

FERNANDO STEFANUTTI

CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO DOS IMPACTOS  
AMBIENTAIS ASSOCIADOS A PROJETOS DE GERAÇÃO  
DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Elétrica Ênfase  
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Marcelo Montaño

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S816c Stefanutti, Fernando  
Contribuições para o estudo dos impactos  
ambientais associados a projetos de geração de energia  
solar fotovoltaica no Brasil / Fernando Stefanutti;  
orientador Marcelo Montaño. São Carlos, 2021.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2021.

1. Impacto ambiental. 2. Geração de energia. 3.  
Licenciamento ambiental. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Fernando Stefanutti

Título: “Contribuições para o estudo dos impactos ambientais associados a projetos de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 08 / 07 / 2021,

com NOTA 10,0 ( Dez ), pela Comissão Julgadora:

**Prof. Dr. Marcelo Montaño - Orientador - SHS/EESC/USP**

**Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - SEL/EESC/USP**

**Mestre Dante José de Oliveira e Peixoto - Doutorando/Eng.  
Ambiental - EESC/USP**

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino**

## **DEDICATÓRIA**

Agradeço a USP por proporcionar minha formação de engenharia. Ressalto a importância dos professores e funcionários das instituições de ensino da USP de São Carlos pelo apoio em minha graduação;

Agradeço à minha família pelo suporte e incentivo para desenvolver meus estudos acadêmicos;

Agradeço a toda equipe de fórmula SAE que me proporcionou crescimento profissional, convívio em equipe e formação de amizades.

Agradeço ao meu orientador prof. Marcelo pela orientação e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho;

E agradeço aos amigos conquistados nessa jornada que contribuíram para esse momento especial.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>8</b>
<b>2. CENÁRIO BRASILEIRO DA GERAÇÃO DE ENERGIA .....</b>	<b>10</b>
<b>2 .1 Geração de energia e a regulação do mercado brasileiro.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Energia Solar .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Outras Fontes de Energia.....</b>	<b>17</b>
<b>3. ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Estudo de impacto ambiental.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Impactos ambientais associados a empreendimentos de energia hídrica e fotovoltaica .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.1 Alterações na qualidade aquática e na biota aquática.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.2 Poluição e incômodos à população decorrentes dos canteiros de obra, áreas de apoio e caminhos de serviço .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.3 Perda de cobertura vegetal.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.4 Impactos sobre a fauna terrestre .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.5 Desapropriação e reassentamento.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.6 Impactos na infraestrutura viária e no tráfego .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.7 Perda de ecossistemas naturais .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Impactos ambientais associados a empreendimentos de geração eólica e fotovoltaica .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.1 Impactos sobre a fauna aviária .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.2 Interferência na estabilidade dos solos em razão da movimentação de terra .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.3 Alteração na recarga de aquífero pelo aumento do escoamento superficial ocasionado pela supressão de vegetação .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.4 Geração de tensão populacional .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.5 A operação do empreendimento na região agregará uma nova forma de uso do solo .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.6 Geração de resíduos sólidos .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.7 Aumento da arrecadação de impostos.....</b>	<b>32</b>
<b>3.4 Impactos ambientais associados a empreendimento de geração de energia a biomassa e fotovoltaica .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4.1 Área ocupada .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4.2 Geração de poluentes .....</b>	<b>33</b>

<b>3.4.3 Emissão de CO<sup>2</sup> em ciclo de vida/kWh.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.4 Onda de calor .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.5 Riscos à saúde pública.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.6 Impacto no valor da terra .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.7 Uso da água .....</b>	<b>35</b>
<b>3.5 Impactos ambientais associados a usinas termelétricas e fotovoltaicas ....</b>	<b>35</b>
<b>3.5.1 Interferências em áreas protegidas.....</b>	<b>36</b>
<b>3.5.2 Interferências em atividades econômicas e equipamentos sociais .....</b>	<b>36</b>
<b>3.5.3 Risco de disseminação de doenças devido ao desmatamento.....</b>	<b>37</b>
<b>3.5.4 Desmobilização de mão de obra .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5.5 Prejuízo a saúde .....</b>	<b>38</b>
<b>3.5.6 Risco de contaminação dos solos.....</b>	<b>38</b>
<b>3.6 Diagrama de impactos .....</b>	<b>38</b>
<b>3.7 Impactos ambientais emergentes, associados a empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica .....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.1 Alterações na paisagem e no uso do solo .....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.2 Impactos relacionados ao ciclo de vida do projeto .....</b>	<b>42</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSAO.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 Principais fatores para análise do sistema FV .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.1 Análise do ciclo de vida.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2 Localização do empreendimento .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.3 Análise da relação de performance.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2 A flexibilidade locacional como recurso de mitigação.....</b>	<b>48</b>
<b>4.3 Diagrama de impactos de UFV.....</b>	<b>49</b>
<b>5. POTENCIAL DE MITIGAÇÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ACL - Ambiente de contratação livre

ACR - Ambiente de contratação regulada

ANEEL - Agência nacional de energia elétrica

CCEE - Câmara de comercialização de energia elétrica

CONAMA - Conselho nacional do meio ambiente

EPE - Empresa de pesquisa energética

EIA - Estudo de impacto ambiental

FV - Fotovoltaico

GEE - Gases de efeito estufa

IBAMA - Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis

MFV – Módulo fotovoltaico

PLD - Preço de liquidificação das diferenças

RAP - Relatório ambiental preliminar

RAS - Relatório ambiental simplificado

RIMA - Relatório de impacto ambiental

UEL - Usina eólica

UHE - Usina hidrelétrica

UFV - Usina fotovoltaica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição da matriz elétrica brasileira.....	13
Figura 2 - Vista de um sistema fotovoltaico em operação .....	14
Figura 3 - Mapa de incidência solar no território brasileiro.....	16
Figura 4 - Vista de uma unidade de geração de energia heliotérmica .....	18
Figura 5 - Diagrama de potenciais impactos de usinas a biomassa.....	39
Figura 6 - Diagrama de potenciais impactos de UEL .....	40
Figura 7 - Diagrama de potenciais impactos de UHE.....	40
Figura 8 - Diagrama de potenciais impactos de UFV .....	49

## RESUMO

A produção de energia é a principal fonte de emissão de gás carbônico no meio ambiente sendo primordial estudar os impactos da geração de energia afim de mitigar o aquecimento global. A análise de impacto ambiental busca identificar e propor métodos para mitigação dos impactos de empreendimentos sobre o meio ambiente. A avaliação de impacto pode ser realizada através de estudos de impacto ambiental (EIA). Os critérios abordados por esses estudos são escolhidos de acordo com o tipo de empreendimento analisado. Os critérios para de impacto ambiental de plantas de geração de energia elétrica são diversos, abrangendo monitoramento do meio socioeconômico, da fauna e flora local, emissão de gases, ruídos entre outros. Esses dois últimos fatores são quantitativos sendo o monitoramento desses fatores amplamente utilizada nas análises de impacto ambiental. A geração de energia solar representa uma parcela reduzida da matriz energética brasileira, entretanto, a projeção futura indica uma expansão acentuada dessa geração para os próximos anos. Usinas de geração de energia fotovoltaica não emitem ruídos, gases de efeito estufa e outros poluentes durante sua operação, portanto, estão associadas a baixo impacto ambiental. Porém, a localização dessas usinas pode comprometer esse benefício ambiental e a análise do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico demonstra que a produção e a reciclagem de módulos fotovoltaicos apresentam impactos ambientais que devem ser levados em consideração no momento da definição dos projetos. Dentre outros impactos identificados, verificou-se que as usinas fotovoltaicas estão associadas à ocupação extensa de áreas, pela remoção da vegetação, reduzindo área fotossintética e áreas de *habitat* da fauna. Espera-se com esse estudo contribuir para o entendimento dos impactos provocados por esta atividade, estimulando que sejam considerados de modo antecipado na elaboração dos projetos.

Palavras-chave: impactos ambientais, geração de energia, licenciamento ambiental

## ABSTRACT

Electricity generation is the main source of carbon emission into the environment. Therefore, is essential to study the electricity generation impacts to mitigate global warming. Environmental impact analysis aims to identify and suggest prevention methods for environmental impacts. The impact analysis is developed through the environmental impact assessment (EIA). The criteria of these studies are chosen according to the type of enterprise in analysis. Criteria of environmental analysis of power plant generation are vast, some of which are monitoring of the socioeconomic environment, fauna and flora, gases and noise emission. These two can be quantified and are widely used in environmental impact analysis. Solar energy generation is a small part of Brazilian electricity generation. The future perspective is a sharp increase of this generation. Solar photovoltaic power plants don't emit noises or greenhouse gases in the operation phase. Therefore, are seen as environmental friendly. The location of these plants can compromise these benefits and the life cycle analysis reveals that the manufacturing and recycling of photovoltaic panels have effects on the environment, which should be considered on the project. The solar photovoltaic power plant is related to impacts regarding the land use and vegetal suppression, which reduces the habitat area. This study aims to comprehend the environmental impacts of solar photovoltaic power plants, and incentivize the assessment of impacts on development of projects.

Key words: EIA/EIS, electricity generation, environmental licence.

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade é consumidora e dependente direta e indiretamente de energia elétrica, tanto para fabricação de bens de consumo, para sistemas de aquecimento, iluminação, telefonia, conforto térmico, transporte, movimentação de máquinas entre outras demandas.

A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica causam impactos ambientais diversos, que necessitam de um amplo entendimento para a tomada de decisões em projetos e proposição de medidas mitigadoras para sua implantação e operação.

As fontes de energia renovável surgem como medida para mitigar o aquecimento global, as fontes de geração de energia fóssil emitem GEE (gases de efeito estufa) e outros poluentes durante a queima do material combustível. A geração de energia solar e eólica são vistas como tecnologia verde, pois não emitem GEE (SILVA et al, 2020).

Entende-se por impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas (CONAMA, 1997). A elaboração de estudos de impacto ambiental busca identificar e propor medidas mitigatórias para essas alterações. A produção de energia é a principal fonte de emissão de gás carbônico no meio ambiente (LOMBARDI et al, 2003).

O impacto ambiental está atrelado ao tipo de empreendimento analisado. A matriz energética brasileira, predominantemente hídrica, apresenta impactos relacionados a: alagamento de áreas para represamento de água; supressão de vegetação, interferência na fauna e flora de áreas próximas às fontes geradoras (PETRIE, 2014); e emissão de poluentes. Sendo esta última associada principalmente a plantas de geração termelétrica.

A geração eólica apresentou uma expansão abrupta nos últimos anos. Entretanto, como aponta Camargo (2019), os estudos de impactos ambientais desenvolvidos para as plantas construídas no Brasil, não acompanham tal evolução, e apresentam lacunas nas informações importantes e necessárias para caracterização da vulnerabilidade do meio afetado.

O plano nacional de energia 2050 (EPE, 2020) prevê a geração solar com até 91 GW de potência instalada em 2050, correspondendo à até 16% da matriz elétrica brasileira. Frente à previsão de expansão da geração solar no Brasil é essencial buscar diretrizes para a adequada ampliação dessa fonte.

Para atender à crescente demanda de energia, o estudo dos impactos ambientais é uma premissa a ser desenvolvida para garantir a sustentabilidade dos investimentos na geração de energia elétrica e para o licenciamento das atividades.

## **1.2 OBJETIVOS**

Apresentar uma síntese dos impactos ambientais relevantes associados a projetos de geração de energia fotovoltaica.

## **1.3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico de estudos de impactos ambientais em projetos, implantação e operação de sistemas de geração de energia elétrica solar ou fotovoltaica, bem como ao licenciamento de projetos de geração de energia renovável. Para Gil (2008) a pesquisa bibliográfica oportuniza ao pesquisador estudar um conjunto de fenômenos de forma mais abrangente do que se fosse uma pesquisa em fontes diretas.

De posse do conteúdo, foi discutido o processo de avaliação de impactos ambientais e licenciamento para a matriz fotovoltaica.

A fim de identificar os potenciais impactos da geração de energia, primeiro, foi discutido os impactos associados às fontes de energia renovável (hidrelétricas, eólicas e a biomassa) e comparados com a tecnologia fotovoltaica. Posteriormente, foram estudados os impactos associados às usinas termelétricas. Essa comparação permite identificar os principais impactos associados à geração de energia no Brasil, pois essas fontes de energia possuem grande representatividade na matriz elétrica brasileira.

Após essa análise, foram discutidos os potenciais impactos identificados na literatura essenciais para a elaboração de estudos de impacto ambiental na geração de energia fotovoltaica para o cenário brasileiro.

Objetiva-se neste estudo relacionar os impactos associados à geração de energia solar fotovoltaica para orientar a elaboração de estudos de impacto ambiental para esse tipo de empreendimento. Para tal, este trabalho está dividido da seguinte maneira: No capítulo dois foi apresentado o contexto brasileiro de geração de energia e a energia solar.

No capítulo três foi elucidado o estudo de impacto ambiental e o licenciamento ambiental no Brasil permitindo relacionar os impactos mais considerados no cenário brasileiro para a elaboração desses estudos para a geração de energia renovável, de acordo com a literatura.

No capítulo quatro foram discutidos os principais fatores de impactos ambientais da geração de energia fotovoltaica e relacionadas as características dessa tecnologia com as especificidades do setor elétrico brasileiro.

No capítulo cinco foi proposto métodos para mitigação e prevenção dos impactos identificados no estudo, sugerindo a escolha de localização e a associação de diferentes tecnologias como fatores essenciais para o desenvolvimento de projetos com menor potencial de impacto.

No capítulo seis foi apresentado a conclusão desse estudo e sugestão de estudos futuros.

## 2. CENÁRIO BRASILEIRO DA GERAÇÃO DE ENERGIA

### 2.1 Geração de energia e a regulação do mercado brasileiro

O mercado de energia brasileiro é dividido em Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL). Este último também denominado Mercado Livre de Energia. As unidades consumidoras com demanda contratada igual ou superior a 500 kW podem aderir ao ACL e comprar energia de um agente gerador. No ACR toda energia é comercializada através das concessionárias de energia e as tarifas de energia desse mercado são reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A geração de energia no ACR é compreendida pela geração distribuída e pelos leilões de energia regulados pela ANEEL. Os leilões de foram estabelecidos pela ANEEL em 2004, e são utilizados para incentivar determinado tipo de fonte de energia, visto que o edital especifica a fonte a ser contratada. O governo brasileiro parece incentivar a geração de energia solar ao estabelecer novos leilões para esse tipo de energia, desde 2014 (SILVA et al, 2019).

A fonte de energia escolhida para os leilões considera diversos fatores segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que realiza pesquisas para identificar qual região apresentará aumento de consumo no médio e longo prazo. O Ministério das Minas e Energia define quais são as metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub> na matriz e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) procura entender qual o tipo de fonte mais adequada para manter a segurança energética do sistema.

A geração distribuída, estabelecida pela Resolução Normativa ANEEL 482°, compreende projetos de geração de energia de até 5 MW de potência instalada que suprem a demanda energética de unidades consumidoras do ACR através do sistema de compensação de energia. Essa modalidade de geração é

limitada geograficamente, pois, a unidade consumidora e a geradora precisam estar localizadas na área de concessão de uma distribuidora de energia (ANEEL, 2012).

A geração distribuída não é abordada neste trabalho, visto que as plantas são de menor porte e muitas vezes os módulos fotovoltaicos são instalados em telhados e coberturas de prédios, não apresentando impactos sobre o uso do solo e sobre a manufatura das estruturas.

Vale ressaltar que o termo usina de geração de energia pode ser utilizado para qualquer empreendimento de produção de energia elétrica. Neste estudo, o termo usina compreende empreendimentos que necessitam de outorga para operação, portanto, sistemas de geração do mercado livre de energia e participantes de leilões da ANEEL.

A energia comercializada no ACL é classificada em incentivada ou convencional. De acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 77, para usinas com homologação posterior à 2012, a energia incentivada é produzida por usinas de fonte: (i) eólica, fotovoltaica, biomassa e cogeração qualificada com potência injetada inferior a 300 MW; e (ii) hidráulica com potência injetada inferior a 30 MW.

A comercialização desse tipo de energia no ACL possui desconto na Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifa do Uso do Sistema de Transmissão (TUST) de 50%, 80% e 100%, de acordo com o tipo de fonte e da data de entrada em operação comercial, sendo esse desconto concedido pela ANEEL, via ato autorizativo.

A CCEE realiza a medição contábil de todos os agentes do setor elétrico. Essa contabilização horária define o Preço de Liquidificação das Diferenças (PLD) de acordo com a relação de carga e geração para cada submercado. Se o consumo do respectivo submercado é superior ao montante gerado a valoração do PLD tende a ser maior.

O Sistema Integrado Nacional é dividido em 4 submercados: Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul. O PLD tende a ser menor no Nordeste, pois este apresenta montante de geração superior ao consumo. No

Sudeste/Centro-Oeste ocorre o oposto, pois este contém os maiores consumidores. Vale ressaltar que a venda de energia pode ocorrer entre agentes de regiões diferentes, entretanto, o montante de energia transferido entre os submercados é faturado através do PLD. Essa relação implica em preços melhores para a geração de energia próximo aos centros de consumo.

Essa especificação corresponde ao limite físico do sistema. O transporte da energia de uma região para outra apresenta perdas resistivas ao percorrer grandes distâncias. Além desse fator a rede de transmissão também limita a localização de novos empreendimentos, pois a região com maior concentração de consumo apresenta uma rede mais robusta, portanto, tende a ser mais preparada para receber novas plantas de geração de energia.

O Operador Nacional do Sistema é a empresa responsável pela concessão de outorgas e despacho de usinas. O despacho de usinas é a ordem para iniciar ou pausar a geração de energia. O despacho de usinas hidrelétricas ocorre de acordo com o regime de chuvas a fim de preservar ou utilizar o montante de água dos reservatórios. As usinas termelétricas são despachadas para compensar aumentos abruptos de consumo, visto que são mais flexíveis para iniciar ou pausar a geração de energia.

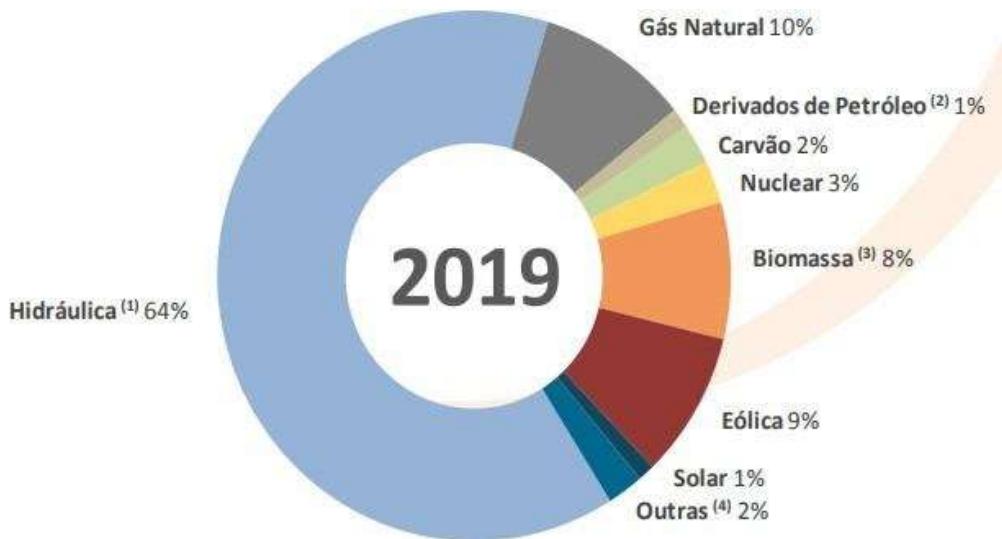
As usinas térmicas possuem papel importante para manter a segurança energética do sistema. Caso ocorra desequilíbrio entre geração e consumo de energia o Sistema Integrado Nacional pode entrar em colapso. A expansão da geração eólica e solar apresenta dependência desta geração por serem fontes de geração inconstantes, não sendo possível prever a energia instantânea injetada por essas fontes de energia.

## 2.2 Energia Solar

A energia solar representa apenas 1% da matriz elétrica brasileira, entretanto, a projeção para 2050 é atingir até 16% (EPE,2020). O desenvolvimento das tecnologias de módulos fotovoltaicos (MFV) e a tendência

global de geração de energia renovável proporcionam a expansão desse setor. A Figura 1 apresenta a composição da matriz elétrica brasileira.

*Figura 1 - Composição da matriz elétrica brasileira*



Fonte: EPE (2020).

O sistema fotovoltaico (FV) é composto por 4 principais componentes:

1. Os módulos fotovoltaicos (MFV) são compostos por células fotovoltaicas responsáveis por captar a luz solar e transformá-la em corrente elétrica;
2. Os inversores são capazes de transformar a energia elétrica produzida pelos módulos FV a fim de tornar compatível aos parâmetros da rede de distribuição;
3. Infraestrutura elétrica compreende todos os cabos e outros equipamentos, que conectam fisicamente os componentes do sistema e a rede de forma adequada; e
4. Estrutura de fixação do sistema, sendo esta responsável pela fixação dos módulos ao solo ou telhado;

A Figura 2 exemplifica o sistema FV instalado em solo. É possível verificar que o terreno de instalação é alterado para receber a instalação dos MFV.

Vale ressaltar que a extensa área requerida para instalação de usinas fotovoltaicas (UFV) inviabiliza a instalação em telhados ou coberturas de prédios, sendo possível a utilização de estrutura fixa ou *tracker* para instalações em solo.

*Figura 2 - Vista de um sistema fotovoltaico em operação*



Fonte: Autor (2019).

O sistema *tracker* permite aumentar a capacidade de geração de um módulo fotovoltaico (MFV) ao rastrear a melhor inclinação deste ao longo do dia. Esse sistema possui um ou dois eixos de rotação e um motor que controla esse movimento. Essa tecnologia possui um custo de instalação elevado e exige manutenção do sistema mais frequentemente. Esse modelo de estrutura não possui fabricante no país, portanto, a troca de um motor ou eixo requer a importação individual do equipamento tornando o processo de manutenção complexo e custoso.

As tecnologias de células fotovoltaicas são diversas. Os modelos de silício policristalino e monocristalino são mais utilizados comercialmente devido à eficiência, relação custo-benefício e capacidade de produção. A manufatura de modelos policristalino apresenta um desperdício inferior à fabricação de monocristalinos, entretanto os módulos monocristalinos possuem uma eficiência de geração superior.

Vale ressaltar que os módulos policristalinos possuem uma relação de custo-benefício melhor, entretanto, no último trimestre de 2020, os módulos monocristalinos representavam 56% do total comercializado no Brasil (GREENER, 2021). A produção mais eficiente de energia é o fator primordial para entender esse perfil de demanda, essa característica está vinculada ao mercado de GD, visto que a instalação é realizada nos telhados das unidades consumidoras, e, possuem espaço reduzido para instalação.

Dentre os componentes do sistema fotovoltaico, o módulo fotovoltaico é o principal agente transformador do meio, visto que ocupa a maior parte do empreendimento. Diferente dos equipamentos elétricos e eletrônicos, sua constituição, principalmente composto de silício com revestimento de alumínio (WORLD BANK GROUP, 2015), apresenta materiais com potencial incerto de reciclagem, visto que a reciclagem desse material sempre foi desprezada (MAHMOUDI, 2019).

O tempo estimado de vida útil de uma usina fotovoltaica é de pelo menos 25 anos (PASICKO, 2012). Os módulos fotovoltaicos possuem uma vida útil de 25 a 30 anos e os inversores possuem vida útil superior há 10 anos (NREL, 2018). A reposição dos inversores é planejada na manutenção da usina, conservando assim, a eficiência do sistema.

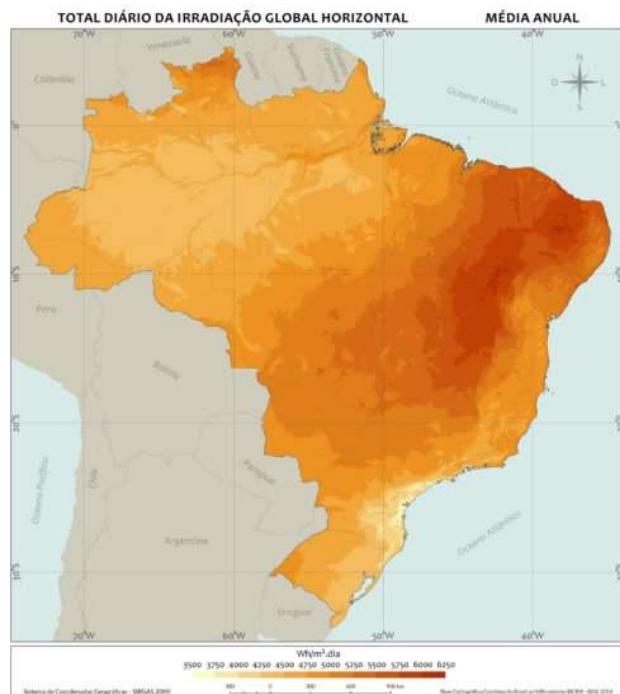
A geração de energia solar é diretamente proporcional à irradiância solar global, sendo este índice o total de irradiação recebida por uma superfície horizontal (PASICKO, 2012). O sombreamento ocasionado por nuvens é o maior responsável por variar a performance deste índice diariamente. O valor médio anual do irradiância solar global é característico da posição geográfica, regiões próximas à linha do Equador e apresentam índices superiores.

As regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste apresentam os maiores rendimentos anuais para usinas fotovoltaicas centralizadas. Parte dos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul apresentam índices de irradiação média excelentes nos meses de verão e, portanto, pode-se esperar que usinas de grande porte também venham a ser instaladas nessas regiões. Três fatores contribuem para esse cenário: a distância reduzida dos centros de consumo; grande concentração de cargas conectadas ao SIN próximo à essas

regiões; e maior disponibilidade de pontos de conexão à rede sem necessidade de novas linhas de transmissão (INPE, 2017).

A Figura 3 apresenta o mapa de incidência solar no território brasileiro, sendo possível identificar as regiões de maior potencial de geração solar.

*Figura 3 - Mapa de incidência solar no território brasileiro*



Fonte: INPE (2017).

A relação de performance de uma planta fotovoltaica é assimilada como a qualidade do sistema. Essa relação indica a razão entre o montante de energia gerada a partir do total de energia luminosa incidente no plano horizontal, desprezadas as perdas das células fotovoltaicas (SMA, 2016).

A mensuração da qualidade do sistema possibilita identificar se o empreendimento apresenta condições razoáveis de instalação. Um rendimento reduzido de uma usina pode ocorrer em decorrência de: mal dimensionamento do projeto, utilização de equipamentos de qualidade inferior, ou instalação inadequada.

## 2.3 Outras Fontes de Energia

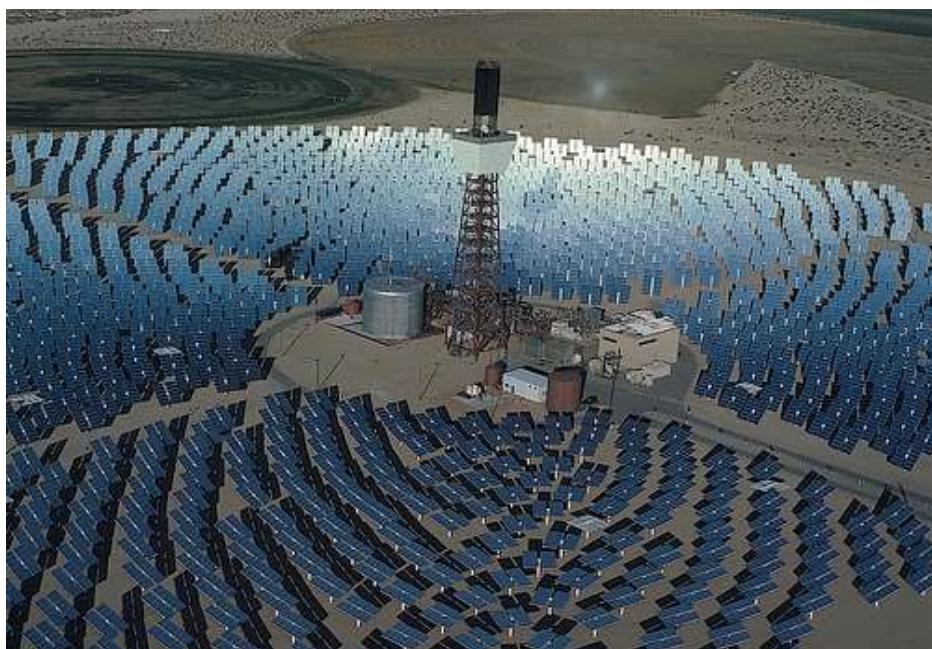
A matriz elétrica brasileira tem predominância das fontes renováveis de energia, as hidroelétricas representam 64% do total, as eólicas 9% e as usinas a biomassa 8%. As usinas termelétricas são parte fundamental do sistema por apresentaram maior previsibilidade de geração (LI, 2020), estas são constituídas pelas usinas a gás natural, derivados do petróleo e a carvão, representando 10%, 1% e 2% da matriz elétrica, respectivamente (EPE, 2020).

Existem três métodos principais de aproveitamento da energia solar. O primeiro é com a tecnologia fotovoltaica, que transforma a energia luminosa em corrente elétrica; o segundo é o aquecimento de água para utilização doméstica ou industrial, sendo comum a instalação de dutos para aquecimento em telhados ou coberturas de prédios ou barracões; e o terceiro é a geração heliotérmica que produz energia elétrica a partir da incidência solar (INPE, 2017).

A geração de energia heliotérmica difere do sistema fotovoltaico, pois a captação de luz solar ocorre através de espelhamento e concentração da luz solar para aquecimento de vapor e movimentação mecânica de uma turbina. Esse tipo de geração é classificado como cogeração, pois parte da energia mecânica pode ser utilizada sem a necessidade de geração de energia elétrica, evitando perdas de transformação. A Figura 4 apresenta um modelo de usina héliotermica para exemplificação.

Embora mais eficiente, a geração de energia por usinas héliotermicas ao concentrar a luz solar pode provocar a morte de pássaros por combustão espontânea. A usina Ivanpah Solar Plant instalada no Deserto de Mojave, na Califórnia, ocupa uma área de 12,9 quilômetros quadrados com potência instalada de 392 MW (INPE, 2017). Essa planta é apontada como responsável pela morte acidental de mais de 6 mil pássaros anualmente. O impacto no bioma não se restringe aos pássaros, afetando também seres terrestres que habitam a região (HRALA, 2016).

*Figura 4 - Vista de uma unidade de geração de energia heliotérmica*



Fonte: CHESF (2016)

A geração de energia por usinas fotovoltaicas (UFV) e usinas eólicas (UEL) é identificada como tecnologia verde. Entretanto, UEL instaladas no Brasil estão enfrentando adversidades devido aos impactos em comunidades locais (SILVA et al, 2020). As usinas eólicas também afetam o meio biológico, visto que podem ocasionar a morte de pássaros devido à colisão com as hélices do aerogerador.

No Brasil o potencial de geração eólica e solar é acentuado na região Nordeste, a qual apresenta uma grande incidência solar, favorável para a geração FV, e apresenta a convergência dos ventos alísios, favorável para a geração eólica.

A política de incentivo às energias renováveis, o excelente potencial de geração e o avanço da tecnologia de geradores fotovoltaicos e aerogeradores promoveram uma oportunidade de crescimento acentuado da geração dessas fontes de energia.

### **3. ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

Este capítulo trata do licenciamento ambiental e dos potenciais impactos ambientais de empreendimentos de geração de energia.

Na busca por impactos associados a empreendimentos FV, inicialmente, explora-se a elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) para o licenciamento ambiental. O IBAMA ou seu representante estadual apontará o termo de referência para o desenvolvimento do estudo.

Os impactos relacionados a empreendimentos de fontes renováveis de energia e os impactos associados a usinas termelétricas são considerados para empreendimentos FV. Essa comparação busca entender se os impactos são similares para a tecnologia FV, bem como classificar os impactos e buscar uma forma de mitigação. contemplados

Posteriormente, são relacionados os impactos associados a fontes de geração de energia solar na literatura. Vale ressaltar que os estudos sobre esse tipo de geração no Brasil são escassos, visto que essa tecnologia está mais difundida no exterior.

#### **3.1. Estudo de impacto ambiental**

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988).

Nesse pressuposto, o estado tem a responsabilidade de zelar pela preservação do meio ambiente e por tal atribuição tornou obrigatório o desenvolvimento de estudos de impactos ambientais para determinados empreendimentos (CONAMA, 1986).

O processo de licenciamento ambiental é submetido ao órgão competente. A localização e dimensão dos impactos do empreendimento determinam se o órgão ambiental competente será Federal, estadual ou municipal. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) é responsável pela administração federal e apresenta diretrizes para os órgãos regionais. A primeira diretriz, estabelecida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) firmou a obrigatoriedade de elaboração de estudo de impacto ambiental (EIA) para instalação de usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária, acima de 10MW (CONAMA, 1986).

De acordo com a resolução N° 001 do CONAMA (1986) o EIA desenvolve no mínimo as seguintes atividades técnicas:

- I - Diagnóstico ambiental da área de influência, contemplando o meio físico, biológico e socioeconômico;
- II - Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas;
- III - Definição das medidas mitigadoras dos impactos negativos; e
- IV - Elaboração do programa de acompanhamento e monitoramento;

O Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) é complementar ao EIA refletindo as análises desenvolvidas, sendo sintetizado e disponibilizado as conclusões obtidas no estudo e contendo no mínimo (CONAMA,1986):

- I - Os objetivos e justificativas do projeto;
- II - A descrição do projeto e suas alternativas tecnológicas e locacionais;
- III - A síntese dos resultados dos estudos de diagnósticos ambiental da área de influência do projeto;
- IV - A descrição dos prováveis impactos ambientais da implantação e operação da atividade;
- V - A caracterização da qualidade ambiental futura da área de influência;
- VI - A descrição do efeito esperado das medidas mitigadoras previstas em relação aos impactos negativos;

VII - O programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos; e

VIII - Recomendação quanto à alternativa mais favorável;

Vale ressaltar que o processo de licenciamento é dividido em três etapas: licença prévia (LP), licença de instalação (LI) e licença de operação (LO). Essas licenças devem ser expedidas pelo mesmo órgão responsável. O EIA e o RIMA são requisitados para o LP.

A crise energética de 2001 impulsionou uma expansão do setor elétrico, nesse contexto a resolução N° 279 do CONAMA (2001) estabeleceu novas diretrizes para o licenciamento ambiental, elucidando a regulamentação específica para projetos de energia renováveis. Essa resolução firmou o procedimento simplificado para o licenciamento ambiental, com prazo máximo de 60 dias para empreendimentos com impacto ambiental de pequeno porte (CONAMA, 2001).

O procedimento simplificado requer para licenciamento prévio o relatório ambiental simplificado (RAS). O anexo A da resolução N° 279 do CONAMA (2001) explicita que o conteúdo mínimo desse relatório contém:

A- Descrição do Projeto

B- Diagnóstico e Prognóstico Ambiental

C- Medidas Mitigadoras e Compensatórias

Não está descrito especificamente quais critérios devem ser abordados neste estudo e não é discriminado a forma que os diversos tipos de empreendimentos devem ser enquadrados nesse processo. Tão pouco foi tratado do descomissionamento do empreendimento.

A exigência de licenciamento ambiental é específica para cada órgão estadual. As diretrizes de cada estado podem restringir ou ampliar a análise de impacto ambiental para determinada atividade. Para usinas fotovoltaicas os critérios mais utilizados são potência instalada e área ocupada pelo empreendimento (SILVA et al, 2019). Normativas mais atualizadas e simplificadas foram estabelecidas por estados e municípios (EPE, 2021). De

acordo com os critérios de cada estado as exigências de licenciamento podem ser:

- Dispensa do licenciamento;
- Autodeclaração descritiva;
- Elaboração de licenciamento simplificado; e
- Elaboração de licenciamento completo;

Esses dois últimos contemplam as três etapas do licenciamento: licença prévia, licença de instalação e licença de operação, diferente da autodeclaração descritiva que requer apenas o preenchimento de formulários para reconhecimento dos órgãos competentes.

As secretarias dos estados, a fim de impulsionar a implementação de usinas de fontes renováveis de energia, implementaram algumas resoluções, dentre as quais é válido destacar:

- Resolução Nº 4420/2015 do CEPRAM, classifica empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica como pequeno potencial poluidor (Classe 1), dispensando a necessidade de licenciamento ambiental;
- Resolução Nº 3/2016 do COEMA, exige estudo de impacto simplificado para usinas fotovoltaicas de potência entre 3 e 5 MW;
- Resolução SMA Nº 74/2017, dispensa a necessidade de licenciamento para usinas fotovoltaicas de potência instalada igual ou inferior à 5MW, sendo exigida autorização para supressão de vegetação nativa ou para instalação em áreas de proteção de manancial, se necessária; e
- Resolução Nº 10/2017 do CONAM, dispensa a necessidade de licenciamento para usinas fotovoltaicas para qualquer potência instalada, exceto quando ocorre supressão vegetal;

O processo de licenciamento simplificado foi criado com a finalidade de agilizar o procedimento para empreendimentos de menor potencial poluidor. O prazo de 60 dias frente ao prazo de 6 meses para o licenciamento completo, além da redução do detalhamento do estudo de impacto ambiental cumprem

esse objetivo. As nomenclaturas de estudos de impactos ambientais adotadas pelos estados são distintas, entretanto, pode-se sintetizar:

- EIA: Estudo de impacto ambiental, desenvolvido para analisar os impactos de empreendimentos de maior impacto.
- RIMA: Relatório de impacto ambiental, é a formalização de EIA em formato de documento para envio ao órgão competente.
- EAS: Estudo de impacto simplificado, desenvolvido para empreendimentos com menor potencial de impacto.
- RAS: Relatório de impacto simplificado, o documento contendo as conclusões do EAS.
- RAP: Relatório ambiental preliminar, similar ao RAS é apresentado para licenciamento prévio de um empreendimento.
- RCA: Relatório de controle ambiental, desenvolvido para o licenciamento prévio quando ocorre a dispensa de apresentação de EIA/RIMA
- PCA: Plano de controle ambiental, após aprovação do licenciamento prévio, é exigido o PCA contendo os projetos executivos de minimização dos impactos ambientais.

A legislação não restringe o método para a elaboração desses estudos. Os métodos mais utilizados para elaboração da etapa de avaliação dos impactos na elaboração do EIA/RIMA são: Ad-Hoc, *Check-Lists*, Matrizes, Matrizes de Leopold, Matrizes de interação, Superposição de Mapas, Battelle, Diagrama de Fluxo e Modelos de Simulação. De todo modo, o método escolhido deve considerar que os modelos possuem limitações e devem ser aplicados de acordo com as condições de contorno do problema (FONSECA, 2007).

Os métodos são imprescindíveis para uma adequada avaliação dos impactos. O presente estudo comprehende que métodos distintos podem concretizar o objetivo de avaliar o impacto ambiental com excelência e aborda os impactos para elaboração desses relatórios sem especificar o modelo mais adequado para o estudo.

As análises de impacto ambiental comparam os diversos impactos de avaliação de forma quantitativa e qualitativa. A emissão de poluentes ou de gases do efeito estufa pode ser calculada ou estimada para determinado empreendimento, entretanto, impactos relacionados à infraestrutura da comunidade local e ao odor gerado pelo empreendimento são fatores qualitativos e devem ser considerados no estudo.

A avaliação dos diversos fatores qualitativos e quantitativos presentes nos EIA é favorecida pela classificação desses fatores. De acordo com Mota (2010), os impactos ambientais podem ser classificados como:

- Quanto ao tipo: positivo (benéfico) ou negativo (adverso).
- Quanto ao modo: direto ou indireto.
- Quanto à magnitude: de pequena, média ou grande intensidade.
- Quanto à duração: temporário, permanente ou cíclico.
- Quanto ao alcance: local, regional, nacional ou global.
- Quanto ao efeito: imediato (curto prazo), de médio prazo ou de longo prazo.
- Quanto à reversibilidade: reversível ou irreversível.

A classificação de fatores permite uma análise e comparação de impactos de natureza diferente. O impacto na biota e na economia possuem características distintas, entretanto, ao rotular esses impactos nas classificações descritas acima, a comparação e compreensão destes é potencializada.

Os RIMA são desenvolvidos para o licenciamento de empreendimentos. Regularmente, a etapa de projeto já está encerrada ao iniciar o desenvolvimento dos EIA, portanto, o foco desses estudos é a mitigação e compensação de impactos. Entretanto, alterar características do projeto podem evitar impactos de forma mais eficiente.

A seguir estão apresentados os principais impactos ambientais associados a geração de energia no cenário brasileiro. Esses impactos serão

comparados para implementação de sistemas fotovoltaicos a fim de identificar os impactos associados a tecnologia fotovoltaica.

### **3.2 Impactos ambientais associados a empreendimentos de energia hídrica e fotovoltaica**

Empreendimentos de geração de energia no Brasil apresentam predominância de UHE, consequentemente, o número de trabalhos encontrados na literatura sobre esse tipo de geração é superior.

Os impactos ambientais relacionados a utilização e a alteração de rios e seu ecossistema são característicos de UHE, entretanto, esses impactos podem ocorrer em sistemas fotovoltaicos instalados em reservatórios ou lâminas d'água.

A CETESB (2021), através do manual para elaboração de estudos para o licenciamento com avaliação de impacto ambiental, indica os impactos essenciais para elaboração de EIA/RIMA de hidrelétricas. A seguir estão apresentados esses impactos, cortejados diante dos impactos causados pela instalação de UFV.

#### **3.2.1 Alterações na qualidade aquática e na biota aquática**

A alteração do meio aquático é substancial em UHE devido ao represamento, realocação e redução de fluxo de rios. A contaminação por óleos lubrificantes também é potencial impacto dessa geração (PETRIE, 2014). Os sistemas FV não apresentam esse impacto, exceto em casos de instalação em lagos e reservatórios, regularmente instalados de forma conjunta com UHE.

A movimentação da sedimentação é alterada em escala local e regional e a alteração na profundidade do rio pode ocasionar impactos indiretos (PETRIE, 2014). A alteração na qualidade da água e na biota aquática é regularmente um impacto negativo, visto que a alteração das condições do ecossistema fere o equilíbrio previamente estabelecido. Embora, o

represamento do rio pode estabelecer uma nova área para desenvolvimento da biota aquática.

### **3.2.2 Poluição e incômodos à população decorrentes dos canteiros de obra, áreas de apoio e caminhos de serviço**

A instalação de UFV compreende a terraplanagem da área a ser coberta pelos módulos FV, a instalação da infraestrutura elétrica e a montagem mecânica dos módulos FV (SILVA et al, 2019). Essas etapas da instalação requerem a utilização de maquinário e circulação de caminhões no local. Essas ações geram poluição e incômodos à população local (RIBEIRO, 2010).

A instalação de UHE apresenta impacto similar, a instalação desses sistemas demanda o deslocamento de caminhões e máquinas de tração. Esse impacto é classificado como negativo e temporário. O prazo de instalação de uma usina é reduzido se comparado ao período de operação (AMPLA, 2010).

### **3.2.3 Perda de cobertura vegetal**

A extensão de terra a ser coberta pelos MFV deve ser mantida livre de vegetação de porte arbóreo e arbustivo, e após a instalação do sistema o crescimento de vegetação é escasso devido ao sombreamento ocasionado pelo sistema (SILVA et al, 2019).

UHE apresentam impacto similar. As áreas próximas aos geradores são ocupadas por outros componentes do sistema e as áreas inundadas para represamento apresentam extinção ou alteração intensa da vegetação, essas áreas inundadas são responsáveis por emissões de CO<sub>2</sub> e metano (RIBEIRO, 2010).

Esse impacto ambiental é caracterizado como negativo e de grande intensidade, pois é de grande alteração no meio biológico.

### **3.2.4 Impactos sobre a fauna terrestre**

O cercamento do terreno é uma prática comum em usinas, impactando a locomoção de animais, fragmentando e reduzindo a conectividade entre os *habitats*. Entretanto, o principal potencial impacto sobre a fauna terrestre está associado ao impacto na cobertura vegetal, a fauna é afetada ao interferir

no *habitat* das espécies (SILVA et al, 2019). UFV e UHE apresentam impactos similares sobre a fauna terrestre.

Esse impacto é classificado como negativo e irreversível. Após a instalação do sistema a alteração sobre a fauna terrestre não pode ser desfeita. Estudos prévios à etapa de instalação podem mitigar esse impacto.

A reposição florestal priorizando áreas que possam formar corredores ecológicos entre os fragmentos de vegetação nativa e a supressão vegetal planejada para conduzir a fauna para áreas vizinhas são possibilidades de mitigação (AMPLA, 2010).

### **3.2.5 Desapropriação e reassentamento**

A desapropriação ou reassentamento não é uma prática comum de instalações FV. O custo associado a essa prática impacta negativamente o retorno financeiro do projeto, inviabilizando financeiramente o projeto. O custo de oportunidade de instalações FV não é tão vantajoso quanto o de eólicas e hídricas.

UHE estão restritas ao percurso de um rio e podem acarretar a desapropriação de terras para represamento de água. Podem causar o reassentamento de populações ribeirinhas e até indígenas. Esse impacto é negativo quando de sua ocorrência para PCH ou UHE. A localização de UFV não é atrelada a áreas fluviais, portanto, possui uma maior flexibilização na escolha do local. Mas podem ser instaladas usinas fotovoltaicas flutuantes em lagos ou reservatórios UHE, otimizando a parte da transmissão já existente (EPE, 2021).

Esse impacto é irreversível e imediato, a desapropriação ocorre no período de instalação das usinas e não apresenta possibilidade de mitigação.

### **3.2.6 Impactos na infraestrutura viária e no tráfego**

O impacto relativo à infraestrutura viária é imediato e permanente. A malha viária é transformada a fim de receber o tráfego de caminhões e máquinas de tração que é maior durante a etapa de instalação. Entretanto, após o fim da instalação as vias não são reduzidas ou retornadas ao estado original (GEO, 2016).

As UHE e UFV apresentam similaridades nos impactos na infraestrutura viária e no tráfego. As instalações dessas usinas possuem prazos similares se comparados com as etapas de operação, e a necessidade de tráfego de caminhões é semelhante.

A construção ou ampliação de vias pode prejudicar no visual da paisagem, pode provocar a desapropriação de terras, mas facilitar a locomoção entre bairros (AMPLA, 2010).

A vantagem da tecnologia FV é a dimensão do gerador de energia. UHE possuem as turbinas e a estruturas para represamento de água, esses elementos possuem dimensões superiores e são indivisíveis. Os módulos fotovoltaicos podem ser transportados separadamente, não necessitando de uma infraestrutura especial para transporte de cargas indivisíveis.

### **3.2.7 Perda de ecossistemas naturais**

A instalação de UFV pode comprometer o ecossistema local. A fauna e a flora não estão imunes aos impactos desses empreendimentos e, portanto, o ecossistema local é afetado. A supressão vegetal e a ocupação da terra são apontadas como os principais fatores de interferência no ecossistema (SILVA et al, 2019).

As usinas de geração de energia renovável sofrem dessa adversidade, seja em grande, média ou pequena intensidade. UHE afetam de forma acentuada o ecossistema. A escolha da localização de uma UFV permite evitar ou reduzir esse impacto.

O impacto sobre ecossistemas ocorre de maneira direta ou indireta, pois alterações na velocidade de escoamentos dos sedimentos no leito de rios podem interferir sobre a fauna terrestre que tinha aquele trecho como fonte de água (PETRIE, 2014). Este impacto é associado à etapa de operação de uma UHE.

## **3.3 Impactos ambientais associados a empreendimentos de geração eólica e fotovoltaica**

O potencial FV e eólico partilham algumas características no Brasil pois ambas são consideradas tecnologias verdes, apresentam grande potencial de geração na região Nordeste e não emitem GEE durante a produção de energia. Entretanto, as duas tecnologias podem apresentar impactos, caso não sejam devidamente estudadas antes da implementação.

A recente expansão da geração eólica apresentou adversidades devido ao crescimento desenfreado. Brannstrom (2017) ressalta que fazendas eólicas instaladas no Ceará apresentaram revés; residentes de comunidades próximas a essas instalações relataram dificuldade de extração de recursos dos mangues devido à desapropriação de terras, à construção de vias de acesso e a remoção da vegetação.

Vale ressaltar que dentre os impactos ambientais considerados para a elaboração de EIA de empreendimentos de geração de energia, a maioria está relacionada à fase de implementação da usina e são destacados os impactos socioeconômicos. A seguir são caracterizados alguns dos impactos associados a empreendimentos eólicos e associados à fotovoltaicos.

### **3.3.1 Impactos sobre a fauna aviária**

A instalação de UFV não apresenta interferência direta em rotas migratórias de aves, entretanto a área ocupada pelo sistema pode interferir na reprodução dessas espécies, visto que a área desflorestada para receber a UFV é considerável.

Os impactos sobre a fauna são irreversíveis e permanentes. A interferência na fauna está vinculada a operação da usina, portanto o impacto não pode ser mitigado.

Vale ressaltar que a geração de energia de usinas heliotérmicas ocorre através do espelhamento e concentração da incidência luminosa. Essa tecnologia é associada a morte de pássaros. A tecnologia fotovoltaica não requer a concentração da incidência luminosa, portanto, não causa morte de pássaros por combustão espontânea.

### **3.3.2 Interferência na estabilidade dos solos em razão da movimentação de terra**

As edificações vizinhas às obras podem ter suas fundações comprometidas, pois a movimentação e a compactação do solo em empreendimentos FV é notória. Sendo o processo de terraplanagem necessário para empreendimentos FV. Esse impacto é comum entre as UFV e UEL. A movimentação de terra ocorre no período de instalação da usina (SILVA et al, 2019).

A interferência na estabilidade dos solos possui alcance local, uma vez que apenas edificações vizinhas são impactadas, sendo esse impacto de curto, médio ou longo prazo.

### **3.3.3 Alteração na recarga de aquífero pelo aumento do escoamento superficial ocasionado pela supressão de vegetação**

A supressão vegetal e a compactação do solo interferem nas áreas de recarga de aquíferos e é necessário limitar a supressão vegetal à área necessária e restaurar a vegetação das áreas de acesso da obra a fim de mitigar esse impacto (GEO, 2016).

UFV devem ser instaladas em áreas com vegetação de menor porte ou requerem a supressão vegetal da área de instalação. As áreas próximas aos aerogeradores apresentam característica similar, entretanto, a extensão dessa área é reduzida ao comparar com a tecnologia FV.

Esse impacto é negativo e imediato, visto que interfere de forma negativa no aquífero e ocorre imediatamente após o desflorestamento.

### **3.3.4 Geração de tensão populacional**

Residentes de comunidades próximas aos empreendimentos FV podem ficar apreensivos com a instalação de uma usina que ocupa uma área extensa. Esse stress pode ser reduzido através de programas de comunicação social entre os empreendedores e a população. A tecnologia FV é entendida como uma fonte renovável de geração de energia, o que propicia uma receptividade por parte da sociedade, se comunicada de forma eficaz (GEO, 2016).

A instalação de UEL apresenta impacto similar. A visão da população é positiva ao associar à geração de energia renovável e ao entender o impacto

econômico dessa instalação. Vale ressaltar que a tecnologia eólica, mais difundida no Brasil, é identificada como geradora de impacto na agricultura local e na infraestrutura de subsistência de comunidades, portanto, a visão populacional pode alterar com o avanço dessa tecnologia.

O impacto relativo à tensão populacional pode ser evitado sendo classificado como reversível e local, visto que afeta a população residente próxima ao local de instalação.

### **3.3.5 A operação do empreendimento na região agregará uma nova forma de uso do solo**

A utilização do solo deixará de ser exclusiva para agricultura ou agropecuária ou florestal, entendendo que terrenos aptos a receber instalações FV regularmente são utilizados pelo setor produtivo agropecuário e florestal. A diversificação de uso do solo é avaliada como positiva. UEL apresentam característica similar, o uso da terra para geração de energia propicia uma nova forma de renda.

A nova forma de uso do solo é avaliada como positiva ao promover a valorização do terreno e proporcionar uma alternativa de fonte de renda para o proprietário (GEOCONSULT, 2015). Esse impacto é classificado como imediato, visto que a valorização dos terrenos ocorre de forma imediata à etapa de implementação do empreendimento.

### **3.3.6 Geração de resíduos sólidos**

A operação de UFV não gera emissões de materiais particulados ou de gases e a geração de energia através da captação da energia solar não consome material, portanto, não gera resíduos sólidos de forma significativa. Durante a etapa de instalação da usina, há a necessidade de descarte de materiais resultantes da obra (SILVA et al, 2019).

A operação de UEL não é atribuída à geração de resíduos durante a operação, a transformação de energia mecânica(ventos) em energia elétrica é similar à tecnologia fotovoltaica quanto à dispensa de consumo de material para a geração de energia (AVERSEN, 2012).

A geração de resíduos sólidos pode ser mitigada ao implementar programas de gerenciamento de resíduos e coleta seletiva, especificamente na área administrativa da usina, ação que pode ser estendida para a comunidade local. Esse impacto é considerado negativo e direto (PÖYRY, 2011).

### **3.3.7 Aumento da arrecadação de impostos**

A atração de recursos ocasionada por empreendimentos de geração de energia FV e eólica provoca um aumento na arrecadação de impostos, pois a prefeitura recolhe impostos sobre serviços, os quais são fomentados durante a instalação da usina. A administração estadual também é favorecida através de impostos sobre circulação de mercadoria e serviços (GEOCONSULT, 2015).

O aumento da arrecadação é um impacto benéfico podendo ser indireto, através do fomento da economia local, e direto visto que a venda de energia também apresenta incidência de imposto.

## **3.4 Impactos ambientais associados a empreendimento de geração de energia a biomassa e fotovoltaica**

O Brasil é reconhecidamente beneficiado pelas suas características edafoclimáticas, o que permite que em seu território diversas fontes de biomassa prosperem de forma abrangente e competitiva (EPE, 2018). A geração de energia através de incineração de lixo é um tipo de biomassa. Esta geração é conhecida como *Waste-to-Energy* (WTE) e, usualmente, utiliza o resíduo sólido urbano como combustível. Os primeiros leilões de energia desta matriz ocorreram em 2021. (ANEEL, 2021).

Apesar de ser uma tecnologia que consome o resíduo sólido urbano para geração de energia, essa também apresenta impactos ambientais. Khan (2020) seleciona os principais impactos associados a essa tecnologia. A seguir são comparados os potenciais impactos de maior relevância e correlacionados com empreendimentos FV.

### **3.4.1 Área ocupada**

A área ocupada por uma UFV determina a dimensão dos impactos ocasionados pelo empreendimento (BEYLOT, 2014). A terra ocupada pelos MFV não permite o cultivo ou permanecia de vegetação arbórea ou arbustiva

causando diversos impactos ambientais e sociais. A dimensão territorial do empreendimento é um critério importante para mensurar os impactos associados ao empreendimento.

As usinas a biomassa podem requer área para tratamento e reserva da matéria prima, além da área ocupada pelo reator ou outro equipamento de geração de energia. Portanto, essas usinas apresentam impactos similares em relação ao uso da terra.

Vale ressaltar que a relação entre a energia gerada e a área ocupada pelo sistema FV é dependente da tecnologia do módulo, da localização do empreendimento, do tipo de fixação e da eficiência do sistema: o módulo de tecnologia monocristalina é mais eficiente, portanto, possibilita gerar mais energia ocupando uma determinada área; as regiões com maior incidência solar são aptas a produzir mais energia; o sistema de fixação *tracker* aumenta a captação solar dos MFV; e sistemas com melhor relação de performance são mais eficientes.

### **3.4.2 Geração de poluentes**

A geração de material particulado ou de outros compostos é reduzida durante a etapa de operação de uma UFV, visto que a contaminação do solo ou do lençol freático é decorrente de vazamentos ou descartes de lubrificantes de veículos e óleos (SILVA et al, 2019). A incineração de material também não é uma prática de sistemas FV.

A geração de poluentes é classificada como negativa e irreversível. Após a emissão desses poluentes no ambiente não há método para remoção absoluta desses compostos no solo, na água ou no ar.

A geração de energia a biomassa gera poluentes, o processo de geração dessa energia é relacionado a emissão de material particulado e outros poluentes no processo de combustão ou compostagem (GAO e NA, 2019). Esse impacto pode ser evitado ao utilizar equipamentos compatíveis com o tipo de aplicação, implantar filtros em exaustores, tratar os dejetos da usina e reduzir a quantidade de material contaminado que envolve o processo de geração de energia (KABIR e KHAN, 2020).

### **3.4.3 Emissão de CO<sup>2</sup> em ciclo de vida/kWh**

As emissões totais de CO<sup>2</sup> durante a operação de UFV é nula (SILVA et al, 2019). Entretanto, a manufatura dos MFV apresenta geração desse gás. A instalação do sistema FV sobre lâminas de água também apresenta emissões de CO<sup>2</sup> ao longo da vida útil da usina (SADÉ, 2021).

Usinas a biomassa apresentam emissão de CO<sup>2</sup> durante a operação, os processos de combustão são responsáveis pela emissão desse gás. A emissão de gases do efeito estufa (GEE) é um impacto negativo e imediato, visto que ao ser liberado no ambiente apresenta efeitos imediatos ao interagir com o meio (GAO e NA, 2019).

### **3.4.4 Onda de calor**

Os sistemas FV provocam o aquecimento do local de instalação. A reflexão da luminosidade solar e a irradiação gerada pelos MFV provoca o aumento da temperatura das áreas próximas do sistema. Lembrando que a área de vegetação nativa é capaz de absorver a incidência solar. O sistema não é capaz de aquecer áreas distantes do empreendimento, apenas as proximidades são afetadas (SILVA et al, 2019).

A geração de ondas de calor é um impacto negativo, entretanto não há estudos que demonstram esse impacto como grande potencial de risco. Usinas térmicas geram energia através da combustão para geração de calor. Tal processo pode ocasionar ondas de calor com maior potencial de risco. Usinas de geração de energia à biomassa que realizam a combustão de material estão sujeitas a esse impacto.

### **3.4.5 Riscos à saúde pública**

Os riscos à saúde pública não são associados a impactos diretos de implementação de UFV. A etapa de instalação da usina pode acarretar em aumento de emissões de GEE devido a movimentação de máquinas e aumento do tráfego de veículos pesados, entretanto, é um impacto de menor intensidade.

Usina à biomassa apresentam emissão de GEE e poluentes, portanto, podem ocasionar riscos à saúde da população que reside próximo ao local de instalação.

### **3.4.6 Impacto no valor da terra**

A construção de uma UFV promove uma nova forma de utilização da terra, especialmente em áreas degradadas ou de baixa produtividade agrícola, fomentando o valor da terra.

Usinas de geração de energia a biomassa são instalações com menor potencial de expansão e podem ocasionar incômodos para a população local, portanto, podem proporcionar um impacto negativo no valor da terra, exceto o local específico da instalação.

Esse impacto pode ser classificado como positivo ou negativo e regional. A legislação estadual incentiva a instalação de usinas FV pois fomentam a valorização de terras.

### **3.4.7 Uso da água**

A manutenção dos sistemas FV requer a limpeza dos módulos, usualmente realizada com água. Esse processo torna a água imprópria para uso, entretanto, não ocorre contaminação desse recurso. A água utilizada é absorvida pelo solo local, sendo possível a reutilização dessa água, após tratamento, caso necessário (GEO, 2016).

A instalação e a operação do sistema utilizam esse recurso natural de forma amena, entretanto, o incentivo do uso consciente da água é benéfico como forma de mitigar esse impacto.

Já a biomassa requer muita água, desde a produção da cana de açúcar até o processamento. Esse é um fator de impacto negativo comparado a um sistema fotovoltaico (GAO e NA, 2019).

## **3.5 Impactos ambientais associados a usinas termelétricas e fotovoltaicas**

Segundo Li (2020) as novas fontes renováveis de energia apresentam imprevisibilidade de geração. As UTE suprem a demanda instantânea em momentos de sombreamento do sistema FV ou menor velocidade de vento

incidente em sistemas eólicos, portanto, são fundamentais para a manutenção da segurança energética do sistema elétrico brasileiro, mesmo que seja fonte de geração fóssil.

A seguir são comparados os potenciais impactos de UTE com empreendimentos FV.

### **3.5.1 Interferências em áreas protegidas**

A área com potencial de geração solar no território nacional é extensa, portanto, áreas de preservação podem e devem ser evitadas. A instalação de usinas fotovoltaicas, eólicas e hidrelétricas próximo de áreas protegidas não é recomendada. UTE apresentam impactos similares, entretanto, a emissão de GEE e outros poluentes constituí maior potencial de atingir áreas de proteção de forma indireta.

Essa interferência pode ocorrer de forma direta ou indireta. O impacto em áreas protegidas pode ocorrer em decorrência do aumento do tráfego de caminhões no período de instalação de uma usina ou devido às alterações das propriedades físicas do meio.

### **3.5.2 Interferências em atividades econômicas e equipamentos sociais**

O período de instalação da UFV proporciona criação de empregos temporários e impulsiona a atividade econômica local (HEAVNER e CHIARO, 2011). A operação da usina também é avaliada de forma positiva devido à criação de empregos permanentes.

A implementação de UTE interfere de forma similar nas atividades econômicas. A criação de empregos temporários e permanentes e o desenvolvimento de projetos na região afeta de maneira similar o meio antrópico.

Usinas de geração de energia, incentivam em curto prazo a geração de empregos na região de instalação, entretanto, podem impactar a cadeia de produção local ao ocupar áreas de produção agrícola, configurando assim um impacto benéfico em curto prazo e adverso em longo prazo (SILVA et al, 2020).

### **3.5.3 Risco de disseminação de doenças devido ao desmatamento**

O desmatamento de vegetação nativa interfere no ecossistema local. O habitat é reduzido provocando o confinamento de espécies em um território limitado. A interação entre os animais tende a crescer, potencializando a proliferação de doenças.

A área de instalação dos MFV pode sofrer desflorestamento para comportar o sistema, a área ocupada por UTE é menor, portanto, esse risco é substancial, apenas, para a tecnologia FV. Esse potencial impacto é negativo e de escala regional, pois o risco de disseminação de doenças pode não se restringir às proximidades do empreendimento.

### **3.5.4 Desmobilização de mão de obra**

Heavner e Chiaro (2011) aponta que a criação de empregos do setor FV é de 2,57 empregos/MW a 7,14 empregos/MW durante a construção do empreendimento, para a operação da usina a taxa é de 0,12 a 2,28 empregos/MW.

A mão de obra para a instalação e operação de usinas de geração de energia é especializada. A construção de usinas gera oportunidade de trabalho, atraindo essa mão de obra, a operação dessas usinas requer menos recursos humanos, criando um desequilíbrio entre a etapa de instalação e operação de uma usina.

O prazo de instalação de UFV é de até 2 anos. A comunidade local aproveita da criação de vagas temporárias, entretanto, o volume de trabalho carece de mão de obra externa. Empresas possuem equipes específicas para a instalação de usinas e essas equipes são deslocadas conforme a demanda de instalação de novas usinas.

A instalação de UTE apresenta desbalanço de criação de empregos entre a fase de instalação e a fase de operação da usina. Portanto, está sujeita a esse impacto.

O impacto relacionado à desmobilização de mão de obra é de médio prazo, visto que a maioria dos empregos são dispostos durante a etapa de instalação da usina.

### **3.5.5 Prejuízo a saúde**

A emissão de poluentes de UTE pode ocasionar prejuízos à saúde da população que reside próxima ao empreendimento (FTHENAKIS, 2009). O CO<sup>2</sup>, material particulado e óxidos de enxofre e nitrogênio não são emitidos durante a operação de UFV (SILVA et al, 2019).

Esse impacto é negativo e de média duração pois é necessário decorrer certo período de tempo para que o impacto gerado seja neutralizado.

### **3.5.6 Risco de contaminação dos solos**

A emissão de poluentes durante a operação de UTE pode ocasionar a contaminação dos solos, essa contaminação ocorre de forma indireta através dos poluentes emitidos pela usina ou do descarte inadequado de material no meio. A tecnologia FV não ocasiona esses transtornos pois não emite poluentes durante sua operação.

Esse impacto é negativo e permanente pois o efeito gerado é definitivo, a contaminação perdura inclusive após o encerramento de atividade da usina.

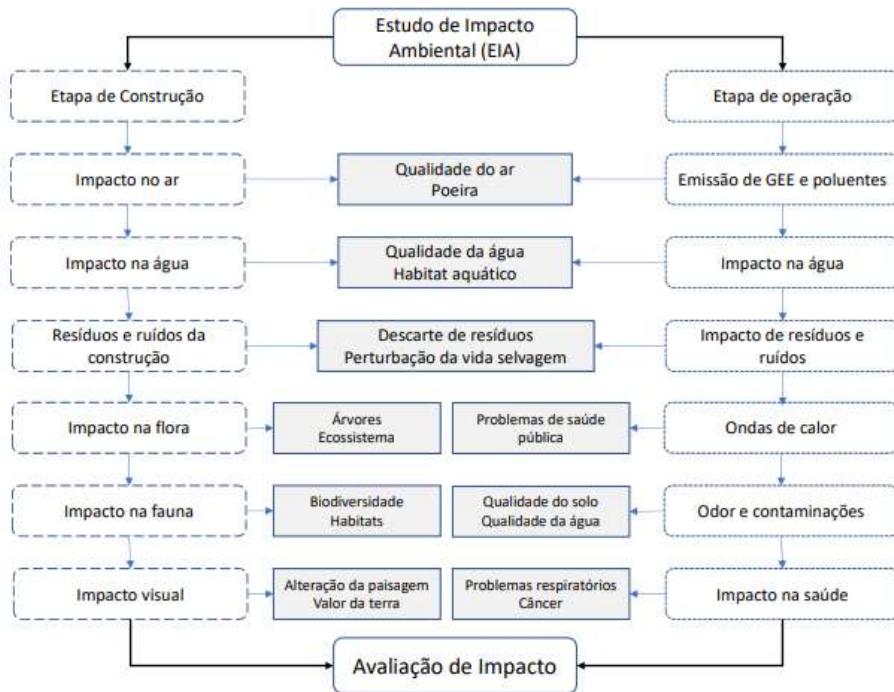
## **3.6 Diagrama de impactos**

O diagrama permite relacionar os diferentes impactos ambientais a partir das relações de causa e efeito dos potenciais impactos relacionados ao empreendimento estudado.

A Figura 5 mostra o diagrama de impactos elaborado por Kabin (2020) para a geração de energia a biomassa.

A fim de ilustrar e comparar os diferentes potenciais impactos para cada tipo de geração foram desenvolvidos diagramas de impacto com base no modelo desenvolvido por Kabin (2020) utilizando os impactos mais recorrentes no cenário brasileiro.

Figura 5 - Diagrama de potenciais impactos de usinas a biomassa



Fonte: Adaptado de KABIR e KHAN (2020)

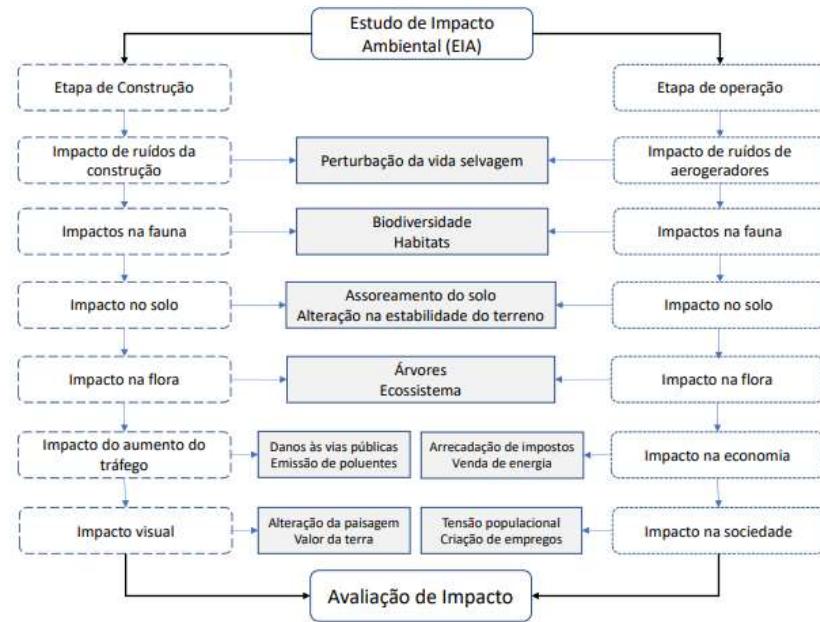
A Figura 6 apresenta o diagrama de impactos para a geração eólica.

O diagrama potencializa a análise dos potenciais impactos relacionados à etapa de construção e operação das usinas. Os principais fatores abordados na análise de UEL estão relacionados com a fase de implementação da usina, potenciais impactos dos aerogeradores e impactos socioeconômicos.

A Figura 7 apresenta o modelo para UHE.

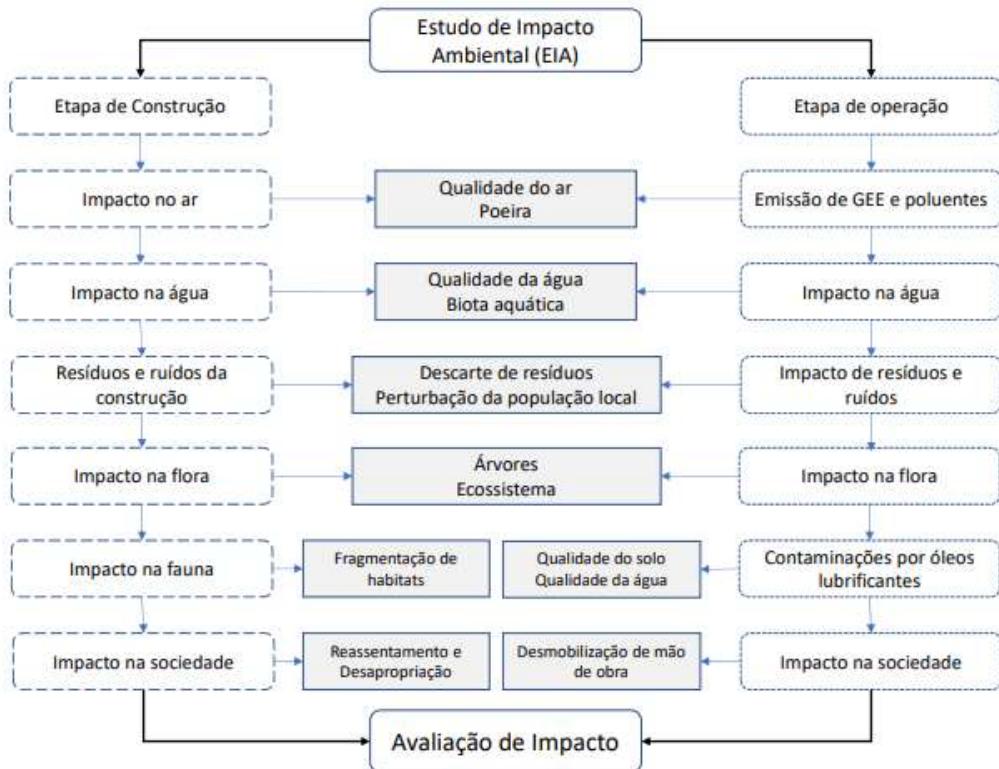
Os impactos analisados para fontes de geração hídrica são similares aos impactos da geração eólica, entretanto, o estudo dos impactos relacionados ao ecossistema aquático e a desapropriação de terra para represamento de água são aprofundados.

Figura 6 - Diagrama de potenciais impactos de UEL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - Diagrama de potenciais impactos de UHE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os potenciais impactos da construção dessas usinas são avaliados de forma semelhante, os resíduos e ruídos das obras interferindo na fauna e em atividades próximas aos empreendimentos possuem características semelhantes para diferentes tipos de empreendimentos.

### **3.7 Impactos ambientais emergentes, associados a empreendimentos de geração de energia solar fotovoltaica**

A matriz elétrica brasileira tem predominância das fontes renováveis de energia. Quando fontes renováveis e mudanças climáticas são consideradas no mesmo contexto, as análises de impacto focam na mitigação das mudanças climáticas através da redução de emissão de GEE (PASICKO, 2012). Nesse contexto é essencial analisar os impactos dessas fontes de energia considerando além das emissões de GEE.

#### **3.7.1 Alterações na paisagem e no uso do solo**

Plantas de geração de energia solar não emitem ruídos, gases de efeito estufa, outras emissões ou cinzas, entretanto, não são imunes a impactos socioambientais, sendo suscetíveis a causar impactos principalmente relacionados ao uso intenso do solo e alteração da topografia local, devido à necessidade de terraplanagem da área de instalação do sistema (SILVA et al, 2019).

A alteração da topografia local é uma prática comum de instalações FV. Terrenos com relevo irregular são evitados devido ao aumento do volume de obras e, consequentemente, custo de projeto. Vale ressaltar que o sistema FV com estrutura *tracker* necessita de relevo mais uniforme e menores inclinações para funcionamento adequado, portanto, morros são incompatíveis com essa tecnologia.

Uma rápida expansão na capacidade de geração FV foi registrada desde 2005 na Europa. Na Itália, áreas agrícolas foram ocupadas por sistemas

FV representando uma perda de 0,1% na área total de agricultura do país. Essa alteração pode impactar a cadeia de produção de alimentos. A fim de conter essa transformação, incentivos para fontes FV instaladas em áreas rurais foram removidos pelo governo italiano (DELFANTI, 2016).

Áreas adequadas a receber o sistema FV são, regularmente, utilizadas para produção agrícola, criando uma disputa comercial pelo espaço. No Brasil a atratividade financeira de investimentos FV não propicia a substituição da agricultura de commodities por produção de energia. Os equipamentos FV são importados, portanto, o custo de implementação de empreendimentos FV está sujeito ao preço do dólar.

A produção agrícola brasileira tem o mercado internacional como principal consumidor, a precificação dos produtos para esse mercado também está sujeita ao preço do dólar. Nesse contexto, o impacto de UFV associado à perda de áreas agrícolas é reduzido, visto que o retorno financeiro de um projeto FV não é tão vantajoso.

Apesar de a substituição de áreas com produção agrícola não ser uma prática no mercado FV brasileiro, essa ação deve ser prevenida. Outra prática relacionada a utilização do solo que deve ser evitada é a alteração do relevo. Essas características devem ser trabalhadas nos EIA.

### **3.7.2 Impactos relacionados ao ciclo de vida do projeto**

A operação de UFV não gera toxinas ou GEE, entretanto a produção de materiais da célula FV pode emitir tais gases em conjunto com outros compostos, portanto, a análise dessas usinas deve ser desenvolvida através de avaliação de ciclo de vida (FTHENAKIS et al, 2009).

Segundo Sáde (2021), a avaliação do ciclo de vida de uma UFV constatou uma considerável emissão de GEE durante a manufatura dos MFV, sendo o estágio de purificação do silício o maior responsável por essa emissão. A etapa de purificação ocorre na China, país cuja matriz energética é predominantemente fóssil.

Diferentes métodos podem ser utilizados para obter uma eficaz análise de impacto ambiental, e, é possível combinar diferentes métodos a fim

de obter uma representação mais fidedigna do projeto. Análises de ciclo de vida podem ser adicionadas aos modelos de RIMA já utilizados no mercado.

Outro fator de análise é o descarte dos equipamentos. Em projetos de geração de energia a análise de ciclo de vida é mais apropriada pela necessidade de contabilizar os efeitos da construção e desmontagem da usina (LOMBARDI, 2003). Os módulos FV e outros componentes do sistema podem ser descartados ou serem reciclados (MOSKOWITZ et al, 1982).

Os mercados fotovoltaicos de países europeus apresentam diretrizes específicas para o descarte de módulos FV. Já outros países de grande capacidade solar instalada como Japão, Estados Unidos e China não apresentam legislação específica para o descarte desse material. Os métodos aplicados para o gerenciamento desses resíduos são a redução, o reuso e a reciclagem (IRENA, 2016).

O primeiro método trata da redução de material para a manufatura dos MFV através do aumento da eficiência dos processos de produção. O segundo é o reaproveitamento de módulos que apresentaram defeitos de fabricação ou de módulos oriundos do desmantelamento de usinas ao final da vida útil. Essa opção é caracterizada pela criação de um mercado de módulos usados. A terceira tratativa é a reciclagem dos MFV, os componentes podem ser separados e reciclados, entretanto, essa é a opção mais custosa. A cadeia logística para recolhimento dos módulos e os processos de reciclagem dificultam o processo (IRENA, 2016).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSAO

O estudo dos impactos ambientais de um projeto pode ser compreendido como o processo de identificação, previsão e proposta de medidas de mitigação dos impactos relacionados à implementação de um determinado empreendimento (DELFANTI, 2016). O estudo deve ser elaborado a fim de guiar o projeto e direcioná-lo para um menor potencial de risco.

EIA/RIMA são elaborados para UFV de grande porte. A exigência de um estudo completo contempla a análise da fauna e flora local, destrinchando as espécies, os impactos para cada espécie e as medidas mitigadoras específicas.

A classificação dos empreendimentos e a exigência desses estudos é específica para cada estado. O estado de São Paulo dispensa a elaboração de EIA para empreendimentos FV com potencia instalada inferior ou igual a 5 MW (São Paulo, 2017). Ocorre a dispensa de relatório completo para geradores com potencia inferior a 5MW no Ceará (Ceará, 2016). No Paraná não há exigência de elaboração de EIA completo para empreendimentos FV com potência instalada inferior a 10 MW (Paraná, 2017).

A legislação específica para licenciamento de empreendimentos FV foi estabelecida no seguintes estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Distrito Federal, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Rondônia, Santa Catarina, São Paulo, Sergipe e Tocantins (EPE, 2021).

Neste capítulo serão discutidos os principais impactos associados a sistemas FV, relacionando o cenário brasileiro de geração de energia, o processo de licenciamento ambiental e as diversas topologias dos sistemas FV.

#### **4.1 Principais fatores para análise do sistema FV**

As análises desenvolvidas no Brasil para empreendimentos de geração de energia renovável retratam os impactos socioeconômicos com mais ênfase. Os impactos associados ao incentivo da economia local e geração de empregos são avaliados como positivos e sempre se apresentam no escopo do estudo (SILVA, 2019).

A legislação exige um estudo completo sobre a fauna e flora, os principais impactos que devem ser adicionados aos EIA estão associados à utilização de terreno e à análise de ciclo de vida das usinas. Incluir o impacto da manufatura dos MFV é essencial para entender o benefício real do empreendimento.

##### **4.1.1 Análise do ciclo de vida**

A análise do ciclo de vida é essencial para entender se o empreendimento apresentará impacto negativo ou positivo durante sua vida útil. A etapa de manufatura dos equipamentos do sistema FV é firmada como principal causadora de emissões de GEE de um empreendimento de geração fotovoltaica (SADÉ, 2021).

Emissões de GEE e outros poluentes são parte do impacto do processo de produção de MFV. As diferentes tecnologias de fabricação ocasionam diferentes quantidades de emissões e resultam em equipamentos de características e eficiência diferentes.

O MFV do tipo monocristalino apresenta maiores desperdícios de material durante sua fabricação, entretanto, a eficiência desse módulo é superior (SADÉ, 2021). A análise do ciclo de vida ajuda a identificar qual modelo apresenta menos impactos. A utilização de módulos que apresentam menores desperdícios durante a manufatura pode compensar os impactos ambientais associados a necessidade de ocupar uma área maior para instalar o empreendimento (FTHENAKIS, 2009).

A cadeia de produção e escoamento dos equipamentos deve ser analisada para avaliação dos impactos. O número de MFV de uma usina é

substancial, portanto, a cadeia de produção e de reciclagem deve ser estudada (GUO e KLUSE, 2020). Apesar de o transporte dos módulos não requisitar uma infraestrutura viária para tráfego de veículos especiais, o escoamento desse material ocasiona um tráfego intenso de caminhões e também gera emissões de gases de efeito estufa.

No aspecto da gestão de resíduos na etapa de encerramento de uma UFV, a cadeia de reciclagem ou reuso desses materiais deve ser estudada. A infraestrutura de empresas e negócios atual não comporta o descarte de grandes quantidades de MFV (GUO e KLUSE, 2020).

Uma legislação rígida propicia a criação de um mercado com o gerenciamento de resíduos adequado. Sendo os fabricantes responsáveis pela destinação adequada dos MFV, o descarte de equipamentos é fator fundamental para o desenvolvimento equilibrado do negócio. Apesar de implicar em um aumento dos preços, essa prática incentiva a economia circular, a qual preza pela redução da extração de matéria-prima do meio ao incentivar políticas de redução, reuso e reciclagem (IRENA, 2016).

#### **4.1.2 Localização do empreendimento**

Pressupondo que o EIA é elaborado em conjunto com o projeto da usina, a escolha da localização deve ser considerada para reduzir os impactos associados ao empreendimento.

A instalação de UFV requer a terraplanagem do terreno e supressão da vegetação se assim for necessária. Essas práticas apresentam potenciais impactos de grande magnitude. A supressão vegetal interfere na flora e na fauna ao reduzir o habitat. A qualidade do solo também é afetada devido à exposição da camada superficial ao sol. A alteração da permeabilidade do solo é capaz de interferir no abastecimento do lençol freático, além de expor o solo a erosão laminar. Este potencial impacto também está associado à remoção de vegetação (SILVA, 2020).

As obras civis relacionadas à terraplanagem podem causar impactos na estabilidade do solo e potencializam a emissão de GEE e outros poluentes

pela necessidade de operação de caminhões e outros maquinários para movimentação da terra. A construção de vias de acesso causa transtornos à população próxima aos empreendimentos FV. Estes impactos podem ser evitados ou reduzidos conforme a escolha da localização do empreendimento.

Áreas com maior potencial de geração devem ser privilegiadas para a implementação de UFV, sendo que a região Nordeste apresenta os maiores índices de incidência solar (INPE, 2017).

O transporte da energia por grandes distâncias está associado a perdas resistivas. Apesar da região Nordeste apresentar um grande potencial de geração solar, o submercado Centro-Oeste/Sudeste representa a maior concentração de cargas.

As áreas oestes dos estados de São Paulo, Paraná e Minas Gerais são indicadas para a implementação de usinas solar, visto que apresentam bons índices de incidência solar e são próximas dos grandes centros de consumo.

Outro fator locacional do empreendimento é a possibilidade de aproveitamento de áreas impróprias para aplicações agrícolas e urbanização. A disputa comercial por áreas com potencial de produção agrícola pode ser evitada assim como as adversidades relacionadas à interferência em comunidades próximas aos empreendimentos. Neste caso se destaca as grandes comodities como soja, milho, laranja, café, cana-de-açúcar e as florestas comerciais de eucalipto.

#### **4.1.3 Análise da relação de performance**

A relação de performance indica a relação entre a quantidade de energia produzida pela quantidade de energia incidente sobre o plano horizontal para uma área equivalente. Sistemas FV possuem uma relação próxima a 80%, devido a perdas associadas aos inversores, transformadores e cabos (SMA, 2021).

Uma usina mais eficiente tende a apresentar valores maiores de relação de performance, portanto, a simulação e comparação de vários sistemas em um mesmo local é capaz de indicar o melhor sistema do ponto de vista energético. O valor de relação de performance é influenciado por fatores como

a temperatura e a variação da incidência solar ao longo do ano, assim, só deve ser utilizado para comparar sistemas no mesmo espaço de instalação.

Apesar de uma usina de maior eficiência gerar mais energia e implicar em um faturamento maior, uma configuração com menor desempenho pode apresentar melhores resultados financeiros por ter um custo de instalação reduzido. A utilização de sistema de fixação *tracker* é um exemplo disso, a geração de energia é superior ao sistema com estrutura fixa. Entretanto, o custo de instalação é elevado.

Beylot (2014) conclui que sistema com estrutura de fixação *tracker* de um eixo apresenta menores impactos em relação aos sistemas de dois eixos ou estrutura fixa de alumínio.

Esse fator é vantajoso para comparar variadas topologias de instalação do sistema FV para um empreendimento com o local de instalação já definido, sendo possível apenas alterar a dimensão da área ou o formato geográfico do sistema.

## **4.2 A flexibilidade locacional como recurso de mitigação**

O porte de uma UFV pode ser reduzido após a fase inicial de projeto. Uma instalação pode ser fragmentada a fim de facilitar a implementação do empreendimento. Essa prática já é utilizada para enquadrar a categoria do empreendimento como de menor potencial poluidor e dispensar a necessidade de licenciamento ambiental.

A fragmentação do sistema pode ocorrer na etapa de instalação, instalando o sistema em partes, e pode ocorrer através da separação geográfica do sistema, caso parte do terreno seja imprópria para a instalação.

Essa prática permite evitar potenciais impactos relacionados à infraestrutura viária local ou ao aumento do tráfego de veículos de carga; reduzir impactos relacionados a desmobilização de mão de obra, ao implementar a usina em etapas; e utilizar áreas próximas a centros urbanos, reduzindo as perdas na

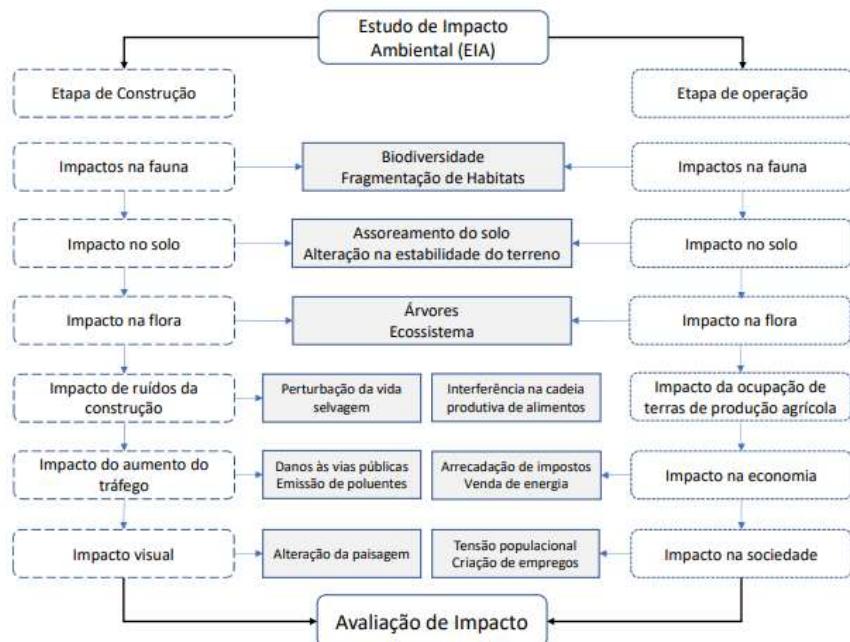
transmissão de energia. Áreas próximas aos centros urbanos, regularmente, estão ocupadas seja para uso rural, industrial ou residencial, portanto a disponibilidade de grandes áreas adequadas para a instalação do sistema FV é reduzida.

Guo e Kluse (2021) ressalta que a localização da UFV influencia a cadeia de logística de reciclagem dos módulos fotovoltaicos. Reduzir a distância entre as UFV em fase de descomissionamento e os centros de reciclagem é essencial para a viabilidade financeira de reciclagem.

#### 4.3 Diagrama de impactos de UFV

A Figura 8 apresenta o diagrama de potenciais impactos na geração de energia FV. Esse diagrama retrata os impactos associados à instalação e operação do empreendimento.

*Figura 8 - Diagrama de potenciais impactos de UFV*



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama apresenta os impactos relacionados à fase de implementação e operação do sistema e impactos característicos de UFV. A necessidade de supressão vegetal e terraplanagem são impactos de maior representatividade para esse tipo de empreendimento.

Esse diagrama não contempla os impactos de manufatura dos MFV, a análise de ciclo de vida é mais adequada para estudar esses impactos. Assim é possível preservar os modelos atuais de EIA/RIMA ressaltando os impactos apresentados nesse estudo e adicionar a análise do ciclo de vida compreendendo a manufatura dos MFV.

## 5. POTENCIAL DE MITIGAÇÃO

Os potenciais de mitigação apresentados a seguir estão associados ao uso da terra, visto que alguns impactos discutidos neste trabalho podem ser evitados durante a fase de projeto da usina ao identificar o local de impacto ambiental.

UHE, usualmente, possuem represamento de água. A possibilidade de instalação de sistemas FV flutuantes na lâmina d'água é interessante na perspectiva ambiental. A geração hídrica pode ser controlada ao longo do tempo e a geração solar ocorre nos períodos de picos de carga do sistema, portanto, esse sistema pode funcionar como uma bateria virtual (FARFAN e BREYER, 2018).

Outros fatores que propiciam essa topologia são: a infraestrutura elétrica existente no local de instalação que pode ser aproveitada; a redução da evaporação da lâmina d'água; a possibilidade de compartilhamento da operação das duas fontes de energia; e a dispensa de supressão vegetal ou outros conflitos pelo uso da terra.

A instalação de geração FV em lixões e aterros desativados é capaz de aproveitar um terreno contaminado. Apesar da disponibilidade do terreno, áreas de aterros e lixões apresentam vazamento de gases e topografia pouco uniformes. Portanto, é necessário estudar o custo-benefício dessa aplicação.

Em termos ambientais essa aplicação é favorável por apresentar uma maneira de aproveitamento de um terreno impróprio para agricultura ou urbanização, reduzindo assim os potenciais impactos ambientais associados à instalação da UFV. A possibilidade de instalação de UFV em aterros sanitários é potencializada devido à redução dos custos com infraestrutura elétrica, similar à instalação de FV em conjunto com UHE.

Os aterros e lixões são instalados em áreas próximas aos centros urbanos devido à complexidade de transporte de resíduos sólidos urbanos por grandes distâncias. Essa configuração é adequada pois a geração de energia

próxima aos centros de consumo é benéfica. O fator de flexibilidade locacional do sistema FV permite a instalação de sistemas com variados tamanhos e em locais distintos, sendo essa característica também compatível com esse modelo. Em especial, esta configuração pode ser utilizada para a recuperação de áreas degradadas. Em aterros sanitários, este modelo de empreendimento pode monetizar a área ocupada por aterros sanitários encerrados, colaborando com a manutenção destes.

A fim de reduzir a disputa entre o empreendimento FV e a agricultura a combinação desses sistemas é uma solução, principalmente próximo de áreas populosas, as quais têm maior densidade de consumo e restrição de terrenos desocupados.

A geração FV compete com a agricultura, pecuária e produção florestal. Em áreas de baixa rentabilidade agrícola como é o caso do semiárido, empreendimentos FV levam vantagem. Em contrapartida, em áreas das grandes commodities agrícolas (milho, soja, algodão, café, laranja, cana-de-açúcar) e áreas de florestas plantadas como eucaliptos, pinus e outras espécies, e mesmo em área de pecuária, o FV não é competitivo.

Segundo Beck (2012) diversas espécies podem ser cultivadas sob os MFV, visto que o sombreamento parcial pode evitar o aquecimento e evaporação extrema em vegetações rasteiras, sendo um potencial para regiões de clima árido e semiárido.

As regiões de clima árido e semiárido no território brasileiro apresentam bons índices de incidência solar, propiciando essa configuração de sistema. A região Nordeste que apresenta essa característica climática é associada à reduzida produtividade rural, caso o sombreamento parcial do terreno promova a produtividade da agricultura essa tecnologia poderá ter impacto positivo de grande magnitude.

Conforme abordado anteriormente a manufatura dos MFV é grande causadora de impactos e a cadeia de produção destes pode ser alterada a fim de reduzir as emissões de GEE. Os métodos de gestão de resíduos são a redução, reuso e reciclagem.

O primeiro método trata da redução de material para a manufatura dos MFV através do aumento da eficiência dos processos de produção. O silício e o alumínio são os principais componentes dos módulos. A extração desses materiais deve ser reduzida. A energia necessária para o refino dos cristais de silício também apresenta potencial de melhoramento.

O segundo método é o reaproveitamento de módulos que apresentaram defeitos de fabricação ou de módulos oriundos do desmantelamento de usinas ao final da vida útil. Essa opção é caracterizada pela criação de um mercado de módulos usados. Para concretizar essa possibilidade, o mercado deve estar preparado para utilizar esses equipamentos e estudos devem ser realizados a fim de examinar a eficiência desse modelo.

A terceira tratativa é a reciclagem dos MFV. Os componentes podem ser separados e reciclados, entretanto, essa é a opção mais custosa. A cadeia logística para recolhimento dos módulos e os processos de reciclagem dificultam o processo.

## 6. CONCLUSÃO

Este estudo comprehende que alguns impactos analisados para outras fontes de energia são adequados para análise de empreendimentos fotovoltaicos, portanto, pode-se aproveitar parcialmente os modelos de estudo. A inclusão de análises do ciclo de vida e alguns impactos específicos do setor fotovoltaico são essenciais para a obtenção de um EIA adequado.

Esse estudo constatou a necessidade de avaliar a manufatura dos MFV para compreender o impacto indireto ocasionado pelo empreendimento FV, assim como estudar a cadeia de descarte desse material. Ao final da atividade da usina os módulos fotovoltaicos precisam ser descartados ou recuperados ou reciclados, a fim de evitar problemas futuros, sendo essencial estruturar essa cadeia de descarte.

A tecnologia fotovoltaica apresenta impactos associados à utilização de grandes áreas. Se a implementação da usina necessitar de supressão vegetal ou modificação da morfologia do solo os potenciais impactos dessa instalação serão de grande magnitude. É essencial entender a necessidade da localização do empreendimento.

### 6.1 Sugestão para estudos futuros

Sugere-se como estudos complementares a comparação de impactos para empreendimentos de geração fotovoltaica no Nordeste e no Sudeste, relacionando a utilização do solo e a proximidade das cargas. A comparação entre diferentes tecnologias do sistema fotovoltaico apresenta potencial de mitigação de impactos, portanto outra sugestão é a elaboração de estudos identificando os impactos positivos e negativos de cada tecnologia. A análise da cadeia de produção contemplando o descarte ou a reciclagem dos módulos fotovoltaicos é outra sugestão para estudos futuros.

## Referências

1. ANNEEL. Agência Nacional De Energia Elétrica. Resolução normativa nº 77, de 18 de agosto de 2004. Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2004077.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
2. AMPLA. Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente, Pequena Central Hidrelétrica Ponte Branca – Águas de Santa Bárbara e Iaras/SP. 2009.
3. AVERSEN A. H. E. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: a review of present knowledge and research needs *Renew Sustain Energy*. v. 16 p. 5994-6006. 2012
4. BRANNSTROM C, et al. Is Brazilian wind power development sustainable? Insights from a review of conflicts in Ceará state. *Renew Sustain Energy*. Rev. 67. p. 62-71, 2017.
5. BECK M. et al. Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. p. 4096 - 4100. 2012
6. BEYLOT A. et al. Environmental impacts of large-scale grid-connected ground-mounted PV installations. *Renewable Energy*. v.61. p. 2-6. 2014
7. CAMARGO, I. Avaliação de Impacto Ambiental Aplicada a Projetos de Geração de Energia Eólica: O Caso do Estado do Ceará, 2019.
8. CEARÁ. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução nº 003, de 03 de abril de 2016.
9. CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual para elaboração de estudos para o licenciamento com avaliação de impacto ambiental. Disponível em:

- <<https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/cetesb/documentos/Manual-DD-217-14.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2021.
10. CHESF. Companhia Hidrelétrica do São Francisco. Novos Prazos Chamada Pública P&D+I - 02/2016. Disponível em: <<https://www.chesf.gov.br/Destaques/termosolar.jpg>>. Acesso em: 26 mar. 2021.
11. CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº001, de 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 16 mar. 2021.
12. CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº279, de 27 de junho de 2001. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res01/res27901.html>>. Acesso em: 16 mar. 2021.
13. DELFANTI L. et al. Solar plants, environmental degradation and local socioeconomic contexts: A case study in a mediterranean country. *Environmental Impact Assessment Review*. v. 61. p. 88-93. 2016
14. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica. 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topicos-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf>>. Acesso em 21 mar. 2021.
15. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topicos-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2021.
16. EPE/ELETROBRAS. Empresa de Pesquisa Energética. Nota técnica conjunta. Levantamento da legislação para licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar. Maio de 2021.
17. FARFAN R. BREYER C. Combining Floating Solar Photovoltaic Power Plants and Hydropower Reservoirs: A Virtual Battery of Great Global Potential. *Energy Procedia*. V. 155 p. 403-411. 2018.

18. FTHENAKIS V. et al. Sustainability of photovoltaics: the case for thin-film solar cells. *Renewable Sustainability Energy Review*. v. 13 p.2746-2750. 2009.
19. GAO C; Na M. et al. Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v 102. p. 307-317. 2019
20. GEOCONSULT. RIMA – Relatório de Impacto Ambiental Complexo Eólico Bons Ventos da Serra 2. 2015
21. GEOCONSULT. RIMA – Relatório de Impacto Ambiental – Usina Termo Elétrica José de Alencar. 2009
22. GREENER, estudo estratégico mercado fotovoltaico de geração distribuída 2º semestre de 2020, 2020.
23. GSA. Geo Soluções Ambientais. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA COMPLEXO UFV APODI I A IV. 2016.
24. GUO Q; K KLUSE C. A framework of photovoltaics recycling facility location optimization. *Sustainable Production and Consumption*. 23 p. 105-110. 2020.
25. GUO Q; KLUSE. C. Development of the Photovoltaics Recycling Network. *Advanced Energy Conversion Materials*. p. 25-29. 2020.
26. HRALA, J. This Solar Plant Accidentally Incinerates Up to 6,000 Birds a Year. Science Alert. Nature. 15 set. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencealert.com/this-solar-plant-accidentally-incinerates-up-to-6-000-birds-a-year>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
27. HEAVNER B; CHIARO. B. Renewable Energy and Jobs: Employment Impacts of Developing Markets for Renewables in California. Environment California Research and Policy Center. 2011.
28. INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017. Disponível em: <<http://labren.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 24 mar de 2021.
29. IRENA. International Renewable ENergy Agency. End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels. 2106
30. KABIR Z; KHAN. I. Environmental impact assessment of waste to energy projects in developing countries: General guidelines in the context of Bangladesh. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. v. 37 pag. 613-619. 2020.

31. LI D. et al. Numerical assessment of a hybrid energy generation process and energy storage system based on alkaline fuel cell, solar energy and Stirling engine. *Jounal of Energy Storage*. v. 39. 2021
32. LOMBARDI L. Life cycle assessment comparison of technical solutions for CO2 emissions reduction in power generation. *Energy Conversion and Management*. v.4 p. 93-108. 2003.
33. MAHMOUDI. S, et al. End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 146, p.1-16, 2019.
34. MARIANI L. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. 2018
35. MOTA, S. Introdução à engenharia ambiental. 6 ed. Rio de Janeiro: Expressão Gráfica, 2016.
36. NREL. National Renewable Energy Laboratory. Best Practices Guide for Photovoltaic System Operations and Maintenance, 3<sup>a</sup> edição, 2018. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73822.pdf>>. Acesso em 21 de mar. 2021.
37. MOSKOWITZ, P. D. et al. Photovoltaic energy systems: environmental concerns and control technology needs. Brookhaven National Lab. 1982. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/6492960>>. Acesso em: 30 de mar. 2021.
38. OLIVEIRA, F. F. G, et al. Bases teórico-conceituais de métodos para avaliação de impactos ambientais em EIA/RIMA, *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, anos 06, n. 11, 2007.
39. PASICKO, R. et al. Assessment of climate change impacts on energy generation from renewable sources in Croatia. *Renewable Energy*. v. 46. pag 224-231. 2012.
40. PARANÁ. Instituto Ambiental do Paraná. Portaria nº 19, 06 de fevereiro de 2017. Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar em superfície terrestre, nos termos que especifica.
41. PETRIE J. et al. Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites. *Renewable Energy*. v. 63, p. 393-401, 2014.

42. PÖYRY J. 13-011-Ejpe-1800 RIMA - Estudo de impacto ambiental. 2011
43. RIBEIRO F. S. G. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production* v. 18, p. 44-54, 2010.
44. SADÉ K. *et al.* Life cycle assessment of a floating photovoltaic system and feasibility for application in Thailand. *Renewable Energy*. v.168.pag 448-462. 2021
45. São Paulo. Secretaria do Estado do Meio Ambiente. Resolução Normativa nº 74 de 04 de agosto de 2017. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica.
46. SILVA, G. D. P, *et al.* 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.
47. SILVA, G. D. P, *et al.* A multicriteria proposal for large-scale solar photovoltaic impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*. v. 38, n.1, p.3-15, 2020.
48. SMA. Performance Ratio, Factor de qualidade para o sistema fotovoltaico. versão 1.1. Disponível em: <<https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-pt-11.pdf>>. Acesso em: 24 mar. de 2021.
49. WBG. World Bank Group, Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants: A Project Developer's Guide, 2015.
50. WIEDMANN T. S. S. *et al.* Application of hybrid life cycle approaches to emerging energy technologies--the case of wind power in the UK. *Environmental Science e Tecnology*. V. 45 p. 5900-5907. 2011