6,1323
Mudança no Uso do Solo (supressão vegetal)	1.299,4234	1.299,4234
Compra de energia elétrica	4,2156	4,2156
Transporte e distribuição (modal rodoviário)	284,7327	284,7327
Transporte e distribuição (modal hidroviário)	2.211,7272	2.211,7272
Total	5.622,5350	5.622,5350

Embora o fator de emissão médio (0,0853 tCO₂e/MWh), calculado com base na média dos últimos 10 anos (2014 a 2023), tenha sido adotado como referência na plataforma, a funcionalidade permite ao usuário editar esse valor conforme o objetivo da análise. Assim, o fator médio permanece disponível como sugestão para casos em que não haja interesse ou possibilidade de detalhamento mensal, garantindo uma estimativa robusta para a categoria de compra de energia elétrica.

A **Tabela 10** apresenta os resultados da estatística descritiva das emissões totais obtidas pelas duas abordagens. Verifica-se valores idênticos entre os valores médios, mediana, desvio padrão, variância e extremos (mínimo e máximo), demonstrando a perfeita correspondência entre os dados processados pela plataforma e os cálculos manuais.

Tabela 10 - Estatística descritiva das emissões de gases de efeito estufa (tCO₂e) obtidas pela Ferramenta GHG Protocol e pela plataforma SunMetricsC.

Indicador	Ferramenta GHG Protocol (tCO ₂ e)	Plataforma SunMetricsC (tCO ₂ e)
Média	803,2193	803,8911
Mediana	422,1169	422,1169
Desvio padrão	843,3245	843,3245
Variância (tCO ₂ e ²)	609.596,7877	609.596,7877
Mínimo	4,2156	4,2156
Máximo	2.211,7272	2.211,7272

Nota: Todos os valores estão expressos em toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e), exceto a variância, expressa em tCO₂e².

Esse alinhamento integral valida a estrutura da SunMetricsC, atestando sua capacidade de reproduzir os resultados esperados com exatidão, mesmo diante de um volume de dados diversificado e múltiplas fontes emissoras.

A normalidade das distribuições foi verificada por meio do Teste de Shapiro-Wilk, cujos resultados estão apresentados na **Tabela 11**. Ambos os conjuntos de dados apresentaram valor-p superior a 0,05, indicando que não há evidências para rejeição da hipótese nula de normalidade. Com isso, foi possível aplicar o Teste t pareado para comparar diretamente os resultados obtidos pelas duas abordagens.

Tabela 11 - Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk aplicado aos conjuntos de dados de emissão de gases de efeito estufa obtidos pela Ferramenta GHG Protocol e pela plataforma SunMetricsC.

Conjunto de dados	Valor-p	Distribuição normal
Ferramenta GHG Protocol	0,2326	sim
Plataforma SunMetricsC	0,2326	sim

O Teste t pareado apresentou valor-p de 0,2553 (valor-p > 0,05), confirmando a inexistência de diferença estatisticamente significativa entre os valores de emissão de gases de efeito estufa obtidos pelas duas ferramentas. Esse resultado reforça a robustez da plataforma SunMetricsC, validando sua capacidade de replicar, com precisão e consistência, os cálculos preconizados pela ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol. A equivalência entre os métodos, mesmo com grande número de categorias e fontes emissoras, reforça a confiabilidade da plataforma como ferramenta técnica para elaboração de inventários de gases de efeito estufa no setor de geração solar fotovoltaica.

4.5.2 Emissões evitadas e neutralidade de carbono

A plataforma SunMetricsC também foi aplicada para estimar os resultados consolidados de geração de energia elétrica, emissões evitadas de gases de efeito estufa e projeção do tempo necessário para alcançar a neutralidade de carbono do empreendimento UFV STL 9. Para essa finalidade, a plataforma utiliza como base de cálculo o fator de 0,0853 tCO₂e/MWh, correspondente à média dos fatores mensais do Sistema Interligado Nacional para o período de 2014 a 2023. Esse parâmetro permite a quantificação das emissões evitadas com base na energia gerada por fonte solar fotovoltaica, considerando sua substituição potencial frente à matriz elétrica convencional brasileira.

Como as informações operacionais do empreendimento permaneceram constantes e as emissões totais de gases de efeito estufa foram idênticas nos dois cenários avaliados, os resultados estimados de geração de energia elétrica e das emissões evitadas associadas à operação da UFV STL 9 são apresentados na **Figura 25**.

SunMetricsC

[Início](#)

- Combustão Estacionária
- Combustão Móvel
- Energia Elétrica
- Transporte e Distribuição
- Emissões Fugitivas
- Supressão Vegetal
- Neutralidade de Carbono
- [Ver Dashboard de Emissões](#)

Neutralidade de Carbono

Potência Instalada (MWac):

Fator de Capacidade (%):

Vida Útil (anos):

Emissões Totais (tCO₂e):

Data de Início de Operação:

[Calcular](#)

Energia Gerada por mês: 11.680,00 MWh
 Energia Gerada por ano: 140.160,00 MWh
 Emissões evitadas por mês: 995,72 tCO₂e
 Emissões evitadas por ano: 11.948,64 tCO₂e
 Emissões evitadas acumuladas: 298.716,00 tCO₂e
 Tempo estimado para neutralização: 5,6 meses
 Vida útil do projeto: 25 anos

Figura 25 - Estimativa de geração de energia elétrica, emissões evitadas de gases de efeito estufa e tempo projetado para neutralidade de carbono, geradas pela plataforma SunMetricsC para a UFV STL 9.

Ao comparar esses resultados com os obtidos no Capítulo 2, observa-se que os valores mensais e anuais de geração de energia e de emissões evitadas estimados pela plataforma coincidiram integralmente com os cálculos realizados manualmente, o que reforça a precisão dos resultados automatizados. A única diferença verificada diz respeito às emissões evitadas acumuladas ao longo do período de operação comercial da usina, que foram inferiores no Capítulo 2 devido à consideração da taxa de degradação anual dos módulos fotovoltaicos (0,4%), enquanto a versão atual da SunMetricsC utiliza um valor constante de geração ao longo do tempo.

A projeção realizada pela plataforma indicou que o empreendimento atingirá a neutralidade de carbono das emissões quantificadas em 5,6 anos. Esse resultado reforça a coerência entre os dados processados pela SunMetricsC e os cálculos realizados manualmente, validando a funcionalidade de estimativa de emissões evitadas e de projeção de neutralidade da ferramenta. Tais achados atestam a aplicabilidade da plataforma para análises consolidadas, automatizadas e de fácil replicabilidade em empreendimentos de geração solar fotovoltaica.

4.6 Atualizações futuras e melhorias

Conforme mencionado anteriormente, o uso da plataforma SunMetricsC é atualmente aberto, não exigindo login ou cadastro prévio. Dessa forma, qualquer usuário pode acessar e realizar os cálculos diretamente. No entanto, está prevista para versões futuras a implementação de uma funcionalidade de criação de contas de usuário. Esse recurso permitirá a edição de dados, o armazenamento de inventários e a comparação entre diferentes resultados gerados, agregando valor às análises longitudinais e ao acompanhamento do desempenho ambiental dos empreendimentos.

Na versão inicial da SunMetricsC, já foi desenvolvido o esboço visual da aba de *Login* (cadastro de usuário). A **Figura 26** apresenta essa área, que, embora ainda inativa, representa um passo para a personalização da experiência do usuário e a evolução da plataforma.

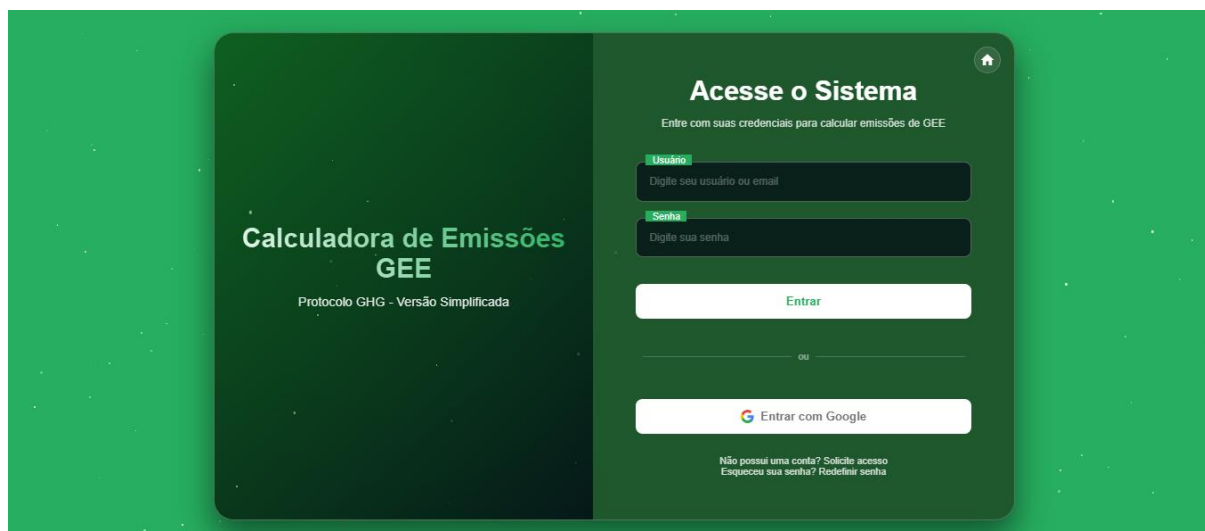


Figura 26 - Interface da aba *Login* da plataforma SunMetricsC, em desenvolvimento.

Uma das principais atualizações futuras previstas para a plataforma SunMetricsC é a implementação da funcionalidade de importação de dados em lote, com suporte para arquivos em formatos como PDF e Excel (**Figura 27**). Essa melhoria

visa otimizar o preenchimento das informações nos módulos de cálculo, especialmente em projetos de maior escala, com múltiplas fontes emissoras. A funcionalidade permitirá ao usuário importar dados estruturados diretamente para a plataforma, evitando o preenchimento manual repetitivo e reduzindo o risco de erros operacionais. Com essa automação parcial da entrada de dados, espera-se um aumento na eficiência do processo de quantificação de emissões, especialmente em contextos corporativos, projetos com inventários complexos ou atividades de monitoramento periódico.

Figura 27 - Interface inicial da área de cálculo da plataforma SunMetricsC, com destaque para a funcionalidade de importação de dados, em desenvolvimento.

Além disso, pretende-se incorporar na categoria de Supressão Vegetal (Mudança no Uso do Solo) uma base de dados com informações específicas das espécies mais comuns por bioma. Com isso, o usuário poderá simplesmente selecionar a espécie em uma lista suspensa e informar o volume de madeira suprimida, sendo os demais parâmetros automaticamente preenchidos pela plataforma e as emissões estimadas. Esse aprimoramento reduzirá o tempo de preenchimento e minimizará erros por parte dos usuários, sem comprometer a robustez técnica dos cálculos.

Para os projetos solares fotovoltaicos, subintende-se que os dados primários dos inventários florestais não são um empecilho, uma vez que, para construção das usinas, especialmente de geração centralizada e atualmente concentradas em áreas rurais, há supressão/remoção de vegetação nativa, e teoricamente realização do inventário/senso florestal para obtenção das devidas licenças ambientais e retirada das árvores.

Outra melhoria relevante em desenvolvimento é o aprimoramento do painel de visualização dos resultados (*dashboard*), com foco na interatividade e clareza na apresentação das informações. A nova interface permitirá ao usuário acompanhar de maneira mais intuitiva as emissões totais de gases de efeito estufa. Essa visualização dinâmica, por meio de gráficos e indicadores interativos, facilitará a compreensão dos resultados consolidados durante ou após o preenchimento dos dados, tornando o processo de análise mais ágil e acessível. O desenvolvimento do *dashboard* visa oferecer uma experiência mais amigável e eficiente, especialmente para profissionais que desejam interpretar os dados rapidamente e comunicar resultados de forma visualmente atrativa.

The image shows the initial interface of the SunMetricsC platform. The top navigation bar is green and contains the logo 'SunMetricsC' and a home icon labeled 'Início'. Below this, a sidebar lists various categories: 'Combustão Estacionária', 'Combustão Móvel', 'Energia Elétrica', 'Transporte e Distribuição', 'Emissões Fugitivas', 'Supressão Vegetal', and 'Neutralidade de Carbono'. A green button labeled 'Ver Dashboard de Emissões' is highlighted with a red arrow. The main content area has a green header with the title 'SunMetricsC - Emissões de Gases de Efeito Estufa' and the subtitle 'Calculadora de Emissões GEE'. Below the header are two buttons: 'Importar PDF' and 'Importar Excel'. The main form is titled 'Informações do Projeto' and contains several input fields: 'Nome do Empreendimento', 'Projeto', 'Responsável Técnico', 'E-mail', 'Bioma' (dropdown menu), and 'Estado' (dropdown menu). There is also a text area for 'Observações'.

Figura 28 - Interface inicial da área de cálculo da plataforma SunMetricsC, com destaque para o módulo *Ver Dashboard de Emissões*, em desenvolvimento.

Complementarmente à visualização em tela, a futura versão da plataforma incluirá a possibilidade de exportar os gráficos gerados no *dashboard*, em formatos como PNG, JPEG e PDF. Essa funcionalidade permitirá que os usuários integrem os elementos visuais diretamente em relatórios técnicos, apresentações e documentos institucionais, agregando valor comunicativo às análises produzidas. A exportação dos gráficos facilitará ainda o compartilhamento de informações com diferentes públicos, como equipes técnicas, gestores e órgãos ambientais, promovendo a transparência na comunicação dos resultados e contribuindo para a tomada de decisão baseada em dados.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento da plataforma SunMetricsC representou um avanço significativo na automatização do processo de quantificação de emissões de gases de efeito estufa, especialmente voltado para o setor de geração de energia solar fotovoltaica. A ferramenta foi construída com base nas diretrizes metodológicas do *GHG Protocol* e adaptada para atender às especificidades técnicas, operacionais e regulatórias desse tipo de empreendimento.

Os resultados demonstraram a capacidade da plataforma de replicar com precisão os cálculos manuais tradicionalmente aplicados. A validação estatística evidenciou a confiabilidade dos dados gerados, tanto em termos de coerência numérica quanto de aplicabilidade prática, reforçando a robustez da ferramenta e sua adequação para uso técnico-operacional.

Um dos principais diferenciais da SunMetricsC é a integração automatizada das funcionalidades de estimativa da geração de energia elétrica, cálculo das emissões evitadas e projeção do tempo necessário para que o empreendimento atinja a neutralidade de carbono. Essas funcionalidades ampliam substancialmente o escopo das ferramentas tradicionalmente utilizadas, permitindo uma avaliação mais completa do desempenho ambiental dos empreendimentos. A aplicação no estudo de caso real comprovou a viabilidade da plataforma em contextos operacionais, com potencial de adaptação para empreendimentos de diferentes portes e níveis de complexidade.

Destaca-se ainda a inclusão da funcionalidade de cálculo de emissões com base em dados primários para a categoria Mudança no Uso do Solo (supressão vegetal), não contemplada diretamente pela Ferramenta GHG Protocol. Ao incorporar esse recurso, a SunMetricsC contribui para suprir uma lacuna metodológica relevante, viabilizando estimativas mais precisas das emissões decorrentes da remoção de biomassa aérea, sobretudo em empreendimentos situados em áreas com cobertura vegetal nativa significativa.

Embora direcionada ao setor fotovoltaico, a plataforma apresenta flexibilidade de aplicação e pode ser utilizada em outros tipos de empreendimentos que compartilhem fontes emissoras similares. Suas categorias de cálculo podem ser

exploradas de forma modular, de acordo com a natureza e o escopo de cada projeto avaliado.

Por fim, as atualizações futuras previstas reforçam o potencial da plataforma. A possibilidade de importação automatizada de dados, por exemplo, irá aumentar a eficiência e a acessibilidade para usuários de diversos perfis. Dessa forma, a SunMetricsC se consolida como uma ferramenta robusta, prática e inovadora para apoiar a gestão de emissões e o planejamento rumo à neutralidade de carbono.

3. CONCLUSÕES GERAIS

Esta tese demonstrou, de forma integrada, que a expansão da energia solar fotovoltaica de grande porte no nordeste brasileiro requer instrumentos técnicos mais robustos para garantir sua efetiva sustentabilidade ambiental e climática.

A análise crítica dos processos de licenciamento evidenciou que o atual enquadramento normativo apresenta elevado heterogeneidade entre os Estados do Nordeste, sem critérios técnicos uniformes para a definição do tipo de estudo ambiental exigido. Essa ausência de padronização compromete a avaliação adequada da complexidade dos impactos ambientais, especialmente quando são desconsiderados atributos ecológicos sensíveis. A pesquisa apontou a necessidade de revisão dos critérios legais, com base em dados técnicos e indicadores ambientais mais qualificados.

A quantificação das emissões de gases de efeito estufa associadas à construção de uma usina solar, com uso de inventário florestal real e parâmetros específicos, revelou que as emissões podem ser significativas na fase construtiva, sendo a supressão vegetal um dos principais vetores. Os resultados indicam que, ao longo da vida útil, as emissões evitadas superam as emissões da fase de instalação, confirmando o potencial da fonte solar para mitigação climática, desde que bem planejada. Ressalta-se, contudo, a importância de ampliar a quantificação das emissões para outras etapas do projeto, incluindo fases prévias à implantação.

Como resposta técnica aos desafios identificados, foi desenvolvida e validada a plataforma SunMetricsC, capaz de quantificar e projetar a neutralização de emissões de gases de efeito estufa em empreendimentos solares. A plataforma se destaca por sua aplicabilidade direta na elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa, oferecendo uma solução acessível, transparente e metodologicamente consistente para empreendedores, consultores e demais agentes envolvidos na gestão ambiental de empreendimentos solares.

Dessa forma, a pesquisa contribui para o aprimoramento da avaliação ambiental no setor de geração de energia solar fotovoltaica, propondo soluções

práticas para fortalecer a tomada de decisão técnica, garantir maior precisão nos inventários de emissões e orientar políticas públicas alinhadas à transição energética e à justiça climática.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, p. 236, 2008. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefndmkaj/https://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasul_3a-ed.pdf. 18 set. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Energia solar: usinas centralizadas ultrapassam os 5% na matriz elétrica brasileira, com 10,4 GW instalados**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/energia-solar-usinas-centralizadas-ultrapassam-os-5-na-matriz-eletrica-brasileira-com-10-4-gw-instalados>. Acesso em: 18 set. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Rio de Janeiro, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Rio de Janeiro. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 1059, de 07 de fevereiro de 2023**. Rio de Janeiro. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL/SIGA**. 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQ0YjllLWJlYmEtYzdKNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 08 set. 2023.
- AHMED, K.; SANCHEZ-TRIANA, E.; ORTOLANO, L.; FELDMAN, M. S.; KHADEMIAN, A. M.; MORGENSTERN, R. D.; KENDE-ROBB, C. M.; VAN WICK, W. A.; BLAIR, H. W.; EBRAHIM, A. S. **Environmental assessment for policies: an instrument for good governance**. World Bank Publications, 2008. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/943911468163473072>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- ALMEIDA NETO, J. X.; ANDRADE, A. P.; LACERDA, A. V.; FÉLIX, L. P.; ALCÂNTARA BRUNO, R. L. Composição florística, estrutura e análise populacional do feijão-bravo (*Capparis flexuosa* L.) no semiárido paraibano, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 4, p. 187-194, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/1138/pdf>.
- ALMEIDA, M. R. R.; VERONEZ, F. A.; MALVESTIO, A. C. Desvendando os Praticantes da Avaliação de Impacto Ambiental no Brasil: Perfil, Formação e Percepção da Prática da AIA pelos Participantes do CBAI. **Sociedade & Natureza**, v. 36, p. e71552, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/SN-v36-2024-71552>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische**

zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ALVES, E. B. B. M. **Inventário e neutralização de emissões de gases de efeito estufa: avaliação e desenvolvimento de software de cálculo**. 153 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/d1ace4b3-c76d-4368-95c4-8ef68ebbf68>.

ANDRADE, E. **Geração hidrelétrica no Nordeste: risco empresarial e ambiental para o setor elétrico brasileiro**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/EuridiceSoaresMamedeDeAndrade.pdf.

ANGIOSPERM PHYLOGENY GROUP - APG. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**. v. 181, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/boj.12385>.

ARTICULAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO - ASA. **Povos e comunidades tradicionais enfrentam empresas e governos ao exigirem ser consultadas antes da instalação de grandes projetos**. 2023. Disponível em: https://www.asabrasil.org.br/noticias?artigo_id=11357. Acesso em: 02 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA – ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA - ABSOLAR. **Entenda como funciona a energia fotovoltaica**. 2023b. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/o-que-e-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 05 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA - ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2023a. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 05 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCHS E CGHS - ABRAPCH. **O setor elétrico é sustentável?**. 2022. Disponível em: <https://abrapch.org.br/2017/05/o-setor-eletrico-e-sustentavelij/>. Acesso em: 03 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE – ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. 2023. Disponível em: chrome-extension://efaidnbnmnibpcjgclclefindmkaj/https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf.

AURÉLIO, S. O. S. **Análise da fragmentação florestal na área de influência do empreendimento de implantação da BR-392/RS**. 2016. Dissertação (Mestrado) Centro Universitário La Salle, Canoas, 2016. Disponível em: <https://svr-net20.unilasalle.edu.br/bitstream/11690/675/1/sosaurelio.pdf>.

AZEVEDO, V. W. B.; CANDEIAS, A. L. B.; TIBA, C. Location study of solar thermal power plant in the state of Pernambuco using geoprocessing technologies and multiple criteria analysis. **Energies**, v. 10, n. 7, p. 1042, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10071042>.

BARBOSA, E. S. S. Barreiras antropogênicas e conectividade do habitat. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 3, p. e3508, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n3-226>.

BATISTA, F. G.; OLIVEIRA, B. T.; ARAÚJO ALMEIDA, M. E.; BRITO, M. S.; MELO, R. R.; ALVES, A. R. Florística e fitossociologia em um remanescente florestal de caatinga no município de Caicó-RN, Brasil. **Desafios: Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 6, n. 3, p. 118-128, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20873/uftv6-7469>.

BECQUEREL, A. E. On electrod effect under the influence of solar radiation. *Comptes Rendus de l'Academie Sciences Paris*, v. 9, p. 561, 1839.

BIRNIK, A. An evidence-based assessment of online carbon calculators. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 17, p. 280-293, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.05.013>.

BLUESOL. **Resolução 482 da ANEEL**: 3 principais pontos comentados. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/resolucao-482-da-aneel-guia-completo/>. Acesso em: 03 set. 2023.

BORGES NETO, M. R.; BORGES, T. S. H.; TEÓFILO, R. B.; BORGES, L. S. **Licenciamento ambiental para usinas fotovoltaicas em territórios do bioma Caatinga**. In Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.59627/cbens.2020.1018>.

BOSCÁ, P. M. **O impacto da emissão de material particulado sobre a saúde respiratória da população de Manaus no período de 2008 a 2019**. 2021. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/8252>.

BOŠNJAKOVIĆ, M.; SANTA, R.; CRNAC, Z.; BOŠNJAKOVIĆ, T. Environmental impact of PV power systems. **Sustainability**, v. 15, n. 15, p. 11888, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151511888>.

BRASIL. **Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938compilada.htm. Acesso em: 06 out. 2023.

BRASIL. **Portaria nº 102, de 22 de março de 2016**. Estabelece as condições para Cadastramento de empreendimentos de geração em leilões de energia nova e existente, de fontes alternativas, de energia de reserva e reserva de capacidade junto à Empresa de Pesquisa Energética - EPE, com vistas à Habilitação Técnica. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias/2016/portaria-n-102-2016.pdf/view>. Acesso em: 08 out. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 006, de 16 de setembro de 1987**. Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0006-160987.PDF>. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237. Acesso em: 05 out. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 279, de 27 de julho de 2001**. Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=106095>. Acesso em: 05 out. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>. Acesso em: 07 out. 2023.

BUIATTI, G. M.; ANDRADE, R. L.; AMARAL, P. C.; RYMER, J. V.; OLIVEIRA, C.; FIORANELLI, S. Metodologia para estimativa de redução de emissões de CO₂ aplicada a sistemas de microgeração fotovoltaica. *In: Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte: 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.59627/cbens.2016.1955>.

CARDOSO, P. C. N.; SCHETTINO, S.; MINETTE, L. J.; SORANSO, D. R. Paradigmas da sustentabilidade ambiental na geração de energia fotovoltaica. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, Curitiba, v. 17, n. 52, p. 01-23, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.55905/rdelosv17.n52-002>.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRAS; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Levantamento da legislação para licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica**

por fonte solar: situação em 2022. Nota técnica conjunta ELETROBRAS/EPE. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Nota-Tecnica-Levantamento-da-legislacao-para-licenciamento-ambiental-de-empreendimentos-de-geracao-de-energia-eletrica-por-.aspx>.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE – FGVces. **Definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 1: versão 4.0.** Nota Técnica. Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces), 2018a. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/30244>.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE – FGVces. **Definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 3: versão 2.0.** Nota Técnica. Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces), 2018b. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/30251>.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE – FGVces. **Diretrizes para a contabilização de emissões de Escopo 2 em inventários organizacionais de gases de efeito estufa no âmbito do Programa Brasileiro GHG Protocol: versão 4.0.** Nota Técnica. Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces), 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/30248>.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE – FGVces. **Especificações de verificação do Programa Brasileiro GHG Protocol.** Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces), 2011. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/30258>.

CHEN, Y.; CHEN, C.; ALTERMATT, P. P.; ZHANG, S.; WANG, L.; ZHANG, X.; XU, J.; ZHIQIANG, F.; SHEN, H.; VERLINDEN, P. Technology evolution of the photovoltaic industry: Learning from history and recent progress. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 31, n. 12, p. 1194-1204, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.3626>.

COLOMB, V.; TOUCHEMOULIN, O.; BOCKEL, L. CHOTTE, J.; MARTIN, S.; TINLOT, M.; BERNOUX, M. Selection of appropriate calculators for landscape scale greenhouse gas assessment for agriculture and forestry. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015029>.

COSTA, M. A. S.; COSTA, M. S.; COSTA, M. M. S.; LIRA, M. A. T. Impactos socioeconômicos, ambientais e tecnológicos causados pela instalação dos parques eólicos no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 399-411, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786343049>.

COSTA, V. F.; SCHAIDHAUER, A. C. G.; MELO JR., J. C. F. Alterações foliares em *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae) decorrentes do acúmulo de particulados atmosféricos em área de mineração no sul do Brasil. **Revista Brasileira de**

Geografia Física, v. 16, n. 6, p. 2994-3005, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.6.p2994-3005>.

CUCCHIELLA, F.; GASTALDI, M.; MILIACCA, M. The management of greenhouse gas emissions and its effects on firm performance. **Journal of Cleaner Production**, v.167, p. 1387-1400, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.170>.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2018. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_2388.pdf. Acesso em: 15 jul. 2025.

DIAS, F. O.; BONFIM, H. S.; BOMBARDELLI, J.; MATOS, G. B. C. Análise bibliométrica da produção científica sobre créditos de carbono (2012–2021). **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, Miami, v. 17, n. 1, p. 1-18, e03101, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n1-026>.

DUARTE, C.G.; DIBO, A. P.A.; SIQUEIRA-GAY, J.; SÁNCHEZ, L. E. Practitioners' perceptions of the Brazilian environmental impact assessment system: results from a survey. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 35, n. 4, p. 293-309, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14615517.2017.1322813>.

ELLWOOD, P.; BRADBROOK, S.; REYNOLDS, J.; DUCKWORTH, M. Foresight of new and emerging risks to occupational safety and health associated with new technologies in green jobs by 2020: Phase 2–Key technologies. **European Agency for Safety and Health at Work**, 2011. Disponível em: <https://osha.europa.eu/sites/default/files/green-jobs1.pdf>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Nota Técnica: Análise socioambiental das fontes energéticas do PDE 2034**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-725/NT%20An%C3%A1lise%20socioambiental%20das%20fontes%20energ%C3%A9ticas%20do%20PDE%202034%20NT010_24%20DEA_SMA.pdf. Acesso em: 31 jul. 2025.

FARIAS, R. C.; LACERDA, A. V. D.; GOMES, A. C.; BARBOSA, F. M.; DORNELAS, C. S. M. Riqueza florística em uma área ciliar de Caatinga no Cariri Ocidental da Paraíba, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 7, p. 109-118, 2017. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.21438/rbgas.040711>.

FLIZIKOWSKI, L. C. **Estimativa de emissões de dióxido de carbono na construção civil e neutralização com espécies florestais: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/28306>. Acesso em: 15 jul. 2025.

FLORA DO BRASIL. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acesso em: 17 jul. 2023.

FONSECA, A.; SÁNCHEZ, L. E.; RIBEIRO, J. C. J. Reforming EIA systems: A critical review of proposals in Brazil. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 62, p. 90-97, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.10.002>.

FRANCO, F. C. O. Energia, desenvolvimento e recursos naturais: considerações sobre a (in)sustentabilidade do modelo hidrelétrico brasileiro. In: CUNHA, B. P.; AUGUSTIN, S. (Org.). **Sustentabilidade ambiental: estudos jurídicos e sociais**. 01ed. Caxias do Sul: EDUCS, 2014, v. 01, p. 187-197. Disponível em: <https://www.ecoagri.com.br/web/wp-content/uploads/Sustentabilidade-ambiental-Estudos-jur%C3%ADdicos-e-sociais.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

FREITAS, L. M.; CORIOLANO-MARINUS, M. W.; LIMA, L. S.; RUIZ-MORENO, L. Formação dos agentes comunitários de saúde no município de Altamira (PA), Brasil. **ABCS Health Sciences**, v.40, n. 3, p. 412-420, 2015. Disponível em: <https://www.portalnepas.org.br/abcs/hs/article/view/791>.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VAGAS – FGV. **Ferramenta de cálculo de emissões de GEE**. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 25 abr. 2024.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS - FGV. **Programa Brasileiro GHG Protocol**. Centro de Estudos em Sustentabilidade – FGVces. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 5 jun. 2025.

GAIO, A.; ROSNER, R. F.; FERREIRA, V. M. O licenciamento ambiental como instrumento da política climática. **Revista Direito e Práxis**, v. 14, n. 01, p. 594-620, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8966/2023/73126>.

GASPARIN, F. B.; LIMA, V. O. D.; MICHELETTI, D. H.; BURIN, E. L. K. A influência de políticas públicas para o progresso da geração solar fotovoltaica e diversificação da matriz energética brasileira. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210102>.

GHG PROTOCOL. **Calculation tools and guidance**. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>. Acesso em: 5 jun. 2025.

GLASSON, J.; THERIVEL, R.; CHADWICK, A. **Introduction to Environmental Impact Assessment**. 4. ed. Routledge, 2012.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL - GHG PROTOCOL. **Calculation tools and guidance**. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>. Acesso em: 5 jun. 2025.

GOETZBERGER, A.; HEBLING, C.; SCHOCK, H. W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 40, n. 1, p. 46, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00092-X).

GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C.; MEIRELES, A. J. D. A. **Impactos socioambientais da implantação dos parques de energia eólica no Brasil**. Fortaleza: Edições UFC, 2019. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.observatoriodaenergiaeolica.ufc.br/wp-content/uploads/2019/07/livro_web.pdf.

GOUVEIA, N.; PRADO, R. R. Riscos à saúde em áreas próximas a aterros de resíduos sólidos urbanos. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 44, n. 5, p. 859-866, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-89102010005000029>.

GOVERNO DE ALAGOAS. **Em Portugal, Paulo Dantas confirma projeto de energia solar com a EDP**. 2023. Disponível em: <https://alagoas.al.gov.br/galeria/em-portugal-paulo-dantas-confirma-projeto-de-energia-solar-com-a-edp-1>. Acesso em: 02 set. 2024.

HERNANDEZ, R. R.; EASTER, S. B.; MURPHY-MARISCAL, M. L.; MAESTRE, F. T.; TAVASSOLI, M.; ALLEN, E. B.; BARROWS, C. W.; BELNAP, J.; OCHOA-HUESO, R.; RAVI, S.; ALLEN, M. F. Environmental impacts of utility-scale solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 766–779, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>.

HILLIER, J.; WALTER, C.; MALIN, D.; GARCIA-SUAREZ, T.; MILA-I CANALS, L.; SMITH, P. A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 9, p. 1070–1078, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.03.014>.

HÖLKER, F.; WOLTER, C.; PERKIN, E.K.; TOCKNER, K. Light pollution as a biodiversity threat. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 25, n. 12, p. 681–682, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>.

HOSENUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A.; SELVARAJ, J.; HASANUZZAMAN, M.; MALEK, A. B. M. A.; NAHAR, A. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 284–297, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.046>.

HU, F.; MOU, S.; WEI, S.; QIU, L.; HU, H.; ZHOU, H. Research on the evolution of China's photovoltaic technology innovation network from the perspective of patents. **Energy Strategy Reviews**, v. 51, p. 101309, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101309>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**: Chapter 4: Agriculture, Forestry and Other

Land Use. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Volume 2 – Energy. Chapter 6 – Reference Approach. Hayama, Japan: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Mudança do clima 2023**: Relatório Síntese. Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. 2023. Disponível em: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Summary for Policy Makers**. 2018. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/183748>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Glossary**. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>. Acesso em: 4 jun. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Renewables 2020**: Analysis and Forecasts to 2025. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Solar PV Global Supply Chains, IEA, Paris**, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>. Acesso em: 05 out. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Renewable Capacity Statistics 2021**. Abu Dhabi. 2020. Disponível em: [/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf](https://media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf).

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Renewable Energy and Jobs**: Annual Review 2022. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi and International Labour Organization, Geneva, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2022>.

IOANNIDIS, R.; KOUTSOYIANNIS, D. A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact. **Applied Energy**, v. 276, p. 115367, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115367>.

JIN, Y.; BEHRENS, P.; TUKKER, A.; SCHERER, L. Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109391, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>.

KELLER, E.; CHIN, M.; CHORKULAK, V.; CLIFT, R.; FABER, Y.; LEE, J.; KING, H.; MILÀ-I-CANALS, L.; STABILE, M.; STICKLER, C.; VIART, N. Footprinting farms: a comparison of three GHG calculators. **Greenhouse Gas Measurement and Management**, v. 4, n. 2-4, p. 90-123, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/20430779.2014.984609>.

KOHSAKA, R.; KOHYAMA, S. Contested renewable energy sites due to landscape and socio-ecological barriers: Comparison of wind and solar power installation cases in Japan. **Energy & Environment**, v. 34, n. 7, p. 2619-2641, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0958305X221115070>.

LACERDA, A. V.; BARBOSA, F. M. Fitossociologia da vegetação arbustivo-arbórea em uma área de mata ciliar no semiárido paraibano, Brasil. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 2, p. 34-43, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.35719>.

LIMA FILHO, A. A.; VIEIRA, M. R. S.; SILVESTREIM, E. G.; LOPES, A. B.; SILVESTREIM, F. G. Análise dos riscos ocupacionais em instalações de sistemas fotovoltaicos na cidade de Manaus-AM. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e418101523045-e, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23045>.

LIMA, B. G.; COELHO, M. F. B. Fitossociologia e estrutura de um fragmento florestal da Caatinga, Ceará, Brasil. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 809-819, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509832095>.

LIMA, P. T. D. **Análise dos processos de avaliação de impacto ambiental em usinas fotovoltaicas e o potencial biofísico no Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/24048?locale=pt_BR. Acesso em: 15 jul. 2025.

LIRA, M. A. T.; MELO, M. L. D. S.; RODRIGUES, L. M.; SOUZA, T. R. M. D. Contribuição dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica para a redução de CO₂ no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 389-397, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786343046>.

LOUWEN, A.; VAN SARK, W.; DE MOOR, J. The potential of advanced solar photovoltaic technologies to meet future energy needs. **Renewable Energy**, 168, 689-706. 2021.

LUCENA, M. S.; ALVES, A. R.; BAKKE, I. A. Regeneração natural da vegetação arbóreo-arbustiva de Caatinga em face de duas formas de uso. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos-PB, v. 13, n. 3, p. 212-222, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.30969/acsa.v13i3.887>.

MARISCAL-FLORES, E. J. **Potencial produtivo e alternativas de manejo sustentável de um fragmento de Mata Atlântica secundária, Município de Viçosa, Minas Gerais**. 1993. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 1993. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/d7f7f08d-010e-4201-b6ff-64e544998594>.

MARQUES, F. J.; CABRAL, A. G. A.; DE LIMA, C. R.; DE FRANÇA, P. R. C. Florística e estrutura do componente arbustivo-arbóreo da caatinga nas margens do rio Sucuru em Coxixola, Paraíba: reflexos da antropização. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 20058-20072, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-252>.

MARQUES, R. C.; KRAUTER, S. C. W.; LIMA, L. C. Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. **Revista Tecnologia**, v. 30, n. 2, 2009. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/1049>.

MARTINS, L. Z. R.; FRANCO, M. P. V. Desenvolvimento local a partir da geração centralizada de energia solar fotovoltaica: o modelo regulatório da usina de Pirapora–MG. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 8, n. 3, p. 357-381, 2019. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd/article/view/8805>.

MEDEIROS, F. S.; DE SOUZA, M. P.; CERQUEIRA, C. L.; ALVES, A. R.; DOS SANTOS SOUZA, M.; BORGES, C. H. A. Florística, fitossociologia e modelagem da distribuição diâométrica em um fragmento de Caatinga em São Mamede-PB. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 2, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.30969/acsa.v14i2.900>.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI. **Fator médio - Inventários corporativos**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 20 ago. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 08 out. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. 2024. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes->

unidas.html#:~:text=A%20Conven%C3%A7%C3%A3o%2DQuadro%20das%20Na%C3%A7%C3%B5es,humana%20perigosa%20no%20sistema%20clim%C3%A1tico. Acesso em: 01 out. 2024.

MONZONI, M.; BHATIA, P.; BIDERMAN, R.; FRANSEN, T.; OLIVEIRA, B.; STRUMPF, R.; ROBINSON, K. **Contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa**. Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces), 2008. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/15413>.

MONZONI, M.; OSÓRIO, G.; LEFÈVRE, G. B.; SOUZA, L. C. D.; BASTOS, C. P. **Relatório Anual do Programa Brasileiro GHG Protocol: resultados do ciclo 2023**. Fundação Getúlio Vargas, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/36416>.

MOREIRA JUNIOR, O.; SOUZA, C. C. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha. **Interações**, v. 21, n. 2, p. 379-387, 2020. Disponível em: <https://www.interacoes.ucdb.br/interacoes/article/view/1760>.

MOZILLA FOUNDATION. **JavaScript documentation**. [S.l.]: MDN Web Docs, 2024. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript>.

MÜLLER, K.; OLIVER, M. A.; SIEBE, C. Overview chapter on soil degradation. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, v. 3, p. 165-171, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00270-6>.

NASCIMENTO, A. S. **Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/8153?locale=pt_BR.

NITA, A.; FINERAN, S.; ROZYLOWICZ, L. Researchers' perspective on the main strengths and weaknesses of Environmental Impact Assessment (EIA) procedures. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 92, p. 106690, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106690>.

OGUNDIPE, O. B.; OKWANDU, A. C.; ABDULWAHEED, S. A. Recent advances in solar photovoltaic technologies: Efficiency, materials, and applications. **GSC Advanced Research and Reviews**, v. 20, n. 1, p. 159-175, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.20.1.0259>.

OLIVEIRA, B. A. **Análise crítica do licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas de pequeno porte: estudo de caso no âmbito municipal**. Monografia (Bacharelado) - Universidade Federal Fluminense, 2022. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/24657>.

OLIVEIRA, E. A. F.; ARAÚJO FILHO, J. G. Perspectivas da geração e aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão da literatura (2015-2019). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, p. 435-450, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0035>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Fator de Capacidade de Geração Eólica e Solar**. 2021. Disponível em: https://dados.ons.org.br/dataset/fator-capacidade-2#:~:text=Fator%20de%20capacidade%20de%20usinas,atualizados%20ap%C3%B3s%20a%20sua%20publica%C3%A7%C3%A3o_ Acesso em: 17 set. 2024.

PERAZZOLI, D. L. **Análise do licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas no Brasil: proposta de regulamentação a nível nacional**. Monografia (Especialização) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/18573>. Acesso em: 15 jul. 2025.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 80p., 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

PEREIRA, M. C. R.; CORIA, A. S. Impactos ambientales de sistemas de energía solar fotovoltaica: una revisión de análisis de ciclo de vida y otros estudios. **Revista EIA**, v. 19, n. 38, p. 1-18, 2022. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8552387>.

PEREIRA, T. C. **O desconhecido do pouco conhecido**: padrão espacial de riqueza e lacunas de conhecimento em plantas (Fabales: Fabaceae) na Caatinga. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/4475>.

PESSOA, M. P.; GUERRA, A. M. N. M.; MARACAJÁ, P. B.; DE LIRA, J. F. B.; DINIZ FILHO, E. T. Estudo da cobertura vegetal em ambientes da Caatinga com diferentes formas de manejo no Assentamento Moacir Lucena, Apodi-RN. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 3, p. 40-48, 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/787/399>.

PIMENTEL DA SILVA, G. D.; MAGRINI, A.; TOLMASQUIM, M. T.; BRANCO, D. A. C. Environmental licensing and energy policy regulating utility-scale solar photovoltaic installations in Brazil: status and future perspectives. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 37, n. 6, p. 503-515, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14615517.2019.1595933>.

PINHEIRO, H. H. C.; SILVA, N. F.; BRANCO, D. A. C.; PEREIRA, M. C. Photovoltaic solar systems in multi-headquarter institutions: a technical implementation in northeastern Brazil. **Energies**, v. 13, n. 10, p. 2659, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13102659>.

PORTAL SOLAR. **Ranking das marcas de painéis solares mais vendidas em 2023**. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/confira-o-ranking-das-marcas-de-paineis-solares-mais-vendidas-em-2023>. Acesso em: 24 set. 2024.

PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL – PBGHG PROTOCOL. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa: Futura I** (ano inventariado: 2023).

Disponível em: <blob:https://registropublicodeemissoes.fgv.br/c622e2c1-ae61-4092-a1b7-f978046d77bc>. Acesso em: 04 nov. 2024.

QUEIROZ, L. P. **Leguminosas da Caatinga**. Universidade Estadual de Feira de Santana, 467 p. 2009. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=13dRQwAACAAJ>.

RAIMUNDO, D. R.; SANTOS, I. D. Estudo de um projeto para geração de energia eólica no Brasil: viabilidade econômica e emissões evitadas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 1, p. 65-75, 2015. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/44156/26718>.

RANGANATHAN, J.; CORBIER, L.; BHATIA, P.; SCHMITZ, S.; GAGE, P.; OREN, K. **The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard**. The Greenhouse Gas Protocol. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258261856_The_Greenhouse_Gas_Protocol_a_Corporate_Accounting_and_Reporting_Standard_Revised_Edition.

REIS, D. C. **Análise crítica do processo de licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas**. 2015. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/53873>.

RIO ALTO ENERGIAS RENOVÁVEIS - RAER. **Dados não publicados, disponibilizados exclusivamente para esta pesquisa**. 2024.

RIO ALTO ENERGIAS RENOVÁVEIS – RAER. **Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Solar Santa Luzia**. 2022. Disponível em: <https://sudema.pb.gov.br/eia-riima/EIASANTALUZIAFINAL.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.

ROCHA, H. A.; DE FREITAS, J. R. Impactos da poluição luminosa: os instrumentos legais brasileiros abrangem a conservação biológica? **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 9, p. 196-206, 2022. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/7630>.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JR, J. D. G. **Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/569996>.

SABINO, F. G. S.; CUNHA, M. C. L.; SANTANA, G. M. Estrutura da vegetação em dois fragmentos de Caatinga antropizada na Paraíba. **Revista Florestal e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 487-497, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017315>.

SAINI, S. R.; MEENA, S. L.; MEENA, R. C. Studies of surfactant in photogalvanic cell for solar energy conversion and storage. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 7, n. 2, p. 125-136, 2017. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=74578>.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: conceitos e métodos. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SANQUETTA, C. R.; MAAS, G. C. B.; SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, F. T. I.; DALLA CORTE, A. P. Emissões de dióxido de carbono associadas ao consumo de energia elétrica no Paraná no período 2010-2014. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/biofix.v2i1.50095>.

SANTOS, J. G. A logística reversa como ferramenta para a sustentabilidade: um estudo sobre a importância das cooperativas de reciclagem na gestão dos resíduos sólidos urbanos. **Revista Reuna**, v. 17, n. 2, p. 81-96, 2012. Disponível em: <https://revistas.una.br/reuna/article/view/422>.

SCHULTZ, H. S. **Dimensionamento, emissões de gases de efeito estufa e payback ambiental de um sistema de energia solar fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/21312?locale=pt_BR.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2333709>.

SILVA JÚNIOR, J. C.; SOUZA, F. D.; BARBOZA, M. G.; VICH, D. V.; SALOMON, K. R. Inventário das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em uma companhia de saneamento. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, v. 15, n. 2, p. 530-547, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.75644>.

SILVA, B. A. O. Aproveitamento e potencial da energia solar fotovoltaica no nordeste do Brasil. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 5, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8024927>.

SILVA, D. L. **Estudo de caso: relatos dos processos ambientais ocorridos no complexo fotovoltaico em Malta - PB**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Federal de Campina Grande, 2018. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/25443>.

SILVA, L. S.; COSTA, T. R.; SALOMÃO, N. V.; ALVES, A. R.; SANTOS, T. R.; MACHADO, E. L. M. Mudanças temporais na estrutura vegetacional de um fragmento de Caatinga, sul do Piauí. **Scientia Plena**, v. 16, n. 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.020203>.

SILVA, M.; RAADAL, H. L. Life cycle GHG emissions of renewable and non-renewable electricity generation technologies. **Krakerøy: Ostfold Research**, 2019. Disponível em: https://reinvestproject.eu/wp-content/uploads/2019/11/OR_RE-INVEST_Life-cycle-GHG-emissions-of-renewable-and-non-renewable-electricity.pdf.

SILVA, S. S. F.; ALVES, A. C.; RAMALHO, Â. M. C. Energia eólica e complementaridade energética: estratégia e desafio para o desenvolvimento sustentável na região Nordeste do Brasil. **Qualitas Revista Eletrônica**, v. 19, n. 3, p. 53, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18391/req.v19i3.5640>.

SIZENANDO FILHO, F. A.; MARACAJÁ, P. B.; DINIZ FILHO, E. T.; FREITAS, R. A. C. Estudo florístico e fitossociológico da flora herbácea do município de Messias Targino, RN/PB. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 2, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237035787_Estudo_floristico_e_fitossociologico_da_flora_herbacea_do_municipio_de_Messias_Targino_RNPB.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 276p., 2006.

SOUZA, M. R.; FERREIRA, M. B.; SOUSA, G. G.; ALVES, A. R.; HOLANDA, A. C. Caracterização florística e fitossociológica do componente lenhoso de um fragmento florestal de Caatinga em Serra do Mel, Rio Grande do Norte, Brasil. **Nativa**, v. 8, n. 3, p. 329-335, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i3.9136>.

SRINIVASAN, S. Segmentation of the Indian photovoltaic market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, n. 2, p. 215-227, 2005. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v9y2005i2p215-227.html>.

STUDENT. The probable error of a mean. **Biometrika**, v. 6, n. 1, p. 1–25, 1908. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2331554>.

SUN, X.; KHAN, M. R.; DELINE, C.; ALAM, M. A. Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. **Applied energy**, v. 212, p. 1601-1610, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>.

TAWALBEH, M.; AL-OTHMAN, A.; KAFIAH, F.; ABDELSALAM, E.; ALMOMANI, F.; ALKASRAWI, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. **Science of the Total Environment**, v. 759, p. 143528, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.

TOLEDO, L. M. et al. **Grandes empreendimentos e impactos sobre a saúde: análise e monitoramento das condições de vida e de processos endêmico-epidêmicos**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2018. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://fiocruz.br/sites/fiocruz.br/files/documentos/05_grandes_empreendimentos.pdf.

TURNEY, D.; FTHENAKIS, V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3261–3270, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME – UNDP. **ODS em ação**. 2024. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 01 out. 2024.

VANDERGAST, A. G.; INMAN, R. D.; BARR, K. R.; NUSSEAR, K. E.; ESQUE, T. C.; HATHAWAY, S. A.; WOOD, D. A.; MEDICA, P. A.; BREINHOLT, J. W.; STEPHEN, C. L.; GOTTSCHO, A. D.; MARKS, S. B.; JENNINGS, W. B.; FISHER, R. N. Evolutionary hotspots in the Mojave Desert. **Diversity**, v. 5, n. 2, p. 293-319, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/d5020293>.

W3C. **CSS Snapshot 2023**. W3C Working Group Note, 2023. Disponível em: <https://www.w3.org/TR/css-2023/>.

W3C. **HTML5 – A vocabulary and APIs for HTML and XHTML**. W3C Recommendation, 2014. Disponível em: <https://www.w3.org/TR/html5/>.

WANG, Z.; FAN, W. Economic and environmental impacts of photovoltaic power with the declining subsidy rate in China. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, p. 106535, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106535>.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, v. 1, n. 6, p. 80–83, 1945. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/3001968>.

WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL – WRI BRASIL. **6 conclusões do relatório do IPCC de 2022 sobre mitigação das mudanças climáticas**. 2022. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/6-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-de-2022-sobre-mitigacao-das-mudancas-climaticas>. Acesso em: 07 out. 2024.

WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL – WRI BRASIL. **GHG Protocol**. 2024. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/projetos/ghg-protocol>. Acesso em: 07 out. 2024.

WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL - WRI BRASIL. **Metodologia do GHG Protocol da agricultura**. São Paulo: Unicamp, 2015. 59 p. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/Metodologia.pdf. Acesso em 25 abr 2023.

ZHANG, H.; YU, Z.; ZHU, C.; YANG, R.; YAN, B.; JIANG, G. Green or not? Environmental challenges from photovoltaic technology. **Environmental Pollution**, v. 320, p. 121066, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121066>.