

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE
DO NORTE

JOHNSON SILVA SANTANA

**DESCOMISSONAMENTO DE EMPREENDIMENTOS GERADORES DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE FONTE SOLAR: UMA ESTIMATIVA DE VOLUME DE
POTÊNCIA OUTORGADA A SER DESCOMISSONADA NO RN**

NATAL

2023

JOHNSON SILVA SANTANA

**DESCOMISSIONAMENTO DE EMPREENDIMENTOS GERADORES DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE FONTE SOLAR: UMA ESTIMATIVA DE VOLUME DE
POTÊNCIA OUTORGADA A SER DESCOMISSIONADA NO RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, na Linha de Sustentabilidade e Gestão de Recursos Naturais, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. André Luiz Lopes Toledo.

NATAL

2023

Santana, Johnson Silva.

S232d Descomissionamento de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar : uma estimativa de volume de potência outorgada a ser descomissionada no RN / Johnson Silva Santana. – 2023.
109 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

Orientador: Dr. André Luiz Lopes Toledo.

1. Energias renováveis. 2. Descomissionamento - Parques solares. 3. Reciclagem - Painéis fotovoltaicos. 4. Potencial - Geração - Receita. I. Título.

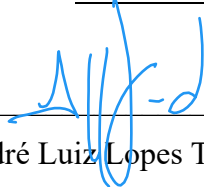
CDU 620.91

JOHNSON SILVA SANTANA

**DESCOMISSONAMENTO DE EMPREENDIMENTOS GERADORES DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE FONTE SOLAR: UMA ESTIMATIVA DE VOLUME DE
POTÊNCIA OUTORGADA A SER DESCOMISSIONADA NO RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPgUSRN), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, na Linha de Sustentabilidade e Gestão de Recursos Naturais, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Dissertação aprovada em 20/03/2023 pela seguinte Banca Examinadora:



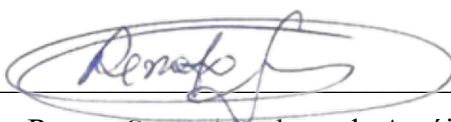
André Luiz Lopes Toledo, Dr. – Orientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Gabriel Constantino de Lima, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Renato Samuel Barbosa de Araújo, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

Ao Alfa e o Ômega, o Primeiro e o Último, o Princípio e o Fim.

RESUMO

Os impactos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis, bem como suas limitações de produção e os altos custos financeiros associados à crescente demanda energética, impulsionam a busca por alternativas mais econômicas, ecológicas e socialmente responsáveis. Nesse cenário, as fontes renováveis de energia têm ganhado protagonismo nas matrizes energéticas mundiais, com destaque para a crescente participação da energia solar e eólica. A rápida expansão da indústria fotovoltaica baseada em incentivos fiscais, sem uma política pública de educação ambiental e gerenciamento de resíduos sólidos, principalmente de equipamentos eletrônicos, se traduzirá em uma grande quantidade de resíduos descartados de forma inadequada, gerando risco à saúde pública e ao meio ambiente nos próximos anos. Considerando a expectativa de vida útil de 25 anos para os empreendimentos geradores de energia elétrica, a partir de fonte solar no Estado do RN, se traçou dois cenários para estipular o volume de potência elétrica outorgada a serem descomissionadas nos períodos de 2039 a 2047 e de 2048 a 2051. As estimativas apontam que até o ano de 2047 serão descomissionados um valor de aproximadamente 367 MW de potência de energia outorgada. Outros resultados indicam que entre os anos de 2048 e 2051, os volumes de potência de energia outorgada provenientes de empreendimentos de geração de energia, a partir de fonte solar a ser descomissionado podem exceder a marca de 7 GW. Dessa forma, a reciclagem de módulos fotovoltaicos tem se apresentado como uma alternativa para mitigação dos riscos, visto que em cada Watt-pico (Wp) descomissionado gerará 0,058 kg de resíduos sólidos, resultando em aproximadamente 58 toneladas (t) por Megawatt (MW) descomissionado, com destaque para as quantidades produzidas de vidro (40,60 t), alumínio (10,44 t) e cobre (1,16 t) e potencial de geração de receita estimado de US\$ 35.412,64 por MW a ser descomissionado.

Palavras-chave: energias renováveis; descomissionamento de parques solares; reciclagem de painéis fotovoltaicos; potencial de geração de receita.

ABSTRACT

The environmental impacts resulting from the burning of fossil fuels, as well as their production limitations and the high financial costs associated with the growing energy demand, drive the search for more ecological, ecological, and socially responsible alternatives. In this scenario, renewable energy sources have gained prominence in the world's energy matrices, with emphasis on the growing share of solar and wind energy. In the comes years, the rapid expansion of the photovoltaic industry based on tax incentives, without a public policy of environmental education and management of solid waste, mainly electronic equipment, will turn into a large amount of accidentally discarded waste, generating public health and the environment. Considering a useful life expectancy of 25 years for undertakings generating electricity from solar sources in the State of RN, two scenarios were outlined to stipulate the volume of outsourced electrical power to be decommissioned in the periods from 2039 to 2047 and from 2039 to 2047. 2048 to 2051. Perspectives indicate that by the year 2047, approximately 367 MW of granted power will be decommissioned. Other results indicate that between the years 2048 and 2051, the volumes of the power of energy granted from energy generation projects, from a solar source to be deactivated, may exceed the 7 GW mark. In this way, the recycling of photovoltaic modules has been presented as an alternative to mitigate risks, since each decommissioned Watt-peak (Wp) will generate 0.058 kg of solid waste, generated in approximately 58 tons (t) per Megawatt (MW) decommissioned, with emphasis on glasses made of glass (40.60 t), aluminum (10.44 t) and copper (1.16 t) and estimated revenue generation potential of US\$ 35,412.64 per MW to be decommissioned.

Keywords: renewable energy; decommissioning of solar farms; recycling of photovoltaic panels; revenue generation potential.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO DA PESQUISA	10
1.3 JUSTIFICATIVA	11
1.4 OBJETIVO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 ENERGIA RENOVÁVEL	14
2.1.1 Energia solar	14
2.2 CICLO DE VIDA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	15
2.3 DESCOMISSIONAMENTO DE EMPREENDIMENTOS DE ENERGIA SOLAR....	18
2.4 RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	20
2.5 LICENCIAMENTO AMBIENTAL E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	21
4 METODOLOGIA.....	25
4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	25
4.1.1 Classificação quanto à natureza.....	25
4.1.2 Classificação quanto à abordagem.....	25
4.1.3 Classificação quanto aos procedimentos metodológicos	25
4.1.4 Classificação quanto aos objetivos	26
4.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS PARA COLETA DOS DADOS E ELABORAÇÃO DO MAPEAMENTO	26
4.2.1 Coleta dos dados	26
4.2.2 Elaboração dos mapeamentos	27
4.2.2.1 Criação das estimativas do tempo de licenciamento e construção dos empreendimentos.....	28
4.2.2.2 Criação das hipóteses de estimativa do volume de energia a ser descomissionado.....	28

4.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA CÁLCULO DA ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE MATERIAIS RECUPERADOS ORIUNDOS DO PROCESSO DE DESCOMISSIONAMENTO	31
4.3.1 Cálculo da estimativa da quantidade de módulos fotovoltaicos.....	32
4.3.2 Estimativa da quantidade de material recuperado	32
4.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA CÁLCULOS DE GERAÇÃO DE RECEIRAS FINANCEIRAS A PARTIR DA ATIVIDADE DO DESCOMISSIONAMENTO	35
4.5 PRODUTO TECNOLÓGICO	35
4.5.1 Report Descomissionamento de Empreendimentos Geradores de Energia Elétrica a partir de Fonte Solar no Estado do RN: Desafios e Oportunidades	35
5 RESULTADOS	36
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS	42
ANEXO A - MAPEAMENTO DA ESTIMATIVA DO VOLUME DE POTÊNCIA ELÉTRICA OUTORGADA A PARTIR DE FONTE SOLAR, A SER DESCOMISSIONADA NAS PRÓXIMAS DÉCADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE.....	50
ANEXO B – REPORT DESCOMISSIONAMENTOS DE EMPREENDIMENTOS GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA, A PARTIR DE FONTE SOLAR NO ESTADO DO RN: DESAFIOS E OPORTUNIDADES.....	53

1 INTRODUÇÃO

Esta seção apresenta a contextualização do tema, o problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os impactos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis, assim como, as suas limitações de produção e os altos custos financeiros associados à crescente demanda energética tem impulsionado a busca por alternativas mais econômicas, ecológicas e socialmente responsáveis. Neste cenário, as fontes de energias renováveis têm ganhado protagonismo nas matrizes energéticas mundiais, com destaques para as crescentes participações da energia solar e eólica. A nova rota de desenvolvimento internacional, aprovada na solene 70ª Assembleia Geral das Nações Unidas em setembro de 2015, firmada por 193 chefes de Estados e Governos mundiais, denominado Objetivos do Desenvolvimento Sustentáveis (ODS), tornou-se o ponto de referência fundamental para o desenvolvimento global até o ano de 2030 (GIL, 2018). Dentre os ODS, destaque-se os de números 7 – Energia Limpa e acessível, que estimula que até o ano de 2030, deve-se aumentar de forma considerável a participação de energias renováveis nas matrizes energéticas mundiais.

De acordo com o World Energy Outlook 2022, ao longo do ano de 2021, as emissões mundiais de gases do efeito estufa, em especial o dióxido carbono (CO₂) alcançou um crescimento recorde alcançando 36,6 Giga toneladas, após uma breve redução devido ao panorama pandêmico ocasionado pela pandemia do vírus SARS-CoV-2 ao decorrer do ano de 2020.

No Brasil, as fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável, sendo 53,4% de fontes hidráulicas, 10,6% eólicas, 8,2% biomassas e 2,5% solares (BEN, 2022). A expansão da oferta de energia renovável no Brasil está associada diretamente as contratações de demanda energética realizadas através de leilões de energia gerenciados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), uma autarquia sob regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME). Assim como, a abundância da energia radiante do sol, enormes extensões de áreas degradadas, ou de

baixo valor econômico, e um sistema elétrico interligado (BRASIL, 2017), favorecem a criação de usinas solares modulares de pequeno, médio e grande porte.

Neste contexto, a rápida expansão da indústria fotovoltaica baseada em incentivos fiscais, sem uma política pública de educação ambiental e gestão de resíduos sólidos, oriundos de equipamentos eletrônicos, se traduzirá em uma elevada quantidade de resíduos descartados de forma inadequada gerando risco à saúde pública e ao meio ambiente nos próximos anos. Conforme afirma Xu *et al.* (2018), os próprios painéis apresentarão uma outra questão ambiental: quando sua vida útil terminar, eles se tornaram uma forma perigosa de lixo, pois como os painéis solares possuem uma longa vida útil, a reciclagem deste tipo de resíduos não era uma preocupação durante os primeiros 25 anos de desenvolvimento desta indústria.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO DA PESQUISA

Os painéis fotovoltaicos são constituídos por um agrupamento de células fotovoltaicas, são compostos por preciosos e cancerígenos metais: cádmium (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), prata (Ag), selênio (Se) e telúrio (Te) (SICA *ET AL.*, 2018). Além de que possuem em sua composição os minerais como, estanho (Sn) e silício (Si), revestimentos de camadas de vidro, a qual desempenha o papel de camada protetora das fotocélulas e moldes de suporte em geral feito de alumínio (Al). Assim, ao serem descartados de maneira inadequada ou depositados em aterros sanitários, os painéis podem sofrer processos de lixiviação dos metais pesados, infiltrando os resíduos tóxicos no solo ou contaminando corpos d'água, caso não tomadas as devidas precauções, os tornando inadequados para o consumo humano ou desenvolvimento de atividades econômicas.

Em escala global, os países mais desenvolvidos, tem observado com preocupação as crescentes taxas de geração de resíduos e começaram a desenvolver pesquisas, assim como legislar sobre políticas públicas que apresentam diretrizes para resolução ao menos que parcial desta problemática, a exemplo, os países-membros da União Europeia (EU), com promulgação da diretiva 2012/19/22 – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) do Parlamento Europeu. Assim como, os Estados Unidos da América (EUA), que possuem legislações federais e estaduais que obrigam os proprietários de projetos de plantas solares a apresentarem um plano de descomissionamento, bem como os custos contidos nele para que possam obter as autorizações (de construções e operações) para prosseguirem com os projetos a serem desenvolvidos.

No Brasil, esta questão ainda é pouco abordada, conseqüentemente pouco explorada, os estudos existentes partem do princípio da viabilidade técnica da reciclagem dos painéis fotovoltaicos em escala laboratorial, a exemplo dos estudos desenvolvidos sobre a Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos (Painéis Solares) (DIAS, 2015), Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais (PRADO, 2018) e Reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino: separação e concentração de materiais (CAMARGO, 2021).

O Estado do Rio Grande do Norte, tem demonstrado um potencial de expansão da oferta de energia gerada a partir de fonte solar, ocupando a quarta posição em potência outorgada colocação entre os estados brasileiros com maior número de empreendimentos, atualmente existem 179 empreendimentos, em operação, construção ou com obras não iniciadas, totalizando mais de 7 Gigawatts de energia a serem produzidas a partir deste tipo de fonte. Porém, o Estado não possui diretrizes que abordam o descomissionamento dos empreendimentos ao final da sua vida útil ou atribui as responsabilidades deste processo as partes interessadas.

Diante da contextualização apresentada, questiona-se qual será a estimativa de geração de resíduos sólidos provenientes de equipamentos eletroeletrônicos de empreendimentos de geração de energia a partir de fonte solar para os próximos anos no Estado do Rio Grande do Norte? E quais seriam os benefícios financeiros que o Estado do RN poderia alcançar com a reciclagem dos painéis fotovoltaicos?

1.3 JUSTIFICATIVA

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 em seu artigo 225, § 1º, inciso IV, exige, na forma da lei, que para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, haja estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade. Como também, as resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA): 1/1986, 6/1987, 9/1987, 237/1997, 279/2001, as quais dispõem sobre a regulamentação da lei federal e estabelece diretrizes para a realização dos processos de estudos e licenciamentos ambientais de empreendimentos do setor elétrico. Todavia, não abordam de forma clara o tema de descomissionamento dos empreendimentos produtores de energia solar.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010, estabelece as diretrizes, responsabilidades,

princípios e objetivos que norteiam os diferentes participantes na implementação da gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, sendo um dos grandes desafios à gestão ambiental urbana nos municípios brasileiros na atualidade (BRASIL, 2020). Ela classifica os resíduos em cinco categorias, de acordo com sua origem e perigosidade, sendo Resíduos Sólido Urbano (RSU), Resíduo da Construção Civil (RCC), Resíduos Hospitalares (RH), Resíduos Industriais (RI) e Resíduos Nucleares (RN), institui a criação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, bem como o Sistema de Logística Reversa (SLR).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, também traz luz sobre um acordo setorial para implementação do sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes, visando estruturar, implementar e operacionalizar o sistema nacional. Assim como, o Decreto Presidencial de nº 10240, de 12 de fevereiro de 2020, estabelece as normativas para a implementação de sistema de logística reversa obrigatória de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes de abrangência nacional. Porém, não abordam os equipamentos eletroeletrônicos com fins de desenvolvimento de atividades econômicas, evidenciando a ausência da temática nas políticas públicas.

Nesse cenário, o Estado do Rio Grande do Norte, tem se destacado na geração de energias renováveis, com produções superiores estimadas a 7 GWh (RIO GRANDE DO NORTE, 2022), tornando o setor de energia uma das atividades econômicas vocacionais para o Estado. Atualmente, existem 179 empreendimentos produtores de energia a partir de solares, 18 em operação, 13 em construção e 148 com obras não iniciadas. conseqüentemente haverá um aumento na geração de resíduos sólidos oriundos de equipamentos eletroeletrônicos nos próximos anos. Logo, se faz necessário o estudo de alternativas para gestão dos resíduos sólidos provenientes do descomissionamento dos empreendimentos que alcançaram a sua vida útil. Dessa forma, a pesquisa trará contribuições para área acadêmica e segmento estudado:

- a) **Contribuição para área acadêmica:** o estudo contribuirá com a pesquisa na temática de descomissionamento de parques solares no Estado do Rio Grande do Norte, visto que abordagem do assunto no cenário acadêmico norte-rio-grandense apresenta lacunas;
- b) **Contribuição para área ambiental:** o levantamento apontará a estimativa de geração de resíduos, trazendo luz sobre seus efeitos negativos e possibilidades de planejamento de políticas públicas que podem evitar ou minimizar a geração de passivos ambientais nos próximos anos no Estado do Rio Grande do Norte;

- c) **Contribuição social:** o estudo demonstrará o potencial econômico de geração de receitas do desenvolvimento de uma nova atividade econômica (reciclagem de painéis solares), a qual poderá resultar na geração de emprego e renda.

1.4 OBJETIVO

Nesta seção, visando a consumação em plenitude do desenvolvimento da pesquisa e investigação da problemática evidenciada, foi delimitado como objetivo geral é criar o panorama do descomissionamento de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar, assim como o cenário de geração de resíduos sólidos provenientes deste tipo de empreendimento no Estado do Rio Grande do Norte. Neste contexto, pretendendo aprofundar o objetivo geral, se delimitou os objetivos específicos em:

- a) Identificar os principais tipos de resíduos sólidos gerados pelo descomissionamento de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar;
- b) Quantificar o volume de geração de resíduos sólidos para os próximos anos provenientes do descomissionamento de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte solar implantadas ou licenciadas;
- c) Avaliar o potencial econômico de geração de receitas para o Estado do Rio Grande do Norte com a implementação de uma política de reciclagem de painéis fotovoltaicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, encontra-se uma revisão sistemática sobre a produção de energia renovável, com ênfase em energia solar, ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, descomissionamento de empreendimentos de produção de energia solar e reciclagem de módulos fotovoltaicos.

2.1 ENERGIA RENOVÁVEL

Energia renovável é qualquer forma de energia de fontes solares, geofísicas ou biológicas que é reabastecida por processos naturais a uma taxa igual ou superior à sua taxa de utilização. A energia renovável é obtida a partir da continuação ou fluxos repetitivos de energia que ocorrem no ambiente natural e inclui recursos como biomassa, energia solar, calor geotérmico, energia hidrelétrica, marés, ondas, energia térmica, oceânica e energia eólica. Assim, os combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural) não se enquadram nesta definição, uma vez que não são reabastecidos dentro de um prazo curto em relação à sua taxa de utilização (CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012).

2.1.1 Energia solar

A radiação solar é a luz que também é conhecida como radiação eletromagnética emitida pelo sol. Embora, todos os locais da terra recebam luz solar ao longo do ano, a quantidade de radiação solar que atinge cada ponto da superfície da Terra varia. Logo, as tecnologias solares capturam essa radiação e a transforma em formas úteis de energia, como calor e eletricidade (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2022).

2.1.1.1 Tecnologias empregadas na geração de energia solar

Os painéis solares podem ser classificados em três gerações: primeira geração, silício cristalino (monocristalino ou policristalino). Segunda geração, filme fino (silício amorfo, telureto de cádmio ou CIGS, composto por cobre, índio, gálio, seleneto) e terceira geração, concentradores fotovoltaicos e tecnologias emergentes (painéis solares concentradores, os

CPV, painéis solares sensibilizados por corantes, painéis solares orgânicos e painéis híbridos). Como os painéis de silício monocristalino e policristalino possuem uma maior eficiência de conversão do que o filme fino, eles são atualmente os materiais comerciais de painéis solares mais usados. Até 2012, os painéis de silício cristalino representavam cerca de 90% do mercado fotovoltaico global, enquanto os painéis solares de terceira geração ainda não foram comercializados em larga escala (XU *ET AL.*, 2018).

- a) **Primeira geração:** são compostos por células monocristalinas e/ou multicristalinas que possuem a mesma matéria-prima, um substrato de silício de alta pureza (99,999% ou 9N) dopado com boro, para o semicondutor tipo-p¹, e dopado com fósforo, para o semicondutor tipo-n² (LATUNUSSA *ET AL.*, 2016).
- b) **Segunda geração:** as células solares são preparadas por deposições de filmes finos em diferentes substratos, como vidro, metal ou plásticos. Existem vários materiais que são utilizados nas células solares de segunda geração. Os mais comuns são o silício amorfo (a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) e as ligas de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) (MARQUES, 2014).
- c) **Terceira geração:** as células permitem uma utilização mais eficiente da luz solar do que as células baseadas em um único band-gap³ eletrônico. De forma geral, a terceira geração deve ser altamente eficiente, possuir baixo custo/watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade (ELY; SWART, 2014).

2.2 CICLO DE VIDA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O ciclo de vida de um produto são estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produção, desde aquisição da matéria-prima até a deposição final. Enquanto, avaliação do ciclo de vida (ACV), consiste em avaliar os potenciais impactos ambientais ao longo do sistema produtivo (ABNT, 2014).

Conforme Gahlot, Mir & Dhawan (2022) e IRENA (2016) o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos é composto por três macro fases: produção (extração/processamento de metais raros, fabricação dos painéis), construção/operação (instalações, comissionamento e operação dos empreendimentos geradores de energia) e fim do ciclo de vida (descomissionamento ou

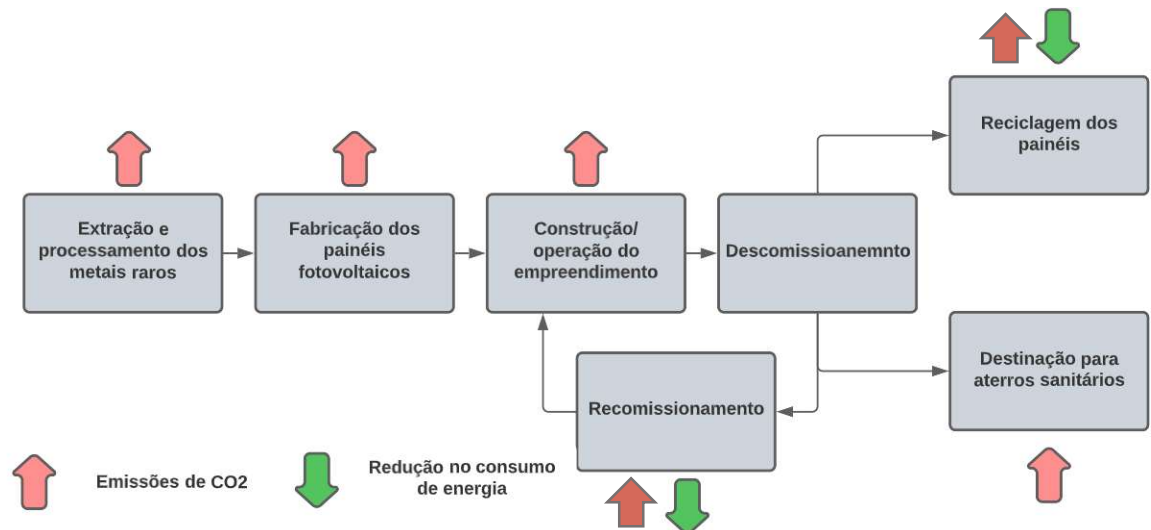
¹ São semicondutores que possuem impurezas que facilitam o recebimento de elétrons.

² São semicondutores que possuem impurezas que facilitam a doação de elétrons.

³ É a quantidade de energia necessária para o elétron realizar a transição de camada.

recomissionamento e reciclagem ou destinação dos resíduos para aterros sanitários). Conforme ilustrado na Figura 1 – Ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos.

Figura 1 – Ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos



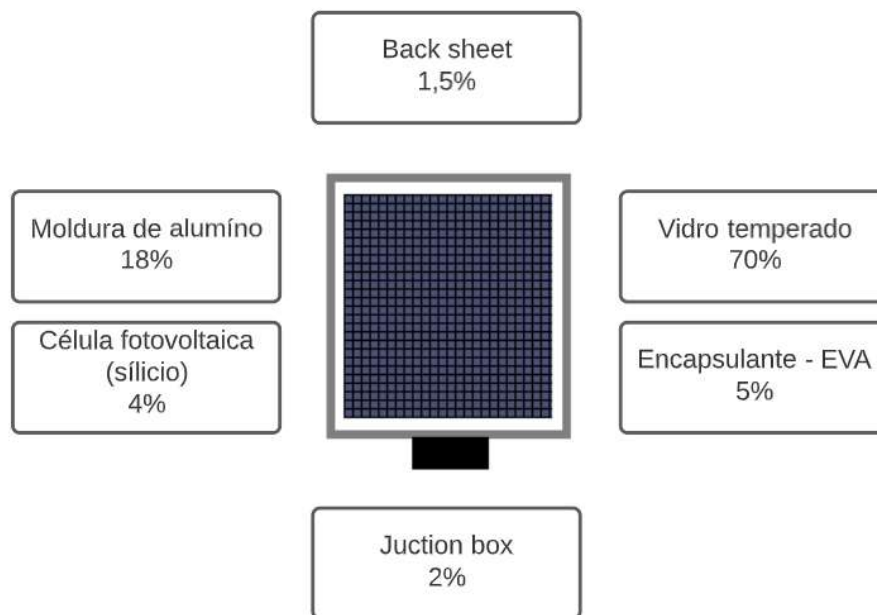
Fonte: Adaptado de Gahlot, Mir; Dhawan (2022) & IRENA (2016)

Atualmente o mercado de painéis fotovoltaicos é dominado por produtos que possuem células fotovoltaicas fabricadas a partir do silício (de primeira e segunda geração), alcançando uma participação de mais de 80% no mercado mundial (YADAV; PANDEY; BHATT; KUMAR; KIM, 2017). Os painéis normalmente são compostos por 6 partes, moldura de alumínio (frame) que desempenha como principal função o suporte a estrutura dos módulos, camada de vidro temperado, a qual funciona como camada protetora contra intempéries, camada encapsulante de acetato-vinilo etileno (EVA), que protege as células fotovoltaicas contra o envelhecimento precoce provocado pela radiação dos raios ultravioletas (UV), células fotovoltaicas de silício encarregadas pelo processo transformação de energia térmica solar em energia elétrica, backsheet que é uma camada de plástico responsável por manter o isolamento término nos painéis e a junction box (caixa de junção), a qual é provida de cabos elétricos utilizados no escoamento da energia produzida.

Em estudos realizados, Ziemińska-Stolarska; Pietrzak; Zbiciński (2021), estimaram a quantidade percentual que cada uma das partes descritas anteriormente representa no peso total dos painéis após o processo de reciclagem. Nesta conjuntura, a camadas de vidro temperado corresponde a aproximadamente 70%, da moldura de alumínio 18%, a proteção encapsulante

EVA 5%, as células fotovoltaicas 4%, os cabos condutores (junction box) 2% e o backsheet 1,5%. A Figura 2 – Camadas constituintes e percentagens de participação no peso total dos painéis fotovoltaicos, apresenta as informações descritas de forma esquematizada para melhor compreensão.

Figura 2 – Camadas constituintes e percentagens de participação no peso total dos painéis fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de ZIEMIŃSKA-STOLARSKA; PIETRZAK; ZBICIŃSKI (2021)

Dentre as camadas constituintes dos painéis fotovoltaicos destaca-se as camadas geradoras de maiores passivos ambientais, a camada de vidro temperado, a moldura de alumínio, as células fotovoltaicas e a junction box, constituídas predominantemente pelos respectivos minerais: silício, alumínio, silício e cobre.

O processo de fabricação do silício (Si) é efetuado através da redução carbotérmica do quartzo (dióxido de silício), resultando na emissão de CO, que sofre o processo de oxidação ao entrar em contato com ar, transformando-se em CO₂ (dióxido de carbono), em proporções aproximada de 4,2 kg de CO₂ por kg de silício produzido (SUZUKI; PEREIRA, 2003).

No Brasil, a média de emissões do processo de produção de alumínio primário é de 2,7 t de CO₂eq por tonelada de alumínio (XAVIER, 2012). Em relação ao cobre, o aumento da industrialização tem elevado a sua demanda por possuir excelentes capacidade condutora, ao mesmo tempo que a concentração do minério nas jazidas tem diminuído. Nos anos de 1900,

quando a concentração era de 3%, a cada tonelada de minério de cobre se produziam 240 kg de cobre concentrado, enquanto atualmente a concentração está em 0,7%, com a mesma quantidade se produz somente 7 kg de cobre concentrado, assim como determinados processos produtivos podem emitir até 20 toneladas de CO₂e (dióxido de carbono equivalente) por tonelada de Cu produzidas (MARQUET; BERTHOUD; COMBAZ, 2019; BRASIL MINERAL, 2021).

2.3 DESCOMISSIONAMENTO DE EMPREENDIMENTOS DE ENERGIA SOLAR

De acordo com o Houaiss (2015), descomissionar é o ato de desativar ou desmantelar. Este processo requer um método detalhado e ponderado com diversas áreas da engenharia (ambiental, financeira e segurança do trabalho), política e bem-estar social (FGV ENERGIA, 2022, p.10).

Neste contexto, o mercado global de energia solar tem experimentado um crescimento exponencial na última década. Enquanto a indústria se expande, a reciclagem de módulos fotovoltaicos se torna importante para gerenciar a grande quantidade de resíduos futuros no fim do ciclo de vida e conservar matéria-prima para uso em novos módulos solares (SINHA *ET AL.*, 2014).

Em uma análise inicial, os custos para disposição dos módulos solares em aterros sanitários se demonstraram menor do que os custos de reciclagem, tornando assim a solução do aterro economicamente viável para empresas com planejamento estratégico de curto prazo. Apesar da reciclagem ser lucrativa de maneira geral e a disponibilização de programas gratuitos de destinação dos módulos oferecidos por algumas empresas, à medida que o volume de resíduos fotovoltaicos cresce, estes programas podem se tornarem insustentáveis, se fazendo necessário a responsabilização dos produtores, principalmente dos módulos a base de Silício para garantir que materiais perigos sejam descartados adequadamente (MC DONALD; PEARCE, 2010).

Em 2050, estima-se que o mundo produzirá entre 60 e 78 milhões de toneladas de resíduos sólidos oriundos de painéis fotovoltaicos que estão no fim do ciclo de vida. O crescimento deste resíduo apresenta um novo desafio ambiental, mas também oportunidades sem precedentes para se criar valor e novos caminhos econômicos. Os setores como a da reciclagem fotovoltaica serão essenciais na transição do mundo para um futuro energético sustentável, economicamente viável e cada vez mais baseado em energias renováveis.

Estimativas preliminares sugerem que a matéria-prima recuperada dos painéis fotovoltaicos pode movimentar valores superiores a 450 milhões de dólares americanos (US\$) no período entre 2016 e 2030. No ano de 2050, a expectativa é que esse valor acumulado recuperável possa ultrapassar US\$ 15 bilhões (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Assim, métodos de reciclagem de módulos solares estão sendo desenvolvidos em todo o mundo para reduzir o impacto ambiental dos módulos no fim da vida útil e recuperar parte do valor dos antigos módulos. No entanto, os métodos de reciclagem atuais baseiam-se principalmente em processos de downcycling⁴, recuperando apenas uma parte dos materiais e do valor, então há muito espaço para avançar nesta área. Além disso, atualmente apenas a Europa dispõe de um quadro regulamentar forte para apoiar a reciclagem, mas outros países estão começando a construir estruturas específicas relacionadas ao desperdício de módulos fotovoltaicos. É claro que o desenvolvimento sustentável da indústria fotovoltaica deve ser apoiado por estruturas regulatórias e instituições em todo o mundo, o que não é o caso no momento. Deve haver políticas de gerenciamento adequadas para os módulos fotovoltaicos quando atingem seu fim de vida ou quando não puderem mais produzir eletricidade (LARDINE *ET AL.*, 2018).

Nos Estados Unidos, as políticas federais e estaduais se aplicam normalmente aos projetos em escala de utilidade e obrigam a conformidade com os requisitos regulamentadores ao longo da vida útil do projeto. A maioria das políticas de descomissionamento de empreendimentos solares nos EUA estão vinculados a uma licença ou aprovação necessária para o desenvolvimento inicial do projeto, normalmente como condição de aprovação. Algumas jurisdições, exigem uma estimativa de custo de descomissionamento e/ou a apresentação de um plano de descomissionamento antes da construção do projeto. As políticas de descomissionamento também podem exigir garantias financeiras para o descomissionamento e conformidade com requisitos registrados em relatórios ao longo da vida do projeto. Nas desativações, as políticas também exigem a conformidade com atividades de desempenho específicas, incluindo a remoção de todos os equipamentos de produção de energia solar, restauração do local e recuperação (por exemplo, requalificação do solo, revegetação, replantio, remoção de vias de acesso). Os proprietários de empreendimentos também podem estar sujeitos a penalidades civis por descumprimento de algumas políticas estaduais de desativação (ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, 2021).

⁴ É o processo de recuperação do material para reuso em produtos com menor valor agregado. Neste processo, a integridade do material é pode ser comprometida.

No cenário brasileiro, a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) instituída pela Lei 6.038/81 da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) é amplamente empregada, alcançando atividades que, significativamente, impactam o meio ambiente. Nestas circunstâncias, ainda através da PNMA, o licenciamento ambiental pretende nortear os procedimentos da AIA por meio de regulamentos do órgão licenciador. Desta forma, os estados brasileiros possuem um quadro institucional peculiar às suas características geoambientais e socioeconômicas, complementando os regulamentos e procedimentos instituídos pela União (MONTAÑO; SOUZA, 2015 apud SILVA JUNIOR; ALVAREGA; GARCIA, 2018).

Alguns setores brasileiros estão buscando alinhamentos com o desenvolvimento sustentável através da regulamentação, outros permanecem na inércia, como o setor de produção de energia a partir de fonte solar. Nesse sentido, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP):

Estabelece o Regulamento Técnico de Descomissionamento de Instalações de Exploração e de Produção, bem como disciplina o descomissionamento na cessão de contratos, a inclusão de área terrestre sob contrato na fase de produção em processo de licitação, a alienação e a reversão de bens, o cumprimento de obrigações remanescentes na fase de exploração e a devolução de área na fase de produção) (ANP, 2021).

2.4 RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A mineração e processamento de minérios causam restrições econômicas e criar poluição ambiental. Reciclagem de metais de fontes secundárias é a maneira mais plausível de reutilizar metais já extraídos e ajudar a atingir um equilíbrio entre oferta e demanda (CHAKANKAR; SU; HOCHENG, 2018). Nesta conjuntura, a reciclagem de painéis fotovoltaicos se apresenta como uma alternativa para solucionar esta problemática, demonstrando sua viabilidade técnica e econômica em processos experimentais em escala reduzida.

Chen *et Al.* (2020) propuseram em seu estudo um processo de recuperação de silício e prata de células fotovoltaicas por hidrometalurgia, com duas etapas de lixiviação (ácida e alcalina), alcançando taxas de recuperação de 99,5% para o Si, 98% para Ag e Si. Tao e Yu (2015), também corroboram que vários processos químicos e mecânicos têm sido propostos para ser viável a recuperação de metais valiosos com alto grau de pureza, dentre eles: filtração, centrifugação, separação por transferência de fase, eletroforese e sedimentação gravitacional, lixiviação.

Outro método que tem se demonstrado potencialmente viável na reciclagem de metais é a fragmentação eletrohidráulica para facilitar a separação e recuperação de metais de PV módulos, Nevala *et al.* (2019) afirma que em particular, o desmantelamento de painéis fotovoltaicos usando a tecnologia de ondas de choque fornece mais seletividade ao concentrar o alvo em metais de frações granulométricas específicas. Este enriquecimento de metais dentro de certas frações aumenta as perspectivas de recuperação de metal já que os materiais de maior concentração facilitam sua posterior processamento e extração através de processos industriais atuais.

Vale ressaltar que diferentes tipos de metais contidos nos módulos dos painéis solares enfrentam desafios específicos de reciclagem, que por sua vez influenciam seus rendimentos na reciclagem, os rendimentos reais da reciclagem estão fortemente relacionados com o valor econômico do metal recuperado (DOMÍNGUEZ; GEYER, 2017). Programas eficientes de coleta e devolução são vitais para garantindo que os módulos serão tratados adequadamente, muitos outros aspectos além de falhas técnicas, devem ser levados em consideração na modelagem de projetos, por exemplo o fluxo de geração de resíduos, assim os módulos desativados podem destinado para reciclagem, contribuindo com recuperação de materiais, mas também podem ser reconicionados para reutilização prolongando sua vida útil (MARWEDE; RELLER, 2012).

2.5 LICENCIAMENTO AMBIENTAL E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Uma forma de minimizar os danos ambientais é a criação de políticas públicas de gerenciamento adequadas para os módulos fotovoltaicos quando atingem o fim da vida útil ou não puderem mais produzir eletricidade (LARDINE *ET AL.*, 2018). Neste contexto, diversas políticas públicas têm sido desenvolvidas no mundo, a exemplo da União Europeia com a promulgação da diretriz sobre reciclagem de resíduos oriundos de equipamentos eletroeletrônicos, no ano de 2012 e a Política Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos, promulgada pelo Brasil no ano de 2010. O ponto notável é que as políticas energéticas são adotadas e implementadas de forma idêntica para todas as partes dos países que têm um governo unitário. Em outras palavras, as capacidades socioeconômicas e as características geográficas das diferentes regiões do país não são levadas em consideração nos processos de formulação de políticas energéticas (HAFEZNIA; ASLANI; ANWAR; YOUSEFJAMALI, 2017), assim como as políticas de gestão de resíduos sólidos, na qual áreas mais industrializadas com melhores infraestruturas, apresentam vantagens competitivas sobre as demais.

2.5.1 Legislação internacional: Diretiva 2012/19/EU

Em 4 julho de 2012, o Parlamento Europeu e o Conselho aprovaram a criação da Diretriz relativa aos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), atribuindo responsabilidade e obrigações a cada membro participante do ciclo de vida destes produtos, sejam eles os produtores (quem produz os equipamentos), os distribuidores (quem distribui ou possui os direitos sobre os canais de distribuição dos equipamentos) e os consumidores (quem adquire os equipamentos). Em seu art. 4, a política cita que os Estados-Membros devem incentivar a cooperação entre produtores e operadores de instalações de reciclagem.

Enquanto em seu art. 5, traz a responsabilização sobre os Estados-Membros, atribuindo aos mesmos o planejamento de medidas que visam reduzir e eliminar os REEE, classificando como urbanos não triado, os destinando de forma correta sobretudo os de equipamentos de regulação da temperatura que contêm substâncias que empobrecem a camada de ozônio e gases fluorados com efeito de estufa, às lâmpadas fluorescentes que contêm mercúrio e os painéis fotovoltaicos.

2.5.2 Legislação brasileira

De acordo com a legislação brasileira, a instalação, construção, operação, alterações ou descomissionamento de empreendimentos classificados como poluidores ou que apresentam um grau de riscos de se tornarem poluidores ou degradadores do meio ambiente, devem ser previamente submetidos a um processo de licenciamento ambiental. Conforme corroboram Eletrobras/EPE (2022), os procedimentos gerais para o licenciamento ambiental de empreendimentos são estabelecidos pela legislação ambiental brasileira, a seguir o Quadro 1 – Resumo dos principais procedimentos regulamentários para licenciamento ambiental a nível federal, apresenta as principais normativas para o licenciamento ambiental de empreendimentos produtores de energia a partir de fonte solar:

Quadro 1 – Resumo dos principais procedimentos regulamentários para licenciamento ambiental a nível federal

(continua)

Tipo	Ano	Descrição
Lei 6938	1981	Estabelece o licenciamento ambiental como um instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente.

Quadro 1 – Resumo dos principais procedimentos regulamentários para licenciamento ambiental a nível federal

(conclusão)

Tipo	Ano	Descrição
Resolução CONAMA 1	1986	Estabelece a obrigatoriedade da elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) / Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para usinas geradores de eletricidade acima de 10 MW.
Resolução CONAMA 6	1987	Dispõe sobre o licenciamento ambiental de obras do setor de geração de energia elétrica de geração de energia elétrica.
Resolução CONAMA 9	1987	Dispõe sobre a realização de audiências públicas para expor o conteúdo do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA)
Constituição Federal	1988	Determina ao Poder Público a responsabilidade de exigir estudo prévio de impacto ambiental para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente
Resolução CONAMA 237	1997	Regulamenta o licenciamento ambiental de empreendimentos considerados efetiva ou potencialmente causadores de significativa degradação do meio ambiente. Estabelece que dependerá de EIA/Rima e que serão realizadas audiências públicas.
Resolução CONAMA 279	2001	Estabelecer procedimento simplificado para o licenciamento ambiental, com prazo máximo de sessenta dias de tramitação, dos empreendimentos com impacto ambiental de pequeno porte
Lei Complementar 140	2011	Fixar normas para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora.
Portaria Interministerial 60	2015	Estabelece procedimentos administrativos que disciplinam a atuação dos órgãos e entidades da administração pública federal em processos de licenciamento ambiental de competência do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA.
Portaria IBAMA 78	2021	Estabelece a classificação de risco de atividades econômicas associadas aos atos de liberação sob responsabilidade do Ibama e inclui usinas fotovoltaicas
Instrução IBAMA Normativa 13	2021	Regulamenta a obrigação de inscrição no Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais. Dentre as atividades previstas, inclui a geração de energia de fontes alternativas.

Fonte: Eletrobras/EPE (2022)

A Política Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos, implementada pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, em seu Capítulo II, Art. 6º traz a responsabilização compartilhada sobre o ciclo de vida do produto, ou seja, atribui aos produtores, distribuidores e consumidores a

responsabilidade do final da vida útil do produto de destinarem de forma correta. Assim como, descreve as responsabilidades do Poder Público, como agente incentivador da promoção de ações voltadas para redução do volume de materiais perigosos, incentivos a reciclagem e gestão integradas dos resíduos sólidos. Enquanto, no Capítulo III, Art. 8º, institui instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, a título de exemplo, os inventários e o sistema declaratório anual de resíduos sólidos, a criação do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) e os acordos setoriais.

4 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados a classificação desta pesquisa quanto os procedimentos metodológicos, objetivos, à sua abordagem e natureza. Assim como, metodologia empregada para estimar o volume resíduos gerados e os benefícios financeiros que podem ser criados a diante dos descomissionamentos de empreendimentos produtores de energia elétrica, a partir de fonte solar no Estado do Rio Grande do Norte.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com a classificação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas (CAPES), esta pesquisa foi desenvolvida na área de concentração de Ciências Ambientais.

4.1.1 Classificação quanto à natureza

Este estudo em relação à sua natureza pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, visto que a pesquisa aplicada se concentra em torno dos problemas presentes nas atividades das instituições, organizações, grupos ou atores sociais, se empenhando na elaboração de diagnósticos, identificação de problemas e busca de soluções (THIOLLENT, 2009; FLEURY; WERLANG, 2016).

4.1.2 Classificação quanto à abordagem

Conforme Silva e Menezes (2001), o estudo pode ser classificado como quantitativo, pois os dados encontrados podem ser quantificados, ou seja, traduzidos em números, opiniões e informações para classificá-los e analisá-los.

4.1.3 Classificação quanto aos procedimentos metodológicos

Em consonância ao que discorre Gil (2012), esta pesquisa quanto aos seus procedimentos metodológicos é classificada como um estudo de caso, visto que consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento.

4.1.4 Classificação quanto aos objetivos

No tocante aos objetivos, esta pesquisa se classifica como exploratória, visto que tem como finalidade proporcionar mais informações sobre o assunto investigado, possibilitando sua definição e seu delineamento, de maneira que orienta a fixação dos objetivos e a formulação das hipóteses ou descobrir um novo tipo de enfoque para o assunto (PRODANOV; FREITAS, 2013).

4.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS PARA COLETA DOS DADOS E ELABORAÇÃO DO MAPEAMENTO

Para a coleta de dados se definiu o Estado do Rio Grande do Norte como recorte espacial, assim como a análise dos dados disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através do Sistema de Informações de Geração (SIGA), referente ao mês de fevereiro de 2023, versão 1.0, como recorte temporal. Ressalta-se que a escolha pelo estudo de empreendimentos com potência outorgada transcorreu pelo fato que estas centrais geradoras fotovoltaicas demandam procedimentos processuais para autorização e concessão de direitos por parte da autarquia federal (ANEEL) aos seus proprietários. Tais procedimentos são fontes geradoras de informações, as quais podem ser verificadas através de fontes de dados governamentais. Enquanto o uso de sistemas fotovoltaicos para gerações de energia elétrica para fins de usos residências não passam por processos de autorizações ou licenciamentos, por parte do Poder Público, tornando desta forma o desenvolvimento de estimativas de volumes mais complexos.

4.2.1 Coleta dos dados

Conforme os dados disponibilizados através do SIGA de fevereiro de 2023, versão 1.0, o Estado do Rio Grande do Norte contabiliza 179 empreendimentos (18 em operação, 13 em construção e 148 com obras não iniciadas) geradores de energia elétrica, a partir de fonte solar outorgados pela autarquia federal ANEEL. Além disso, foram coletados dados por intermédio do portal do IDEMA (sistemas.idema.rn.gov.br), para o período entre janeiro de 2010 e março de 2023.

4.2.2 Elaboração dos mapeamentos

A construção dos mapeamentos dos empreendimentos transcorreu em três fases sendo-as: criação das estimativas de tempo de licenciamento, construção e comissionamento dos empreendimentos, criação das hipóteses de estimativa do volume de energia a ser descomissionado e elaboração das representações gráficas (mapeamento).

4.2.2.1 Criação das estimativas do tempo de licenciamento e construção dos empreendimentos

A criação das estimativas de tempo de licenciamento, transcorreu pela ausência das informações necessárias para a condução deste estudo, visto a existência de empreendimentos listados no SIGA em fase de construção não iniciada, sem evidências de registros sobre a abertura e conclusão do processo de licenciamento ambiental, consultados no portal do IDEMA (sistemas.idema.rn.gov.br), os quais totalizando três usinas fotovoltaicas (Aventura Solar, Cumaru Solar I e Cumaru Solar II). Enquanto, a criação das estimativas de tempo necessário para o a construções e comissionamento dos empreendimentos em fase de construção e construção não iniciada, ocorreu pela inexistência dos dados de previsão de comissionamento no SIGA. Portanto, a seguir são descritos os procedimentos sistemáticos empregados:

- a) **Estimativa de tempo para o licenciamento ambiental:** foi baseada no período transcorridos entre a abertura do processo de licenciamento ambiental e a conclusão, registrado no portal do IDEMA (sistemas.idema.rn.gov.br), baseado em empreendimentos em fase de operação, conforme consta no SIGA, os quais totalizaram seis UFV (Floresta I, Floresta II, Floresta III, Assú V, Serra do Mel I e Serra do Mel II). Inicialmente, o intervalo foi contabilizado em dias, subsequentemente se realizou a somatória dos valores encontrados e a média simples. Por fim, o valor da média obtida em dias foi convertido em meses, dividido-a por 30, fazendo o uso do arredondamento

para se encontrar a quantidade de meses. Os dados descritos anteriormente podem ser visualizados na Tabela 1 – Estimativa do período de licenciamento ambiental para empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar, apresentada a seguir:

Tabela 1 – Estimativa do período de licenciamento ambiental para empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar

Empreendimento	Data de abertura do processo de licenciamento	Data de conclusão do processo de licenciamento	Período transcorrido
Floresta I	26/06/2014	11/05/2015	319
Floresta II	26/06/2014	21/07/2016	756
Floresta III	26/06/2014	02/01/2017	921
Assú V	03/08/2016	05/01/2017	155
Serra do Mel I	06/11/2019	05/11/2020	365
Serra do Mel II	06/11/2019	05/11/2020	365
Média em dias			480
Média em meses			16

Fonte: Autoria Própria em 2023 com base em (IDEMA, 2023).

- b) Estimativa de tempo para a construção e comissionamento do empreendimento:** foi baseada no período transcorridos entre a conclusão do licenciamento ambiental, registrado no portal do IDEMA (sistemas.idema.rn.gov.br) e a data de comissionamento do empreendimento, conforme consta no SIGA. Levando em consideração os empreendimentos em fase de operação, os quais totalizaram seis UFV (Floresta I, Floresta II, Floresta III, Assú V, Serra do Mel I e Serra do Mel II). Inicialmente o intervalo foi contabilizado em dias, subsequentemente se realizou a somatória dos valores encontrados e a média simples. Por fim, o valor da média obtida em dias foi convertido em meses, divido-a por 30. fazendo o uso do arredondamento para se encontrar a quantidade de meses. Os dados descritos anteriormente podem ser visualizados na Tabela 2 – Estimativa do período de construção e comissionamento para empreendimentos gerados de energia elétrica a partir de fonte solar, apresentada a seguir:

Tabela 2 – Estimativa do período de construção e comissionamento para empreendimentos gerados de energia elétrica a partir de fonte solar

Empreendimento	Data da conclusão do processo de licenciamento	Data do comissionamento	Período transcorrido
Floresta I	11/05/2015	23/12/2017	957
Floresta II	21/07/2016	23/12/2017	520
Floresta III	02/01/2017	23/12/2017	355
Assú V	05/01/2017	23/12/2017	352
Serra do Mel I	05/11/2020	25/05/2022	566
Serra do Mel II	05/11/2020	25/05/2022	566
Média (dias)			553
Meses			18

Fonte: Autoria Própria em 2023 com base em (IDEMA, 2023).

4.2.2.2 Criação das hipóteses de estimativa do volume de energia a ser descomissionado

Com base nas informações coletadas (estimativa de período para execução do licenciamento ambiental, construção e comissionamento dos empreendimentos) e a expectativa de vida útil de 25 anos dos painéis fotovoltaicos, a contar da data de comissionamento dos empreendimentos. Assim como, que ao término deste período, a manutenção dos painéis fotovoltaicos empregados nos empreendimentos se tornará financeiramente desvantajoso. Da mesma forma que os resíduos sólidos gerados pelo descomissionamento dos empreendimentos serão 100% reciclados, se traçou duas hipóteses com períodos distintos, a primeira abrangendo o período entre os anos de 2039 e 2047, compreendendo os empreendimentos outorgados entre os anos de 2014 e 2022, de acordo com dados do SIGA. E a segunda incorporando o período entre os anos de 2048 e 2051, contemplando os empreendimentos que serão comissionados, entre os anos de 2023 e 2025, baseados nas estimativas efetuadas por este estudo.

4.2.2.3 Elaboração das representações gráficas (mapeamento)

A partir das informações coletadas, com auxílio do suporte computacional do software ArcGIS, versão 10.8, shape malha municipal - IBGE ano 2020, Datum Sirgas 2000, foram criadas duas representações gráficas sendo-as: 1ª - Estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar a ser descomissionada no Estado do RN entre os anos de 2039 e 2047 e 2ª Estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar a ser

descomissionada no Estado do RN entre os anos de 2048 e 2051. A seguir são descritos os procedimentos metodológicos aplicado:

- a) **Estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar a ser descomissionada no Estado do RN entre os anos de 2039 e 2047:** baseado nas informações disponibilizadas no SIGA, se constatou a existência de 18 empreendimentos que possuem a estimativa de serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, localizados em dez municípios do RN, totalizando aproximadamente 367,14 MW de energia a serem descomissionados. A Tabela 3 – Resumo dos volumes de energia elétrica outorgada, gerada a partir de fonte solar a ser descomissionada entre os anos de 2039 e 2047 por município no RN, apresenta as informações aplicadas na estimativa descrita anteriormente.

Tabela 3 – Resumo dos volumes de energia elétrica outorgada, gerada a partir de fonte solar a ser descomissionada entre os anos de 2039 e 2047 por município no RN

Município	Somatória (MW)
Ceará-Mirim	0,08
Parnamirim	0,36
Macaíba	0,72
São José de Mipibu	0,90
Alto do Rodrigues	1,10
Mossoró	1,32
Natal	2,07
Assú	34,00
Areia Branca	86,00
Serra do Mel	240,59
Total	367,14

Fonte: Autoria Própria em 2023 com base em (SIGA, 2023).

- b) **Estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar a ser descomissionada no Estado do RN entre os anos de 2048 e 2051:** baseado nas informações disponibilizadas no SIGA, se constatou a existência de 161 empreendimentos que possuem a estimativa de serem descomissionados no período entre os anos de 2048 e 2051, localizados em dezesseis municípios do RN, totalizando aproximadamente 7197,68 MW de energia a serem descomissionados. A Tabela 4 –

Resumo dos volumes de energia elétrica outorgada, gerada a partir de fonte solar a ser descomissionada entre os anos de 2048 e 2051 por município no RN, apresenta as informações aplicadas na estimativa descrita anteriormente.

Tabela 4 – Resumo dos volumes de energia elétrica outorgada, gerada a partir de fonte solar a ser descomissionada entre os anos de 2048 e 2051 por município no RN

Município	Somatória (MW)
Touros	10,00
Pedra Grande	64,55
Lagoa Nova	96,00
João Câmara	129,10
Mossoró	150,00
Currais Novos	159,00
Jandaíra	176,87
Ceará-Mirim	180,00
Caraúbas	208,00
Parazinho	252,00
Lajes	327,51
Santana do Mato	422,54
Baraúna	474,31
Pedro Avelino	558,79
Serra do Mel	673,65
Assú	3315,36
Total	7197,68

Fonte: Autoria Própria em 2023 com base em (SIGA, 2023).

4.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA CÁLCULO DA ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE MATERIAIS RECUPERADOS ORIUNDOS DO PROCESSO DE DESCOMISSIONAMENTO

Vislumbrando estimar a quantidade em tonelada de resíduos sólidos oriundos do processo de descomissionamento de empreendimento geradores de energia elétrica a partir de fonte solar, se recorreu à: revisões da literatura sobre a quantidade de material recuperado a partir da reciclagem de painéis fotovoltaicos e coleta de dados sobre quantidade de módulos (painéis) fotovoltaicos descritos nos processos de licenciamento ambiental.

4.3.1 Cálculo da estimativa da quantidade de módulos fotovoltaicos

Os empreendimentos outorgados são compostos por módulos fotovoltaicos monocristalinos ou policristalinos, com potência de pico (Wp) de 345, 535 ou 640 Wp. Logo, para estimativa do peso gerada em quilograma (kg) para cada Wp produzido foram coletados dados de 2 marcas distintas para cada potência de pico descritos anteriormente, totalizando seis. Subsequentemente, se realizou a divisão da potência dos painéis Wp pelo peso informado pelo fabricante dos módulos, posteriormente a média simples e empregando a regra do arredondamento com três casas decimais, objetivando estipular um peso padrão para cada Wp produzido que será aplicado neste estudo. A seguir Tabela 5 – Estimativa do peso padrão para cada Wp produzido, demonstra os valores encontrados:

Tabela 5 – Estimativa do peso padrão para cada Wp produzido

Marca	Modelo	Potência (Wp)	Peso (kg)	kg/Wp
ZnShine Solar	ZXP6-H144	345	21,50	0,062
GCL Solar	GCL P6-72	345	22,20	0,064
Ja Solar	JAM72S30	535	28,60	0,053
Intelbras	EMSB-535M HC	535	28,60	0,053
Canadian Solar	BiHiKu7	640	37,50	0,059
Leapton Solar	LP210-M-66-MH	640	34,00	0,053
Média				0,058

Fonte: Autoria Própria em 2023 com base em (Canadian Solar *et al.*, 2023).

Ao término do cálculo do peso padrão para cada Wp produzido adotado neste estudo, foi realizado o cálculo do volume de resíduos gerados por cada MW outorgado. Como 0,058 kg de resíduos são gerados para cada Wp outorgado e 1 MW equivale a 1.000.000 W. Logo, a resultante da multiplicação de 0,058 kg/Wp por 1.000.000 Wp será de 58.000 kg, a qual equivale a 58 toneladas de resíduos gerado.

4.3.2 Estimativa da quantidade de material recuperado

A estimativa da quantidade de material recuperado oriundos da reciclagem dos módulos fotovoltaicos se baseou na revisão sistemática da literatura e resultados encontrados por Gahlot, Mir e Dhawan (2022). Nesta revisão, os pesquisadores efetuaram a busca por artigos revisados

por pares, totalizando 18 artigos, publicados em periódicos internacionais entre os anos de 2006 e 2022, os quais possuem como temática principal processos aplicados na recuperação de materiais, metálicos ou não proveniente da reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira e segunda geração. A seguir o Quadro 2 – Revisão bibliográfica sobre reciclagem de módulos fotovoltaicos e o Quadro 3 - Quantidade de material recuperada a partir da reciclagem de módulos fotovoltaicos, listam os artigos estudados e os resultados encontrados pelo estudo citado:

Quadro 2 – Revisão bibliográfica sobre reciclagem de módulos fotovoltaicos

(continua)

Estudo	Autor (res)
Extraction and separation of Cd and Te from cadmium telluride photovoltaic manufacturing scrap. Progress In Photovoltaics: Research and Applications	Fthenakis e Wang (2006)
Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules.	Park e Park (2014)
Recycling of CIGS solar cell waste materials.	Gustafsson (2014)
Recycling of CIGS solar cell waste materials - separation of copper, indium and gallium by high-temperature chlorination reaction with ammonium chloride.	Gustafsson, Steenari e Ekberg (2015)
Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: from noble-metal extraction to lead removal.	Jung, Park, Seo e Park (2016)
An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: from separation to cell fabrication.	Park, Kim, Cho, Lee e Park (2016)
Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules.	Huang, Shin, Wang, Sun e Tao (2017)
Recovery of silver metallization from damaged silicon cells	Kuczyńska-Łażewska, Klugmann-Radziemska, Sobczak e Klimczuk (2018)
Sustainable technology for mass production of Ag nanoparticles and Al microparticles from damaged solar cell wafers.	Yousef, Tatariants, Tichonovas e Makarevicius (2019)
Restoring the Reactivity of Organic Acid Solution Used for Silver Recovery from Solar Cells by Fractional Distillation.	Lee, Lee, Ahn e Kang (2019)

Quadro 2 – Revisão bibliográfica sobre reciclagem de módulos fotovoltaicos

(conclusão)

Recovery of Silver from Solar Panel Waste: an experimental study.	Wongnaree, Kritsarikun, Ma-Ud, Kansomket, Udomphol e Khumkoa (2020)
A sustainable chemical process to recycle end-of-life silicon solar cells.	Deng, Dias, Lunardi e Ji (2021)
A comprehensive hydrometallurgical recycling approach for the environmental impact mitigation of EoL solar cells	Luo, Liu, Zhou, Jiang, Jia, Lai, Li e Zhang (2021)
Optimization of indium recovery from waste crystalline silicon heterojunction solar cells by acid leaching.	Zhang, Liu, Wang, Chen, Zhao, Hu e Xu (2021)
Recovery of Pure Silicon and Other Materials from Disposed Solar Cells.	Punathil, Mohanasundaram, Tamilselavan, Sathyamurthy e Chamkha (2021)
Optimization of indium recovery from waste crystalline silicon heterojunction solar cells by acid leaching.	Zhang, Liu, Wang, Chen, Zhao, Hu e Xu (2021)
An Integrated Thermal and Hydrometallurgical Process for the Recovery of Silicon and Silver from End-of-Life Crystalline Si Photovoltaic Panels	Theocharis, Pavlopoulos, Kousi, Hatzikioseyan, Zarkadas, Tsakiridis, Remoundaki, Zoumboulakis e Lyberatos (2022)

Fonte: Gahlot, Mir e Dhawan (2022)

Quadro 3 - Quantidade de material recuperada a partir da reciclagem de módulos fotovoltaicos

Minério	kg/t
Cobre (Cu)	9,320
Prata (Ag)	0,300
Silício (Si)	33,480
Estanho (Sn)	1,120
Chumbo (Pb)	1,120
Cádmio (Cd)	0,005
Telúrio (Te)	0,003
Índio (In)	0,003

Fonte: Gahlot, Mir e Dhawan (2022)

Para construção da estimativa da porcentagem correspondentes de cada parte constituinte no peso do módulo, foram utilizados os dados adaptados do estudo de Ziemińska-Stolarska, Pietrzak e Zbiciński (2021), a estrutura de composição dos módulos fotovoltaicos

são compostas por cinco partes, camada protetora externa (vidro), frame (suporte do painel), EVA/backsheet, células fotovoltaicas e cabos condutores de cobre, correspondentes respectivamente a 70%, 18%, 6%, 4% e 2% do total do peso do módulo.

4.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA CÁLCULOS DE GERAÇÃO DE RECEIRAS FINANCEIRAS A PARTIR DA ATIVIDADE DO DESCOMISSIOMANETO

Os cálculos financeiros estão fundamentados em cotações dos metais e não metais no mercado internacional cotados em dólares americanos (US\$), com auxílio de plataformas de notícias, como o portal SMM (www.metal.com), Investing (br.investing.com) e Maxligas (maxiligas.com.br), realizadas no mês de maio de 2023.

4.5 PRODUTO TECNOLÓGICO

De acordo com o Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPgUSRN), Seção VII – Do trabalho de conclusão do curso, Art. 34, o TCC deve gerar uma aplicação prática, uma solução ou uma proposta de solução de um problema real, o que será considerado como um produto técnico ou tecnológico. Desta forma, o produto resultante desta pesquisa consiste na elaboração um relatório técnico conclusivo, o qual apresenta um texto de maneira conciso, indicando em seus conteúdos a relevância dos resultados e/ou conclusões em termos sociais ou econômico (CAPES, 2019).

4.5.1 Report Descomissionamento de Empreendimentos Geradores de Energia Elétrica a partir de Fonte Solar no Estado do RN: Desafios e Oportunidades

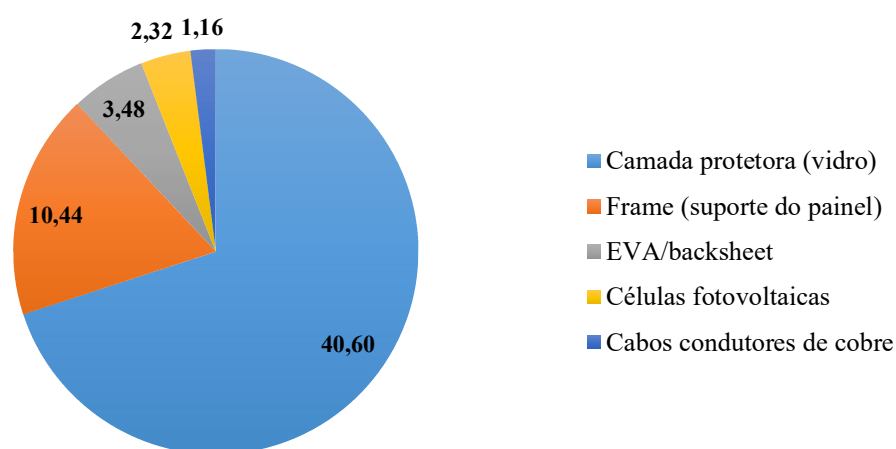
O Report apresentar as estimativas de volume de energia elétrica outorgada produzida a partir de fonte solar a ser descomissionada entre os períodos de 2038 a 2047 e de 2047 a 2051 no Estado do Rio Grande do Norte (RN). Assim como, estimativa da quantidade de resíduos a serem gerados a cada MW descomissionado e o potencial de geração de receitas a partir da atividade de reciclagem por município no RN, inserido no Anexo B - Report descomissionamentos de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no Estado do RN: desafios e oportunidades.

5 RESULTADOS

As regulamentações das políticas públicas visando minimizar os problemas ambientais decorrentes da falta de destinação correta para os resíduos sólidos provenientes de equipamentos elétricos e eletrônicos, principalmente os que possuem em sua composição metais pesados, considerados tóxicos a saúde humana e ao meio ambiente ou raros, com altos custos de produção, tem ganhado espaço nas discursões da sociedade mundo a fora, em alguns países as ações práticas como proibições de importação de produtos que contenham substâncias perigosas ou a exigência de apresentação de um representante legal instalado dentro de uma jurisdição específica são práticas adotadas a título de exemplificação. No entanto, o Brasil continua apresentando um sentido contraposto em suas ações.

Para cada MW de energia a ser descomissionada são geradas aproximadamente 58,00 toneladas de resíduos sólidos, visto que são gerados 0,058 kg de resíduos por wp descomissionado. A camada protetora, constituída de vidro corresponde a maior parcela desta quantidade com contribuição de 40,60 toneladas. O frame de suporte constituído de alumínio e as camadas de EVA/backsheet correspondem a 10,44 e 3,48 toneladas respectivamente. Enquanto as células fotovoltaicas e os cabos condutores representam 2,32 e 1,16 toneladas nesta ordem, conforme ilustrado na Figura 3 – Volume de resíduos em toneladas gerados por MW representado em partes constituintes dos painéis fotovoltaicos.

Figura 3 – Volume de resíduos em toneladas gerados por MW representado em partes constituintes dos painéis fotovoltaicos

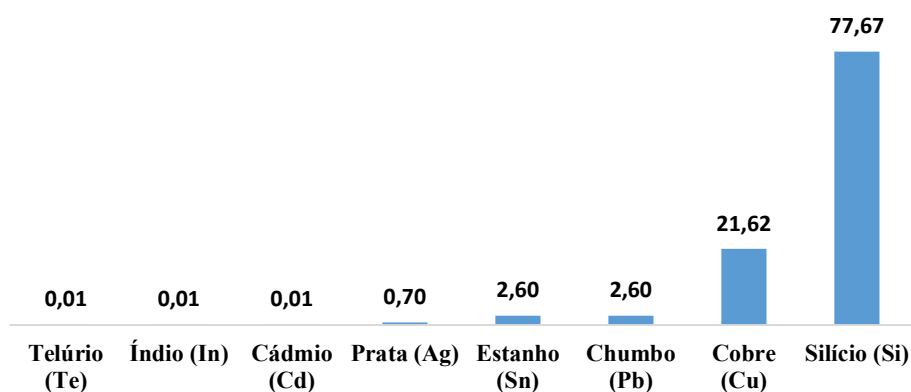


Fonte: Elaboração própria em 2023.

Ressalta-se que as camadas de filmes compostas pelo EVA (acetato-vinilo etileno) e backsheet não foram consideradas para cálculos de estimativa de geração de receitas neste estudo, visto que seus processos de recuperação necessitam de aprimoramento e estudos mais difundidos na comunidade científica.

Considerando o volume de material reciclado recuperado a partir da reciclagem das células fotovoltaicas, se estimou que cada MW descomissionado gerará 0,01 kg de Telúrio, Índio e Cádmio, 0,70 kg de Prata, 2,60 kg de Estanho e Chumbo, 21,62 kg de Cobre e 77,67 kg de Silício, conforme ilustrado na Figura 4 – Quantidade de material recuperado em kg por MW descomissionado.

Figura 4 – Quantidade de material recuperado em kg por MW descomissionado



Fonte: Elaboração própria em 2023.

O potencial de geração de receita estimado para cada MW descomissionado por este estudo foi de US\$ 35.412,64, com destaque da margem de contribuição do metal de alumínio, o qual representou 60,30% do total do potencial de geração de receita, ou seja, US\$ 23.479,56. A margem de contribuição expressiva está fundamenta na grande quantidade de resíduo que possa ser recuperada a partir do processos de separação deste resíduo relativamente simples, quando comparados aos procedimentos aplicados na recuperação de outros metais preciosos.

As estimativas apontam que até o ano de 2047 serão descomissionados um valor de aproximadamente 367,14 MW de potência de energia provenientes de empreendimentos de geração de energia, a partir de fonte solar no RN, com potencial de geração de receita de aproximadamente US\$ 13.001.396,65. Neste contexto, os três municípios norte-rio-grandense com maiores quantidade de MW a serem descomissionados serão: Serra do Mel com 240,59 MW (com potencial de geração de receitas de US\$ 8.519.927,06), Areia Branca com 86 MW (com potencial de geração de receitas de US\$ 3.045.487,04) e Açú com 34 MW (com potencial

de geração de receitas de US\$ 1.204.029,76). Seguidos pelos municípios de Natal (2,07 MW), Mossoró (1,32 MW), Alto do Rodrigues (1,10 MW), São José do Mipibu (0,90 MW), Macaíba (0,72 MW), Parnamirim (0,36 MW) e Ceará-Mirim (0,08 MW), conforme demonstrado no Mapa 1 - Estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar a ser descomissionada no estado do RN entre os anos de 2039 e 2047, localizado no Anexo A - Mapeamento da estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar, a ser descomissionada nas próximas décadas no Estado do Rio Grande do Norte. Assim como, a Tabela 7 – Hipótese 1: resumo das informações por município, apresenta as estimativas de MW a serem descomissionados, volume de geração de resíduos e potencial econômico.

Tabela 7 – Hipótese 1: resumo das informações por município

Município	Quant. MW a ser descomissionados	Quant. de resíduos gerados (t)	Potencial de geração de receita estimado (US\$)
Ceará-Mirim/RN	0,08	4,64	2.833,01
Parnamirim/RN	0,36	20,88	12.748,55
Macaíba/RN	0,72	41,76	25.497,10
São José de Mipibu/RN	0,90	52,20	31.871,38
Alto do Rodrigues/RN	1,10	63,80	38.953,90
Mossoró/RN	1,32	76,56	46.744,68
Natal/RN	2,07	120,06	73.304,16
Açu/RN	34,00	1972,00	1.204.029,76
Areia Branca/RN	86,00	4988,00	3.045.487,04
Serra do Mel/RN	240,59	13954,22	8.519.927,06
TOTAL			13.001.396,65

Fonte: Elaboração própria em 2023.

Outras estimativas mostram que até o ano de 2051 serão descomissionados um valor superior a 7 GW potência de energia provenientes de empreendimentos de geração de energia, a partir de fonte solar, com potencial de geração de receita de aproximadamente de US\$ 254.888,850,68. Estas previsões estão em consonância com as estimativas da IRENA; IEA-PVPS (2016), as quais estimam que no ano de 2050, a reciclagem de painéis fotovoltaicos pode gerar receitas superior a US\$ 50 bilhões.

O município de Açu se destaca como maior produtor deste tipo de resíduo, com cerca de 3 GW a serem descomissionado, com potencial de geração de receitas de US\$ 117.405.605,15, acompanhado pelos municípios de Serra do Mel (US\$ 23.855.724,94), Pedro

Avelino (US\$ 19.788.229,11), Baraúnas (US\$ 16.796.569,28), Santana do Mato (US\$ 14.963.256,91) e Lajes (US\$ 11.597.993,73) todos com potenciais de geração de receitas superiores a US\$ 10.000.000,00. O Mapa 2 – Estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar a ser descomissionada no estado do RN entre os anos de 2048 e 2051, localizado no Anexo A - Mapeamento da estimativa do volume de potência elétrica outorgada a partir de fonte solar, a ser descomissionada nas próximas décadas no Estado do Rio Grande do Norte, expõe o cenário 2 descrito anteriormente, bem como a Tabela 8 – Cenário 2: resumo das informações por município, ilustra as estimativas de MW a serem descomissionados, volume de geração de resíduos e potencial econômico.

Tabela 8 – Hipótese 2: resumo das informações por município

Município	Quant. MW a ser descomissionados	Quant. de resíduos gerados (t)	Potencial de geração de receita estimado (US\$)
Touros/RN	10,00	580,00	354.126,40
Pedra Grande/RN	64,55	3743,90	2.285.885,91
Lagoa Nova/RN	96,00	5568,00	3.399.613,44
João Câmara/RN	129,10	7487,80	4.571.771,82
Mossoró/RN	150,00	8700,00	5.311.896,00
Currais Novos/RN	159,00	9222,00	5.630.609,76
Jandaíra/RN	176,87	10258,46	6.263.433,64
Ceará-Mirim/RN	180,00	10440,00	6.374.275,20
Caraúbas/RN	208,00	12064,00	7.365.829,12
Parazinho/RN	252,00	14616,00	8.923.985,28
Lajes/RN	327,51	18995,58	11.597.993,73
Santana do Mato/RN	422,54	24507,32	14.963.256,91
Baraúna/RN	474,31	27509,98	16.796.569,28
Pedro Avelino/RN	558,79	32409,82	19.788.229,11
Serra do Mel/RN	673,65	39071,70	23.855.724,94
Açu/RN	3315,36	192290,88	117.405.650,15
TOTAL			254.888.850,68

Fonte: Elaboração própria em 2023.

Ressalta-se que alguns municípios presentes na Tabela 7 – Hipótese 1: resumo das informações por município, não constam na Tabela 8 – Hipótese 2: resumo das informações por município, visto que conforme metodologia aplicada no desenvolvimento desta pesquisa,

eles não apresentaram registros de desenvolvimento de novos empreendimentos, resultando na ausência no período.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento exponencial da geração de resíduos oriundos da indústria fotovoltaica, podem representar um risco tanto ao meio ambiente, quanto a saúde humana. Porém, ele também pode ser vislumbrado como uma possibilidade de desenvolvimento, geração de riqueza e renda, caso sejam realizados investimentos em pesquisas, capacitação técnica e desenvolvimento de processos de reciclagem em escala industrial financeiramente viável.

A recuperação de metais preciosos e materiais oriundos de resíduos sólidos provenientes da reciclagem de painéis fotovoltaicos ainda é uma temática recente, pouco difundida, conseqüentemente pouco explorada, com lacunas nos processos aplicados e ausência de regulamentação pelo Poder Público. Apesar dos estudos preliminares demonstram um grande potencial de geração de receitas, concentrados no Estado do RN, principalmente em municípios que demonstram uma carência estrutural em atividades industriais, as ausências de regulamentações da atividade, bem como, a inercia do Poder Público podem resultar em danos ambientais e sociais a curto, médio e longo prazo, os quais demandarão maiores empenhos e investimentos para remediações de seus efeitos. Logo, a implementação da atividade de reciclagem poderá impulsionar o desenvolvimento regional e ajudar a diminuir o passivo ambiental antropológico provocados pela indústria de geração de energia elétrica a partir de fonte solar. Dessa forma, para estudos futuros, surge-se estudar:

- A modelagem da viabilidade técnica-financeira dos processos de reciclagem de painéis fotovoltaicos em escala industrial;
- Os impactos da atividade de reciclagem nas receitas dos municípios, bem como os ganhos ambientais e sociais gerados por esta atividade;
- Estimar o volume de resíduos sólidos gerados pelo descomissionamento de sistemas fotovoltaicos residências no Estado do RN.

REFERÊNCIAS

AIE - Agência Internacional de Energia. **World Energy Outlook 2022**. Paris: 2022. 524 p. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2023.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP N° 817**. Brasília, 2020. 42 p.

BRASIL MINERAL. São Paulo: Signus, v. 415, nov. 2021. Mensal. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/revista/415/PDF.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2023.

BRASIL. ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.

SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Brasília, 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 10 fev. 2023.

BRASIL. CONEMA n° 279, de 27 de julho de 2001. Brasília, DF. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2001/res_conama_279_2001_licenciamentoambientalsimplificadoparaempreendimentoseltricos.pdf. Acesso em: 20 fev. 2023.

BRASIL. Constituição (1998). Constituição, de 5 de outubro de 1988. **Constituição Federal de 1988**. Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 20 fev. 2023.

BRASIL. EPE - EMPRESA PESQUISA ENERGÉTICA. BEN - Relatório Síntese 2022: ano base 2021. Rio de Janeiro: 2022. 67 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 01 mar. 2022.

BRASIL. Instrução Normativa IBAMA n° 1, de 02 de dezembro de 2018. Natal, RN. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=368945>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BRASIL. Instrução Normativa IBAMA n° 13, de 13 de agosto de 2021. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&force=1&legislacao=138775#:~:text=Ementa%3A,28%20de%20novembro%20de%202019>. Acesso em: 10 fev. 2023.

BRASIL. Lei Complementar n° 140, de 8 de dezembro de 2011. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: 10 fev. 2023.

BRASIL. Lei n° 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília, DF, Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 01 mar. 2023.

BRASIL. MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2020. 187 p.

BRASIL. PEREIRA, ENIO BUENO *ET AL.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017. 80 p. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>. Acesso em: 02 fev. 2023.

BRASIL. **Portaria IBAMA nº 78**, de 11 de janeiro de 2021. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-78-de-11-de-janeiro-de-2021-298866469>. Acesso em: 10 fev. 2023.

BRASIL. **Portaria Interministerial nº 60**, de 24 de março de 2015. Brasília, DF. Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Portaria_Interministerial_60_de_24_de_marco_d_e_2015.pdf. Acesso em: 10 fev. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 001**, de 23 de janeiro de 1986. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 006**, de 16 de setembro de 1987. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0006-160987.PDF>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 009**, de 03 de dezembro de 1987. Brasília, DF. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/1987_Res_CONAMA_9.pdf.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 237**, de 19 de dezembro de 1997. Brasília, DF. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237.

CAMARGO, Priscila Silva Silveira. **Reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino**: separação e concentração de materiais. 2021. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**: special report of the intergovernmental panel on climate change. New York: Cambridge University Press, 2012. 1088 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

CHAKANKAR, Mital; SU, Chun Hui; HOCHENG, Hong. Leaching of metals from end-of-life solar cells. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 26, n. 29, p. 29524-29531, 10 abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-1918-1>.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. **Grupo de Trabalho**: Produção Técnica. Brasília: Capes, 2019. Disponível em:

<https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/10062019-producao-tecnica-pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

DIAS, Pablo Ribeiro. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos (Painéis Solares)**. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DOMÍNGUEZ, Adriana; GEYER, Roland. Photovoltaic waste assessment in Mexico. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 127, p. 29-41, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.013>.

ELETROBRAS/EPE. **Levantamento da legislação para licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar: situação em 2022**. Rio de Janeiro, 2022. 106 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-598/NT%20Conjunta%20Eletrobras%20EPE%20Licenciamento%20UFV%20ver2022.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

ELY, Fernando; SWART, Jacobus W. **Energia solar fotovoltaica de terceira geração**. 138. ed. São Paulo: IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2014. 2 p. Disponível em: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2023.

ESTADOS UNIDOS. TAYLOR L. CURTIS *et Al.* **A Survey of Federal and State-Level Solar System Decommissioning Policies in the United States**. Golden: Nrel - National Renewable Energy Laboratory, 2021. 55 p. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/79650.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2023.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do Trabalho Científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. 277 p. Disponível em: <https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>. Acesso em: 5 maio 2023.

FGV ENERGIA (Brasil). **Aspectos técnicos por trás das atividades de descomissionamento**: lições aprendidas do outro lado do atlântico. Rio de Janeiro: Fgv Energia, 2022. 91 p. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/32133/caderno_de_descomissio_namento_-_ast_2022_4.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 14 jan. 2023.

FLEURY, Maria Tereza Leme; WERLANG, Sergio Ribeiro da Costa. **Pesquisa aplicada: conceitos e abordagens**. São Paulo: Fgv, 2016. 6 p. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/apgvpesquisa/article/view/72796/69984>. Acesso em: 06 abr. 2023.

FTHENAKIS, V. M.; WANG, W.. Extraction and separation of Cd and Te from cadmium telluride photovoltaic manufacturing scrap. **Progress In Photovoltaics: Research and Applications**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 363-371, 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.676>.

GAHLOT, Rohit; MIR, Shaila; DHAWAN, Nikhil. Recycling of Discarded Photovoltaic Solar Modules for Metal Recovery: a review and outlook for the future. **Energy & Fuels**, [S.L.], v. 36, n. 24, p. 14554-14572, 2 dez. 2022. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02847>.

GIL, Carlos Gómez. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): una revisión crítica. **Papelles**, Madrid, v. 140, p. 107-118, jan. 2018. Disponível em: https://www.cvongd.org/ficheros/documentos/ods_revisión_crítica_carlos_gomez_gil.pdf. Acesso em: 02 mar. 2023.

GUSTAFSSON, Anna M. K. **Recycling of CIGS solar cell waste materials**. 2014. 101 f. Tese (Doutorado) - Curso de Industrial Materials Recycling, Departamento de Engenharia Química e Biológica, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, 2014.

GUSTAFSSON, Anna M.K.; STEENARI, Britt-Marie; EKBERG, Christian. Recycling of CIGS solar cell waste materials - separation of copper, indium and gallium by high-temperature chlorination reaction with ammonium chloride. **Separation Science And Technology**, [S.L.], p. 150615133833000, 15 jun. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01496395.2015.1053569>.

HAFEZNIA, Hamed; ASLANI, Alireza; ANWAR, Sohail; YOUSEFJAMALI, Mahdis. Analysis of the effectiveness of national renewable energy policies: a case of photovoltaic policies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 79, p. 669-680, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.033>.

HEN, Wei-Sheng *et al.* **Recovery of valuable metal from Photovoltaic solar cells through extraction**. In: IOP Conf. series: Materials Science and Engineering. [S.L.], 2020. p. 1-10.
HOUAISS, Antônio. **Pequeno Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. São Paulo: Moderna, 2015. 1176 p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.003>.

HUANG, Wen-Hsi; SHIN, Woo Jung; WANG, Laidong; SUN, Wen-Cheng; TAO, Meng. Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. **Solar Energy**, [S.L.], v. 144, p. 22-31, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.001>.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO NORTE. **Guia de normalização: trabalhos acadêmicos, monografias, dissertações e teses**. Natal: IFRN, 2017.

IRENA - International Renewable Energy Agency; International Energy Agency. **End-of-life management: solar photovoltaic panels**. Masdar: IRENA, 2016. 100 p. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

JUNG, Byungjo; PARK, Jongsung; SEO, Donghwan; PARK, Nochang. Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: from noble-metal extraction to lead removal. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [S.L.], v. 4, n. 8, p. 4079-4083, 13 jul. 2016. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00894>.

KUCZYŃSKA-ŁAŚEWSKA, Anna; KLUGMANN-RADZIEMSKA, Ewa; SOBCZAK, Zuzanna; KLIMCZUK, Tomasz. Recovery of silver metallization from damaged silicon cells. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 176, p. 190-195, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.12.004>.

LATUNUSSA, Cynthia E.L.; ARDENTE, Fulvio; BLENGINI, Gian Andrea; MANCINI, Lucia. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [S.L.], v. 156, p. 101-111, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>.

LEE, Jun-Kyu; LEE, Jin-Seok; AHN, Young-Soo; KANG, Gi-Hwan. Restoring the Reactivity of Organic Acid Solution Used for Silver Recovery from Solar Cells by Fractional Distillation. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 13, p. 3659, 3 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11133659>.

LIU, Fan-Wei; CHENG, Tzu-Min; CHEN, Yen-Jung; YUEH, Kai-Chieh; TANG, Shin-Yi; WANG, Kuangye; WU, Chia-Lung; TSAI, Hsu-Sheng; YU, Yi-Jen; LAI, Chih-Huang. High-yield recycling and recovery of copper, indium, and gallium from waste copper indium gallium selenide thin-film solar panels. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 241, p. 111691, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111691>.

MARQUES, Francisco das Chagas. **Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos**. São Paulo: IEI - International Energy Initiative, 2014. Disponível em: <https://www.iei-brasil.org/pdf/4inovafvminicursodfrancisco.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2023.

MARWEDE, Max; RELLER, Armin. Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 69, p. 35-49, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.003>.

MCDONALD, N.C.; PEARCE, J.M. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. **Energy Policy**, [S.L.], v. 38, n. 11, p. 7041-7047, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.023>.

NEVALA, Sanna-Mari; HAMUYUNI, Joseph; JUNNILA, Tero; SIRVIÖ, Tuomas; EISERT, Stefan; WILSON, Benjamin P.; SERNA-GUERRERO, Rodrigo; LUNDSTRÖM, Mari. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling. **Waste Management**, [S.L.], v. 87, p. 43-50, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.039>.

PARK, Jongsung; KIM, Wangou; CHO, Namjun; LEE, Haksoo; PARK, Nochang. An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: from separation to cell fabrication. **Green Chemistry**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 1706-1714, 2016. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c5gc01819f>.

PARK, Jongsung; PARK, Nochang. Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules. **RSC Adv.**, [S.L.], v. 4, n. 66, p. 34823-34829, 2014. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c4ra03895a>.

PRADO, Pedro Forastieri de Almeida *et al.* **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, USP - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PUNATHIL, Lineesh; MOHANASUNDARAM, K.; TAMILSELAVAN, K. S.; SATHYAMURTHY, Ravishankar; CHAMKHA, Ali J.. Recovery of Pure Silicon and Other Materials from Disposed Solar Cells. **International Journal Of Photoenergy**, [S.L.], v. 2021, p. 1-4, 16 abr. 2021. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2021/5530213>.

RN - RIO GRANDE DO NORTE. FIERN - Federação das Indústrias do Rio Grande do Norte. **Mapa das Energias Renováveis**. 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMjQ2YjNkNDYtMWVvZi00ZTAyLWI1OTEtMjRiMzIwMDJINzIxIiwidCI6IjhmMDYyNWl4LTkzM2YtNDM3Yi1iINDE4LTA5NTcxZTY5YmZINCj9&pageName=ReportSection8fd1f6f47c2ba0e50e8d>. Acesso em: 08 fev. 2023.

SICA, Daniela; MALANDRINO, Ornella; SUPINO, Stefania; TESTA, Mario; LUCCHETTI, Maria Claudia. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 82, p. 2934-2945, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039>.

Silva Junior L, Alvarenga MIN, Garcia SR. **Avaliação da qualidade dos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos de mineração em Minas Gerais**. Ambiente & Sociedade 2018.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino A Distância da UFSC, 2001. Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/ppgcb/files/2011/03/Metodologia-da-Pesquisa-3a-edicao.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2023.

SILVEIRA, Denise Toldo; GERHARDT, Tatiana Engel. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 17 p. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213838/000728731.pdf?sequ>. Acesso em: 5 abr. 2023.

SINHA, Parikhit *et al.* Evaluation of potential health and environmental impacts from end-of-life disposal of photovoltaics. In: GILL, Monique A. (ed.). **Photovoltaics: synthesis, applications and emerging technologies**. New York: Nova Science Publishers, 2014. p. 1-232. Disponível em: <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2019/04/Evaluation-of-Potential-Health-and-Environmental-Impacts-from-End-of-life-Disposal-of-Photovoltaics.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SOLAR, Canadian. Produtos e Soluções. 2023. Disponível em: <https://www.csisolar.com/br/module/>. Acesso em: 5 mar. 2023.

SUZUKI, Carlos K. e PEREIRA, José Tomaz V. Energia solar e produção de silício metálico baseado no programa QITS ("Quartz Industrial Trade System"). In: **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 3., 2003, Campinas. Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000001000009&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 22 mar. 2023.

THIOLLENT, Michel. **Pesquisa-Ação nas Organizações**. São Paulo: Atlas, 2009. 164 p. U.S DEPARTMENT OF ENERGY (Washington). **How Does Solar Work?** 2022. Solar Energy Technologies Office. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work>. Acesso em: 11 jan. 2023.

UNIÃO EUROPEIA. Constituição (2012). Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho. **Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE)**. Estrasburgo, EU, Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>. Acesso em: 10 jan. 2023.

WONGNAREE, Natcha; KRITSARIKUN, Woranittha; MA-UD, Natthicha; KANSOMKET, Chatisa; UDOMPHOL, Tapany; KHUMKOA, Sakhob. Recovery of Silver from Solar Panel Waste: an experimental study. **Materials Science Forum**, [S.L.], v. 1009, p. 137-142, ago. 2020. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1009.137>.

XAVIER, Clésio Lourenço. **Núcleo de Estudos de Economia de Baixo Carbono: alumínio**. Ribeirão Preto, 2012. 129 p. Disponível em: http://www.comexresponde.gov.br/portalmDIC/arquivos/dwnl_1378388472.pdf. Acesso em: 03 abr. 2023.

XU, Y. et al. Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste Management**, v. 75, p. 450–458, maio 2018.

YADAV, Pankaj; PANDEY, Kavita; BHATT, Vishwa; KUMAR, Manoj; KIM, Joondong. Critical aspects of impedance spectroscopy in silicon solar cell characterization: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 76, p. 1562-1578, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.205>.

YOUSEF, Samy; TATARIANTS, Maksym; TICHONOVAS, Martynas; MAKAREVICIUS, Vidas. Sustainable technology for mass production of Ag nanoparticles and Al microparticles from damaged solar cell wafers. **Waste Management**, [S.L.], v. 98, p. 126-134, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.019>.

ZHANG, Chenglong; JIANG, Jianhang; MA, En; ZHANG, Lei; BAI, Jianfeng; WANG, Jingwei; BU, Yutao; FAN, Guoliang; WANG, Ruixue. Recovery of silver from crystal silicon solar panels in Self-Synthesized choline Chloride-Urea solvents system. **Waste Management**, [S.L.], v. 150, p. 280-289, ago. 2022. Elsevier BV.

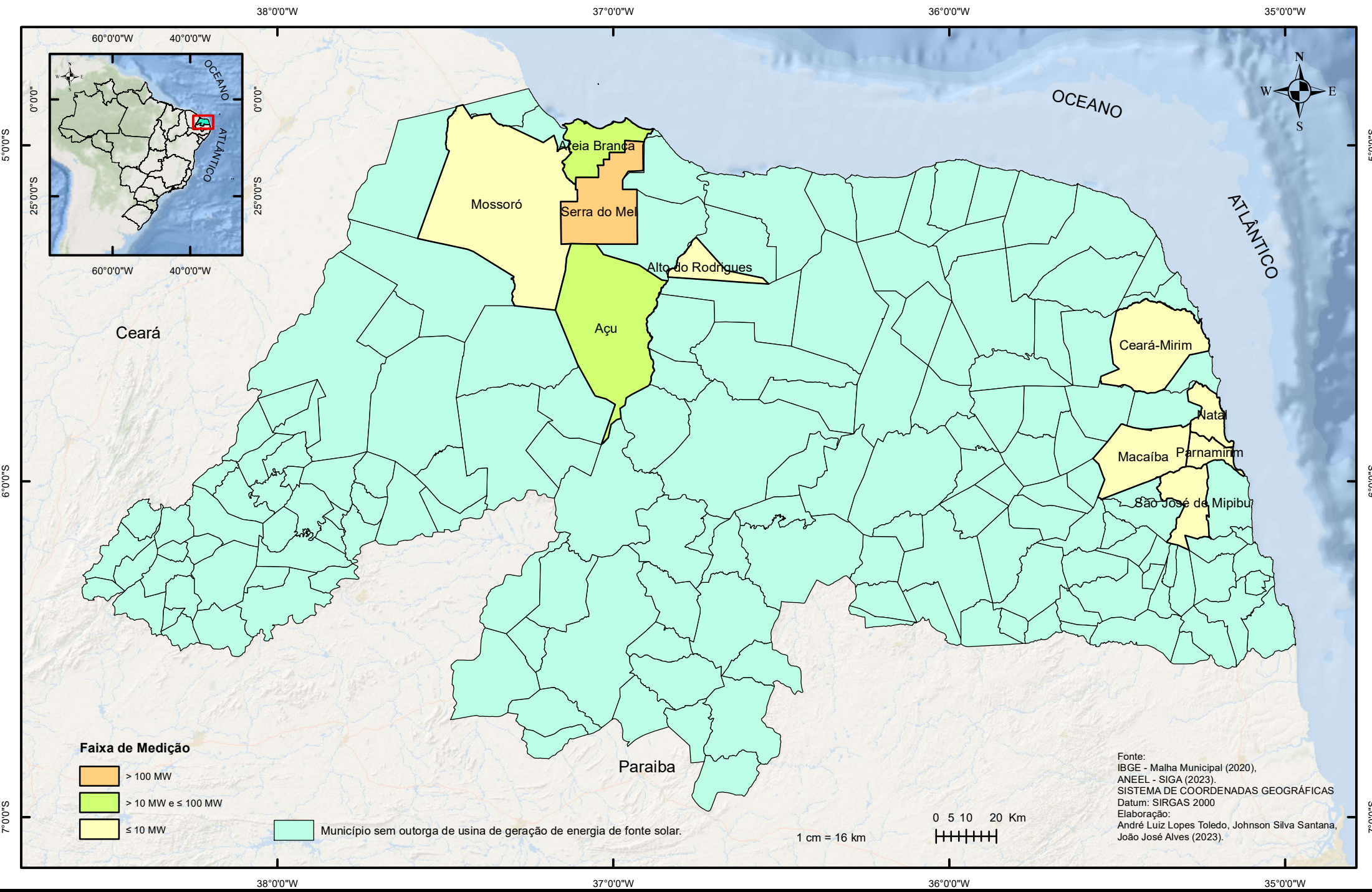
ZHANG, Zhen; LIU, Ming; WANG, Lei; CHEN, Tianpeng; ZHAO, Lei; HU, Yunfei; XU, Chuanjia. Optimization of indium recovery from waste crystalline silicon heterojunction solar cells by acid leaching. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [S.L.], v. 230, p. 111218, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111218>.

ZIEMIŃSKA-STOLARSKA, Aleksandra; PIETRZAK, Monika; ZBICIŃSKI, Ireneusz. Application of LCA to Determine Environmental Impact of Concentrated Photovoltaic Solar

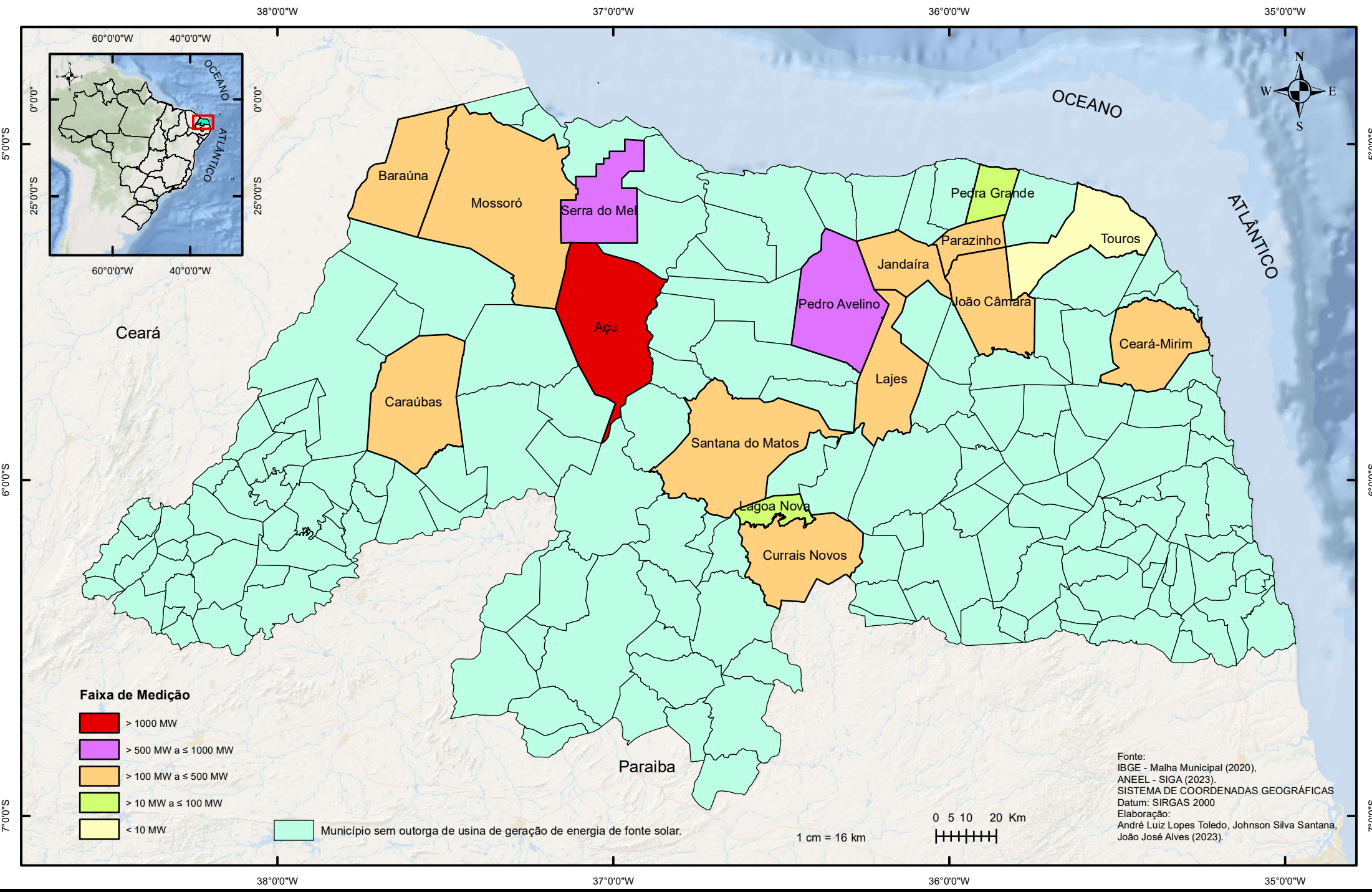
Panels—State-of-the-Art. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 3143, 27 maio 2021. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/en14113143>.

ANEXO A - MAPEAMENTO DA ESTIMATIVA DO VOLUME DE POTÊNCIA ELÉTRICA OUTORGADA A PARTIR DE FONTE SOLAR, A SER DESCOMISSIONADA NAS PRÓXIMAS DÉCADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

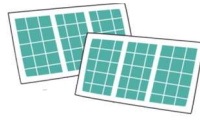
ESTIMATIVA DO VOLUME DE POTÊNCIA ELÉTRICA OUTORGADA A PARTIR DE FONTE SOLAR
A SER DESCOMMISSIONADA NO ESTADO DO RN
ENTRE OS ANOS DE 2039 E 2047



ESTIMATIVA DO VOLUME DE POTÊNCIA ELÉTRICA OUTORGADA A PARTIR DE FONTE SOLAR
A SER DESCOMISSIONADA NO ESTADO DO RN
ENTRE OS ANOS DE 2048 E 2051



**ANEXO B – REPORT DESCOMISSIONAMENTOS DE EMPREENDIMENTOS
GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA, A PARTIR DE FONTE SOLAR NO
ESTADO DO RN: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**



REPORT DESCOMISSIONAMENTOS DE EMPREENDIMENTOS GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE FONTE SOLAR NO ESTADO DO RN: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

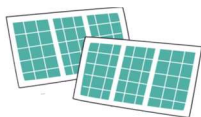


@Dall-E

André Luiz de Toledo

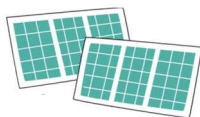
Johnson Silva Santana

2023



SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	56
METODOLOGIA.....	58
PANORAMA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE.....	60
PANORAMA POR MUNICÍPIO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE.....	68
ALTO DO RODRIGUES/RN	68
AREIA BRANCA/RN	70
AÇU/RN	72
BARAÚNAS/RN	73
CARAÚNAS/RN	75
CEARÁ-MIRIM/RN	77
CURRAIS NOVOS/RN.....	78
JANDAÍRA/RN	80
JOÃO CÂMARA/RN	82
LAGOA NOVA/RN	84
LAJES/RN	86
MACAÍBA/RN	88
MOSSORÓ/RN	90
NATAL/RN	91
PARAZINHO/RN	93
PARNAMIRIM/RN	95
PEDRA GRANDE/RN	97
PEDRO AVELINO/RN.....	99
SANTANA DO MATO/RN	101
SÃO JOSÉ DE MIPIBU/RN	103
SERRA DO MEL/RN.....	105
TOUROS/RN.....	106
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
REFERÊNCIAS	109



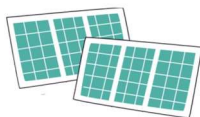
INTRODUÇÃO

A rápida expansão da indústria fotovoltaica baseada em incentivos fiscais, sem uma política pública de educação ambiental e gestão de resíduos sólidos, oriundos de equipamentos eletrônicos, se traduzirá em uma elevada quantidade de resíduos descartados de forma inadequada gerando risco à saúde pública e ao meio ambiente nos próximos anos. Conforme afirma Xu *et al.* (2018), os próprios painéis apresentarão uma outra questão ambiental: quando sua vida útil terminar, eles se tornaram uma forma perigosa de lixo, pois como os painéis solares possuem uma longa vida útil, a reciclagem deste tipo de resíduos não era uma preocupação durante os primeiros 25 anos de desenvolvimento desta indústria.

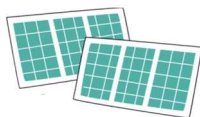
Os painéis fotovoltaicos são constituídos por um agrupamento de células fotovoltaicas, são compostos por preciosos e cancerígenos metais: cádmium (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), prata (Ag), selênio (Se) e telúrio (Te) (SICA *ET AL.*, 2018). Além de que possuem em sua composição os minerais como, estanho (Sn) e silício (Si), revestimentos de camadas de vidro, a qual desempenha o papel de camada protetora das fotocélulas e moldes de suporte em geralmente feito de alumínio (Al). Assim, ao serem descartados de maneira inadequada ou depositados em aterros sanitários, os painéis podem sofrer processos de lixiviação dos metais pesados, infiltrando os resíduos tóxicos no solo ou contaminando corpos d'águas, caso não tomadas as devidas precauções, os tornando inadequados para o consumo humano ou desenvolvimento de atividades econômicas.

O Estado do Rio Grande do Norte, tem demonstrado um potencial de expansão da oferta de energia gerada a partir de fonte solar, atualmente existem 179 empreendimentos, em operação, construção ou com obras não iniciadas (licenciados), totalizando mais de 7 Gigawatts de energia outorgados a serem produzidas a partir deste tipo de fonte nas próximas décadas. Todavia, existem uma ausência de políticas públicas que abordem a temática de descomissionamento de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar. Desta forma, a gestão dos resíduos gerados por esta atividade nas próximas décadas se tornará desafio para o Poder Público, o qual tem sido inerte a esta problemática atualmente.

Portanto, este Report tem como objetivo apresentar as estimativas de volume de energia elétrica outorgada produzida a partir de fonte solar a ser descomissionada entre os períodos de 2038 a 2047 e de 2047 a 2051 no Estado do Rio Grande do Norte (RN). Assim como, estimativa



da quantidade de resíduos a serem gerados a cada MW descomissionado e o potencial de geração de receita da reciclagem destes materiais por município no RN.

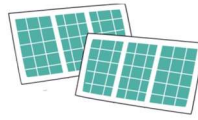


METODOLOGIA

Para coleta de dados se definiu o Estado do Rio Grande do Norte como recorte espacial, assim como a análise dos dados disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através do Sistema de Informações de Geração (SIGA), referente ao mês de fevereiro de 2023, versão 1.0, como recorte temporal. Ressalta-se que a escolha pelo estudo de empreendimentos com potência outorgada transcorreu pelo fato que estas centrais geradoras fotovoltaicas demandam procedimentos processuais para autorização e concessão de direitos por parte da autarquia federal (ANEEL) aos seus proprietários. Tais procedimentos são fontes geradoras de informações, as quais podem ser verificadas através de fontes de dados governamentais.

No levantamento foram identificados empreendimentos em fase de construção não iniciada, sem evidências de registros sobre a abertura e conclusão do processo de licenciamento ambiental, consultados no portal do IDEMA (sistemas.idema.rn.gov.br). Dessa forma, se realizou uma estimativa de tempo transcorrido para emissão da licença ambiental, baseado em empreendimentos em fase de operação, conforme consta no SIGA, os quais totalizaram seis UFV (Floresta I, Floresta II, Floresta III, Assú V, Serra do Mel I e Serra do Mel II), resultando em estimativa média de 16 meses para emissão das licenças ambientais iniciais. Haja visto a existência de empreendimentos de empreendimentos em fase de construção e obras não iniciadas, também se fez necessário estimar o tempo necessário transcorrido entre a emissão das licenças ambientais iniciais e a data de comissionamento registrada no SIGA, levando em consideração os empreendimentos em fase de operação, os quais totalizaram seis UFV (Floresta I, Floresta II, Floresta III, Assú V, Serra do Mel I e Serra do Mel II), totalizando 18 meses.

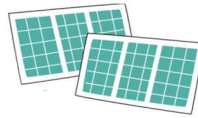
Com base nas informações coletadas (estimativa de período para execução do licenciamento ambiental, construção e comissionamento dos empreendimentos) e a expectativa de vida útil de 25 anos dos painéis fotovoltaicos, a contar da data de comissionamento dos empreendimentos. Assim como, que ao término deste período, a manutenção dos painéis fotovoltaicos empregados nos empreendimentos se tornará financeiramente desvantajoso, se criou dois cenários com períodos distintos para melhor compreensão da geração deste tipo de resíduo sólido no Estado do Rio Grande do Norte. O primeiro entre os anos de 2039 e 2047, o qual abrange os empreendimentos que foram outorgados no período compreendido entre os anos de 2014 e 2022, de acordo com o SIGA. E o segundo período, entre os anos de 2048 e



2051, abrangendo os empreendimentos que serão comissionados, entre os anos de 2023 e 2025, baseados nas estimativas efetuadas por este estudo.

Os empreendimentos outorgados são compostos por módulos fotovoltaicos monocristalinos ou policristalinos, com potência de pico (Wp) de 345, 535 ou 640 Wp. Para estimativa do peso gerada em quilograma (kg) para cada Wp produzido foram coletados dados de 2 marcas distintas para cada potência de pico descritos anteriormente, totalizando seis. Subsequentemente, se realizou a divisão da potência dos painéis Wp pelo peso informado pelo fabricante dos módulos, posteriormente a média simples e empregando a regra do arredondamento com três casas decimais, objetivando estipular um peso padrão para cada Wp produzido que será aplicado neste estudo.

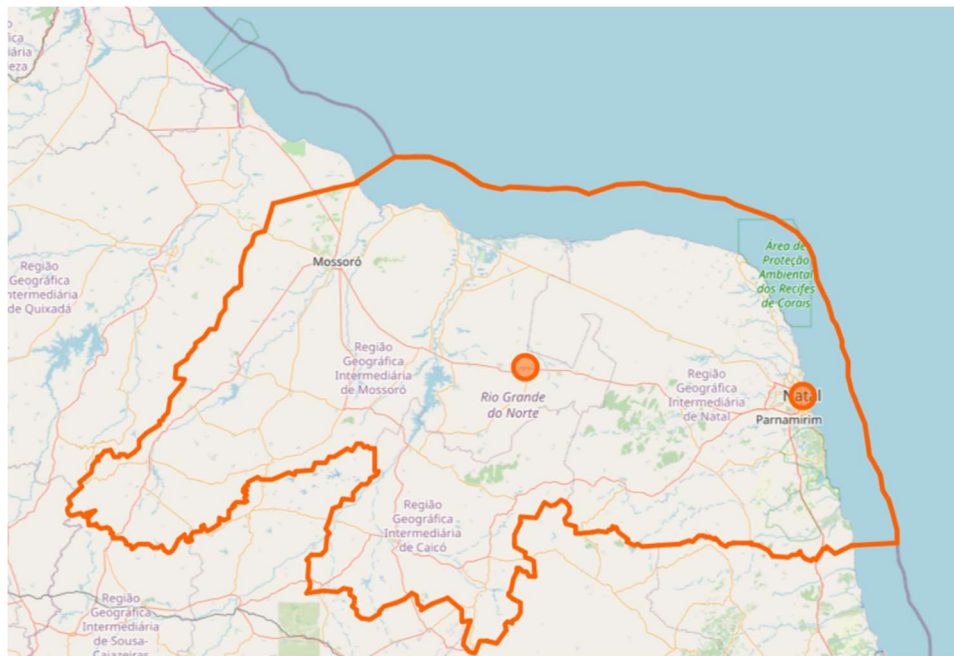
Ao término do cálculo do peso padrão para cada Wp produzido adotado neste estudo, foi realizado o cálculo do volume de resíduos gerados por cada MW outorgado. Como 0,058 kg de resíduos são gerados para cada Wp outorgado e 1 MW equivale a 1.000.000 W. Logo, a resultante da multiplicação de 0,058 kg/Wp por 1.000.000 Wp será de 58.000 kg, a qual equivale a 58 toneladas de resíduos gerado. Vislumbrando quantificar a quantidade em tonelada de resíduos sólidos oriundos do processo de descomissionamento de empreendimento geradores de energia elétrica a partir de fonte solar, se recorreu à: revisões da literatura sobre a quantidade de material recuperado a partir da reciclagem de painéis fotovoltaicos e coleta de dados sobre quantidade de módulos (painéis) fotovoltaicos descritos nos processos de licenciamento ambiental. Conforme estudos realizados por Mir e Dhawan (2022), a cada 1 tonelada de mix de painéis fotovoltaicos são recuperados: 9,32 kg de cobre (Cu), 0,30 kg de prata (Ag), 33,48 kg de silício (Si) e 1,12 kg de estanho (Sn). Além disso, foram utilizados dados dos estudos adaptados de Ziemińska-Stolarska, Pietrzak e Zbiciński (2021), a estrutura de composição dos módulos fotovoltaicos são compostas por cinco partes, camada protetora externa (vidro), frame (suporte do painel), EVA/backsheet, células fotovoltaicas e cabos condutores de cobre, correspondentes respectivamente a 70%, 18%, 6%, 4% e 2% do total do peso do módulo.



PANORAMA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

O Rio Grande do Norte possui uma extensão territorial de 52.809,599 km², população estimada de 3.560.903 pessoas, com rendimento mensal domiciliar per capita de R\$ 1.267,00 e PIB estimado de R\$ 71,5 bilhões (IBGE, 2023). Os limites geográficos do Estado são ilustrados na Figura 1 – Limites geográficos do Estado do Rio Grande do Norte.

Figura 1 – Limites geográficos do Estado do Rio Grande do Norte



Fonte: Openstreetmap (2023)

Estimativa apontam que o volume de energia a ser descomissionada no Estado do RN para próximas décadas são superiores a 7 gigawatts. Conforme ilustrado na Figura 2 – Estimativa do volume de descomissionamento entre os períodos de 2039 a 2047 e 2048 a 2051.

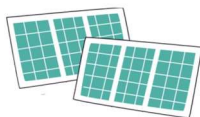
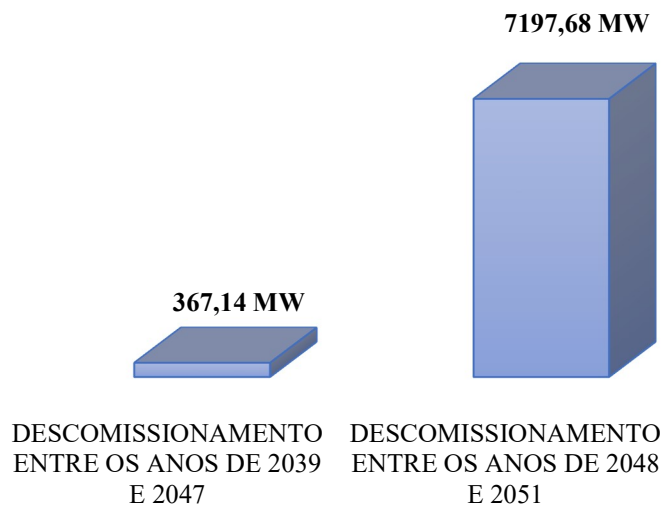


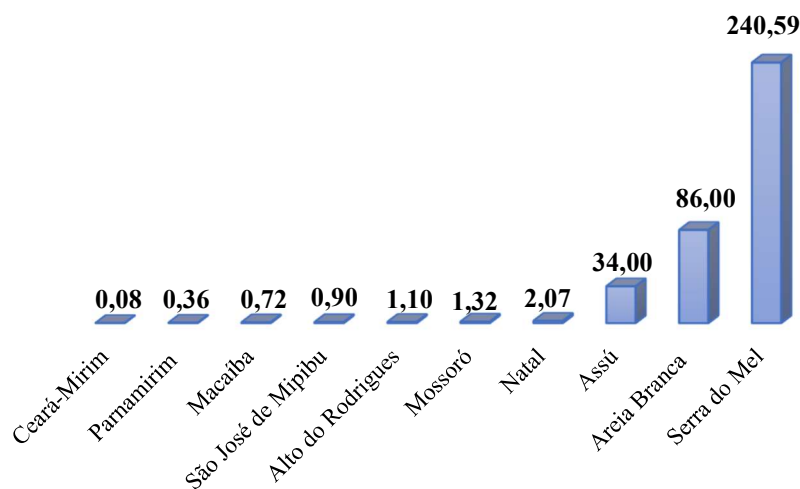
Figura 2 – Estimativa do volume de descomissionamento entre os períodos de 2039 a 2047 e 2048 a 2051



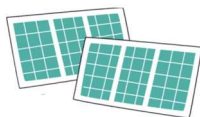
Fonte: Elaboração própria em 2023, com base em dados (SIGA, 2023).

A distribuição dos megawatts outorgados a serem descomissionados por município entre o período de 2039 a 2047 podem ser verificadas na Figura 3 - Estimativa de volume de energia (MW) outorgada a ser descomissionada de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar por municípios do RN entre o período de 2039 a 2047:

Figura 3 - Estimativa de volume de energia (MW) outorgada a ser descomissionada de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar por municípios do RN entre o período de 2039 a 2047



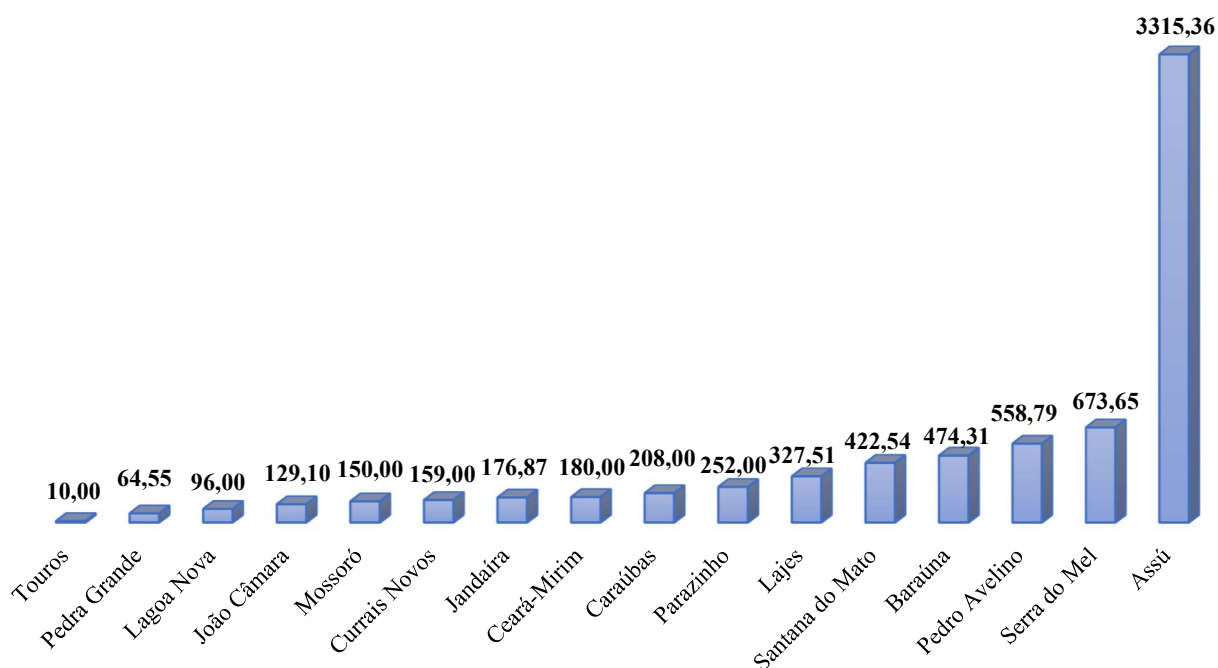
Fonte: Elaboração própria em 2023, com base em dados (SIGA, 2023).



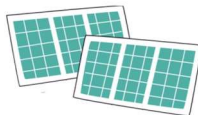
Nota-se que os municípios com maiores concentrações de volume a ser descomissionados são Serra do Mel/RN com 240,59 MW, seguidos por Areia Branca/RN com 84 MW e Açu com 34 MW. Os demais municípios apresentam volumes menores, com quantidades pouco representativa quando comparados aos três maiores produtores. Nestes municípios o uso da energia elétrica gerada a partir de fonte solar tem sido aplicada principalmente em plantas industriais ou comércios de médio a grande porte.

O período entre 2048 e 2051 se registrou mudanças no número de municípios com volumes de resíduos a serem descomissionados, passando de 10 para 17. Assim como, neste intervalo de tempo os municípios de Açu/RN, Alto do Rodrigues/RN, Areia Branca/RN, Ceará-Mirim/RN, Macaíba/RN, Mossoró/RN, Natal/RN e Parnamirim/RN deixaram de figurar na listagem, como pode-se observar na Figura 4 - Estimativa de volume de energia (MW) outorgada a ser descomissionada de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar por municípios do RN entre o período de 2048 a 2051:

Figura 4 - Estimativa de volume de energia (MW) outorgada a ser descomissionada de empreendimentos geradores de energia elétrica a partir de fonte solar por municípios do RN entre o período de 2048 a 2051



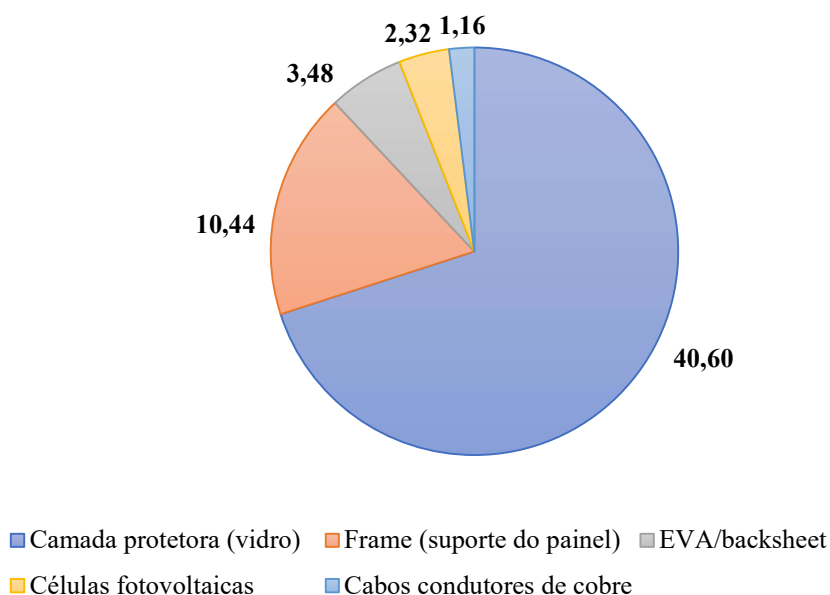
Fonte: Elaboração própria em 2023, com base em dados (SIGA, 2023).



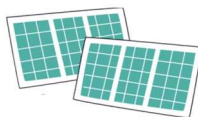
Observa-se que no período entre 2039 e 2047 são estimados que 367,14 MW de energia elétrica outorgada produzida a partir de fonte solar será descomissionada. Enquanto no período entre 2048 e 2051, são estimados em 7197,68 MW, um acréscimo de mais de 1900% em um intervalo de apenas de 3 anos.

Como 0,058 kg de resíduos são gerados para cada Wp outorgado e 1 MW equivale a 1.000.000 W. Logo, a resultante da multiplicação de 0,058 kg/Wp por 1.000.000 Wp será de 58.000 kg, a qual equivale a 58 toneladas de resíduos gerado. Dessa forma, cada MW descomissionado gerará 40,60 t de vidro (camada protetora), 10,44 t de frame (suporte de alumínio do painel), 3,48 t de EVA/backsheet (camada isolante), 2,32 t de células fotovoltaicas e 1,16 t de cabos condutores de cobre, conforme ilustrado na Figura 5 - Volume de resíduos em toneladas (t) gerados por MW representado em partes constituintes dos painéis fotovoltaicos:

Figura 5 - Volume de resíduos em toneladas (t) gerados por MW representado em partes constituintes dos painéis fotovoltaicos

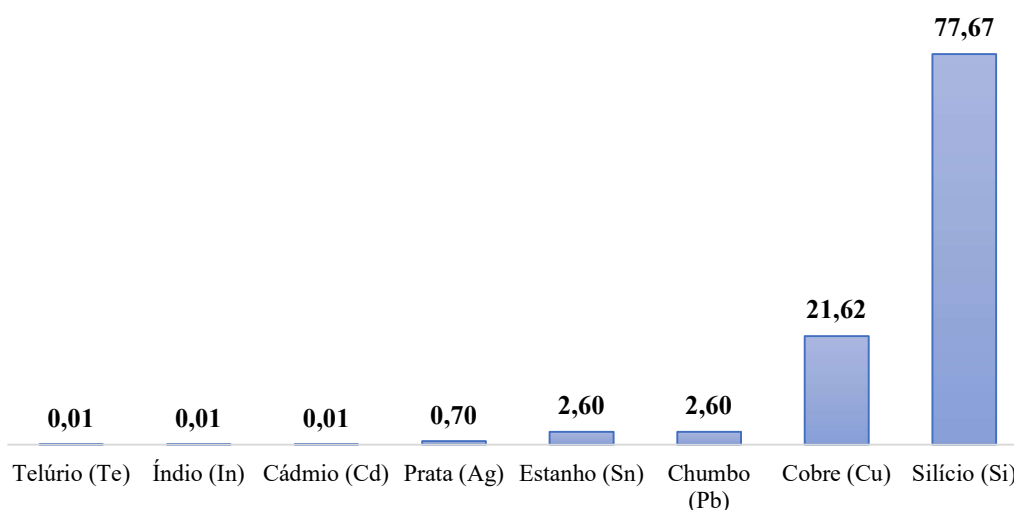


Fonte: Elaboração própria em 2023.



Considerando o volume de material reciclado recuperado a partir da reciclagem das células fotovoltaicas, se estimou que cada MW descomissionado gerará 0,01 kg de Telúrio, Índio e Cádmio, 0,70 kg de Prata, 2,60 kg de Estanho e Chumbo, 21,62 kg de Cobre e 77,67 kg de Silício, a Figura 6 – Quantidade de material em gramas recuperados da reciclagem das fotocélulas, ilustra as informações descritas anteriormente:

Figura 6 – Quantidade de material em gramas recuperados da reciclagem das fotocélulas



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Estima-se que até o ano de 2051, o Estado do RN gerará aproximadamente 896.960,39 t de resíduos, distribuídos entre os períodos de 2039 a 2047 e 2048 a 2051, a Figura 7 – Volume de resíduos gerados entre os períodos de 2039 a 2047 e 2048 a 2051 no Estado do RN, explana estas hipóteses:

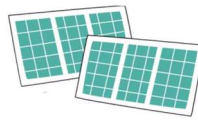
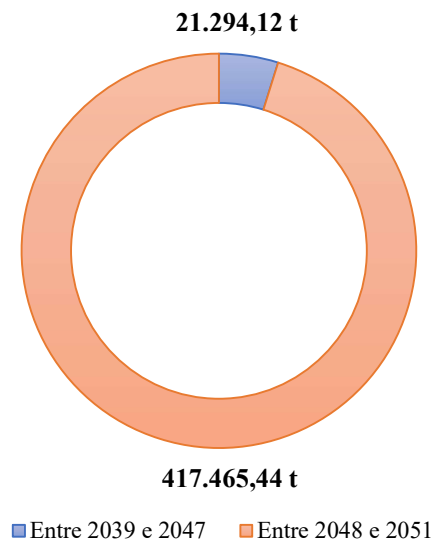


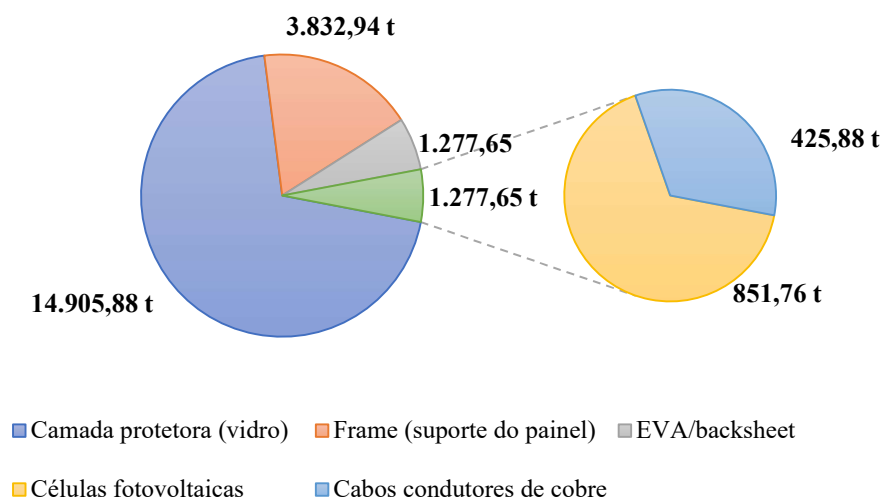
Figura 7 – Volume de resíduos gerados entre os períodos de 2039 a 2047 e 2048 a 2051 no Estado do RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

A Figura 8 – Estimativa de volume gerado entre 2039 e 2047 por partes constituintes dos painéis e a Figura 9 - Estimativa de volume gerado entre 2048 e 2051 por partes constituintes dos painéis, explicita o volume de resíduo por períodos:

Figura 8 – Estimativa de volume gerado entre 2039 e 2047 por partes constituintes dos painéis



Fonte: Elaboração própria em 2023.

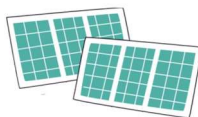
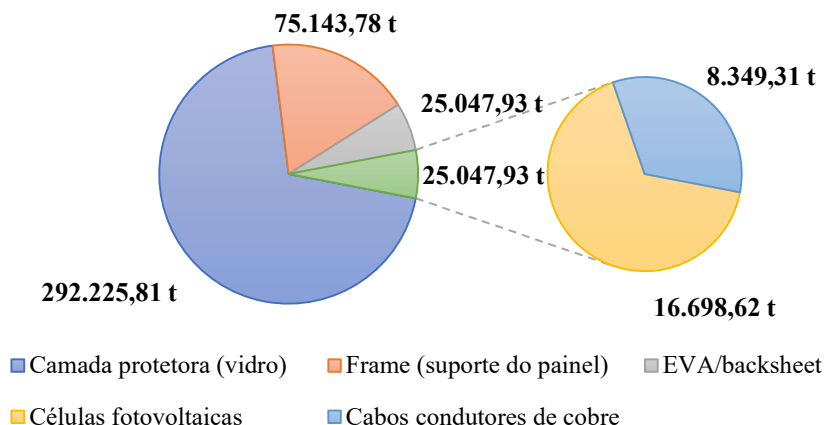


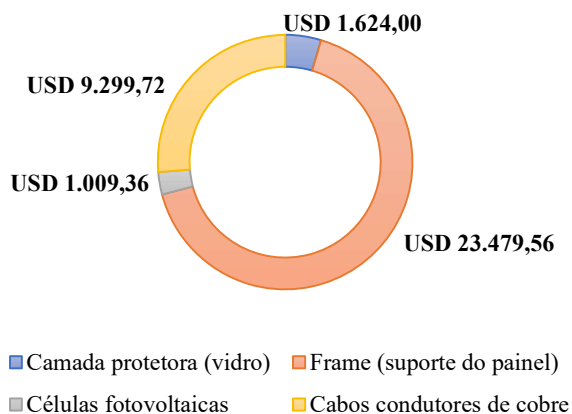
Figura 9 – Estimativa de volume gerado entre 2048 e 2051 por partes constituintes dos painéis



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Com base na aplicação da metodologia descrita anteriormente, aferiu que cada MW a ser descomissionado tem um potencial de geração de receita avaliado em US\$ 35.412,64, ao se aplicar métodos de reciclagem para recuperação de materiais de interesse econômico, a Figura 10 – Potencial de geração de receita por MW descomissionado por parte constituinte dos painéis fotovoltaicos, representa esta conjunta. Ressalta-se que a camada isolante constituída pela EVA e o backsheet não foram considerados nos cálculos, visto que os processos de reciclagem visando a recuperação de materiais com potencial econômico ainda necessitam de mais estudos validados pela comunidade acadêmica.

Figura 10 – Potencial de geração de receita por MW descomissionado por parte constituinte dos painéis fotovoltaicos

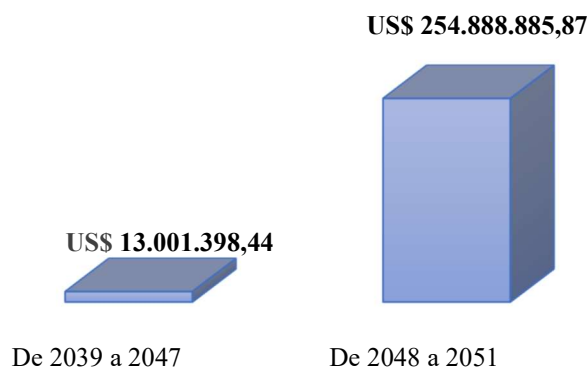


Fonte: Elaboração própria em 2023.

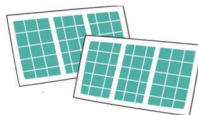


O potencial de geração de receita da recuperação de materiais através da aplicação de técnicas de reciclagem até o ano de 2051 no Estado do RN, foi avaliado em mais US\$ 267.000.000, em consonância com as previsões realizadas da IRENA; IEA-PVPS (2016), as quais estimam que no ano de 2050, a reciclagem de painéis fotovoltaicos pode gerar receitas superior a US\$ 50 bilhões, conforme demonstrado na Figura 11 – Potencial de geração de receita do descomissionamento até 2051 no Estado do RN:

Figura 11 – Potencial de geração de receita do descomissionamento até 2051 no Estado do RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.



PANORAMA POR MUNICÍPIO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

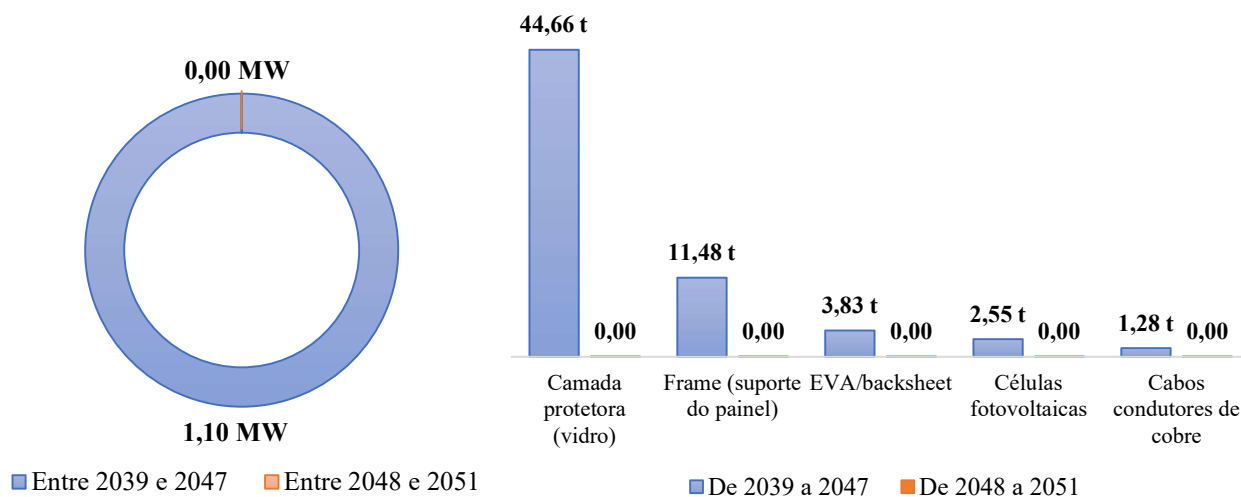
O panorama por município do Estado do Rio Grande do Norte, apresenta estimativas de energia elétrica outorgada produzidas a partir de fonte solar a serem descomissionadas, o volume de resíduos e potencial de geração de receitas da recuperação para cada municipalidade que houve registros de empreendimentos no SIGA (fevereiro/2023).

ALTO DO RODRIGUES/RN

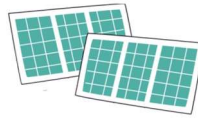
Área	191,334 km ²
População	14.923 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 36.375,17

Fonte: IBGE (2023)

Figura 12 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Alto do Rodrigues/RN

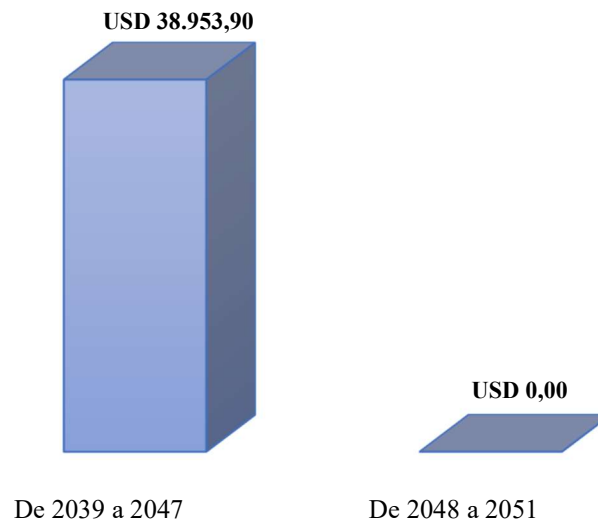


Fonte: Elaboração própria em 2023.

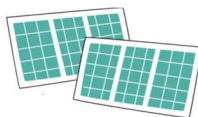


Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2048 e 2051, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

Figura 13 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Alto do Rodrigues/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

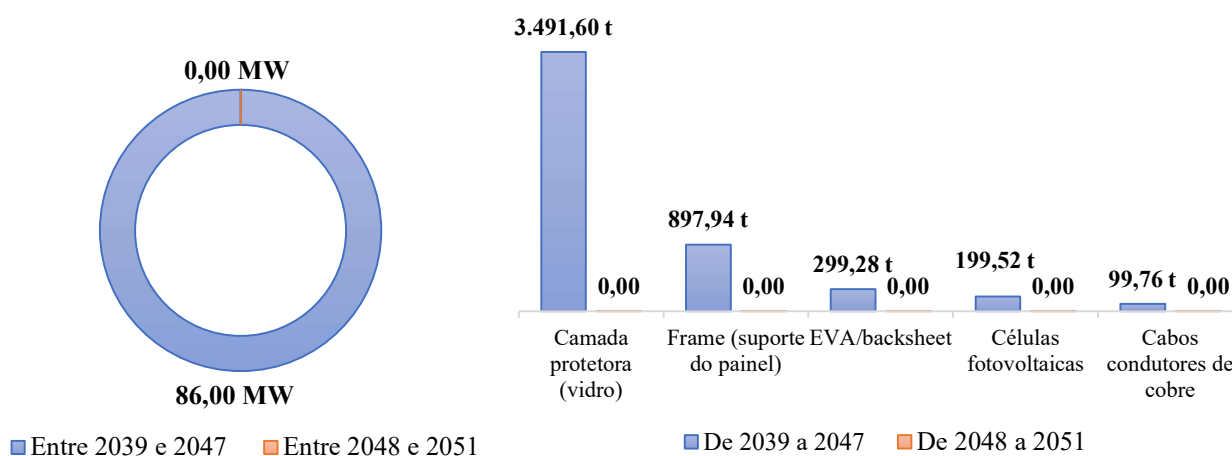


AREIA BRANCA/RN

Área	342,749 km ²
População	28.156 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 25.368,87

Fonte: IBGE (2023).

Figura 14 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Areia Branca/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2048 e 2051, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

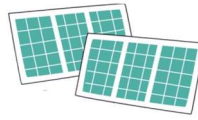
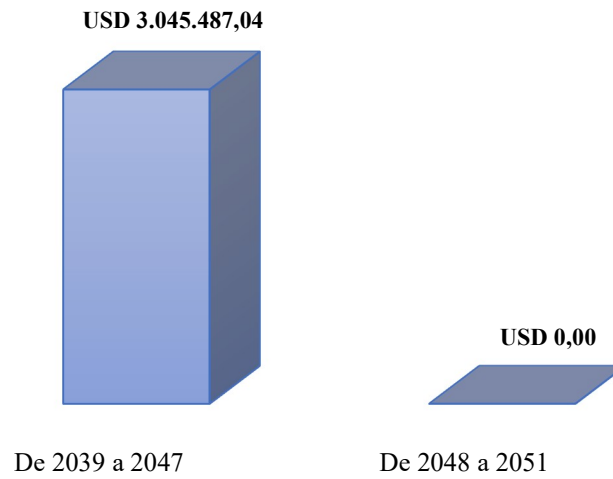
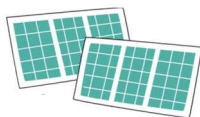


Figura 15 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Areia Branca/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

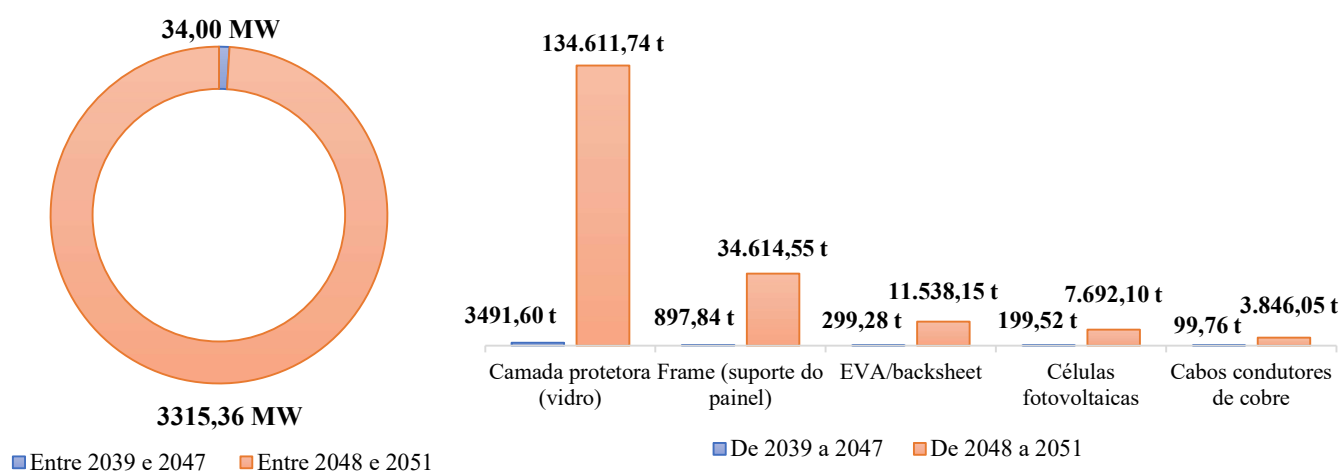


AÇU/RN

Área	1.303,442 km ²
População	58.743 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 20.041,15

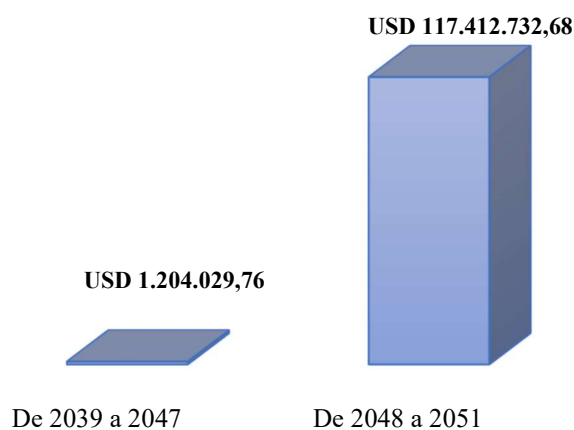
Fonte: IBGE (2023).

Figura 16 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Açu/RN

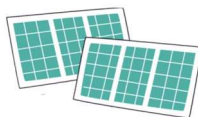


Fonte: Elaboração própria em 2023.

Figura 17 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Açu/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

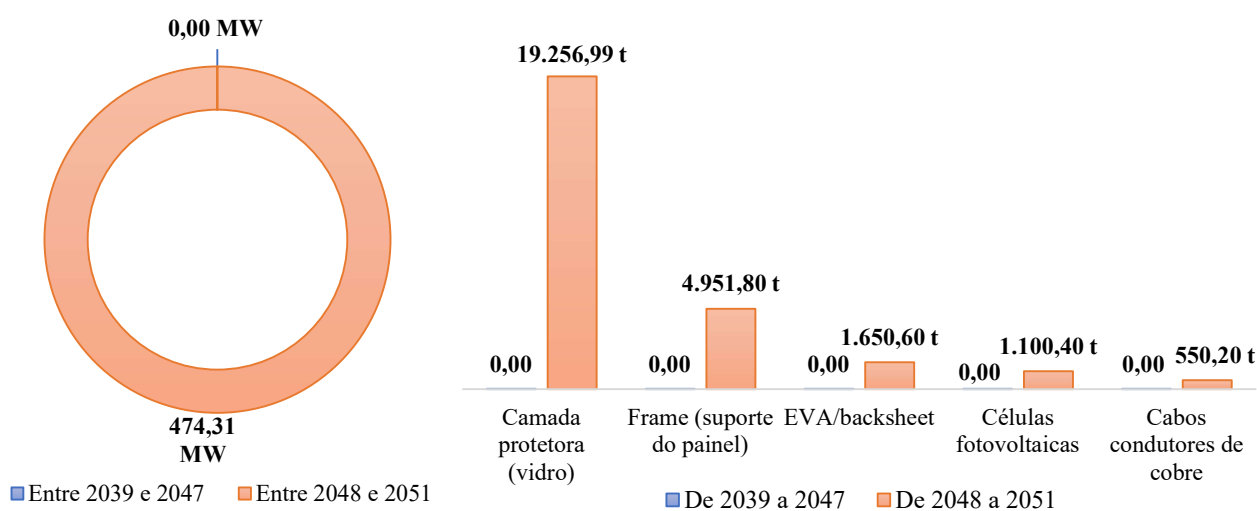


BARAÚNAS/RN

Área	825,681 km ²
População	29.112 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 24.463,19

Fonte: IBGE (2023).

Figura 18 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Baraúnas/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

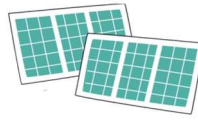
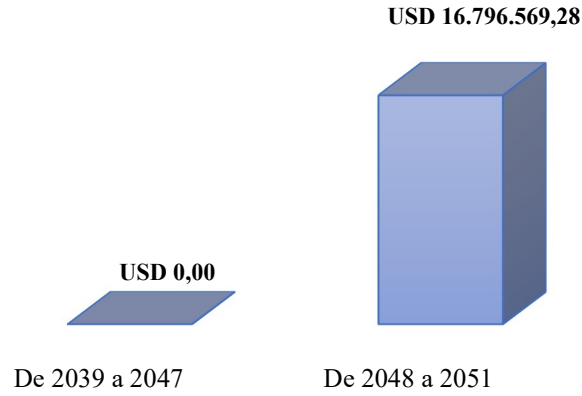
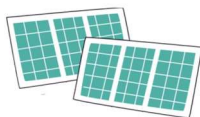


Figura 19 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Baraúnas/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

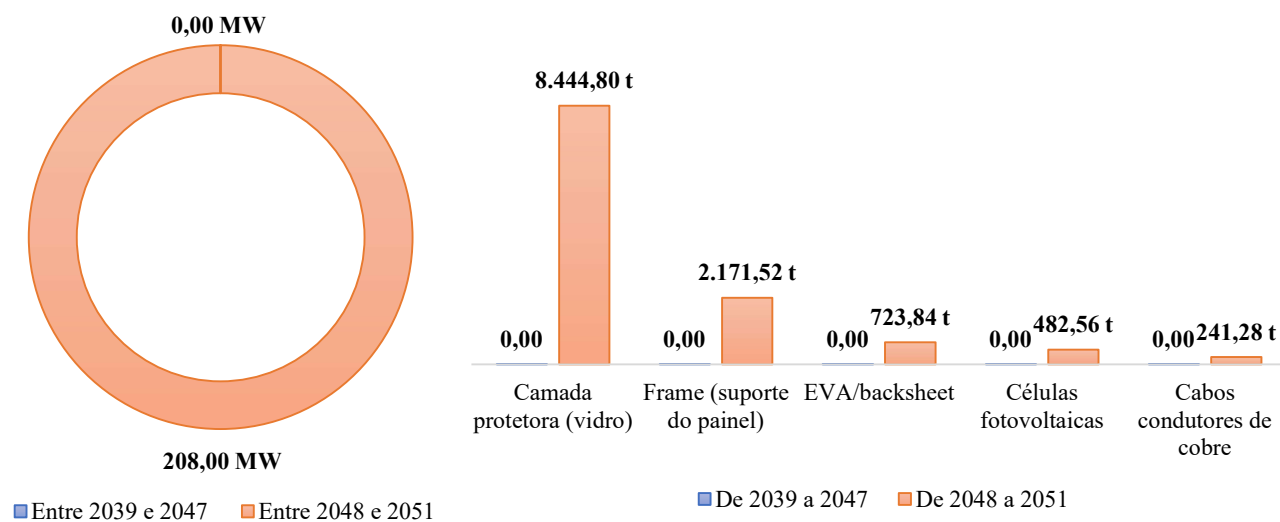


CARAÚNAS/RN

Área	1.095,803 km ²
População	20.588 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 15.743,45

Fonte: IBGE (2023).

Figura 20 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Caraúbas/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

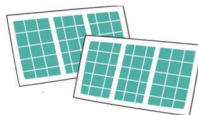
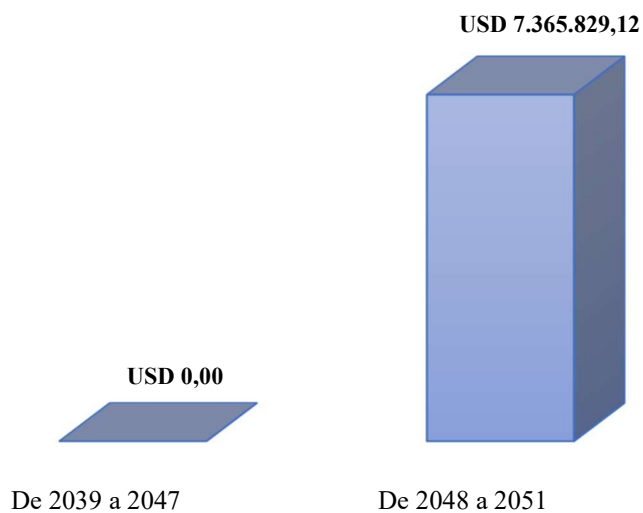
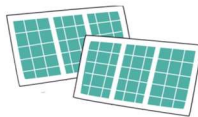


Figura 21 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Caraúbas/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

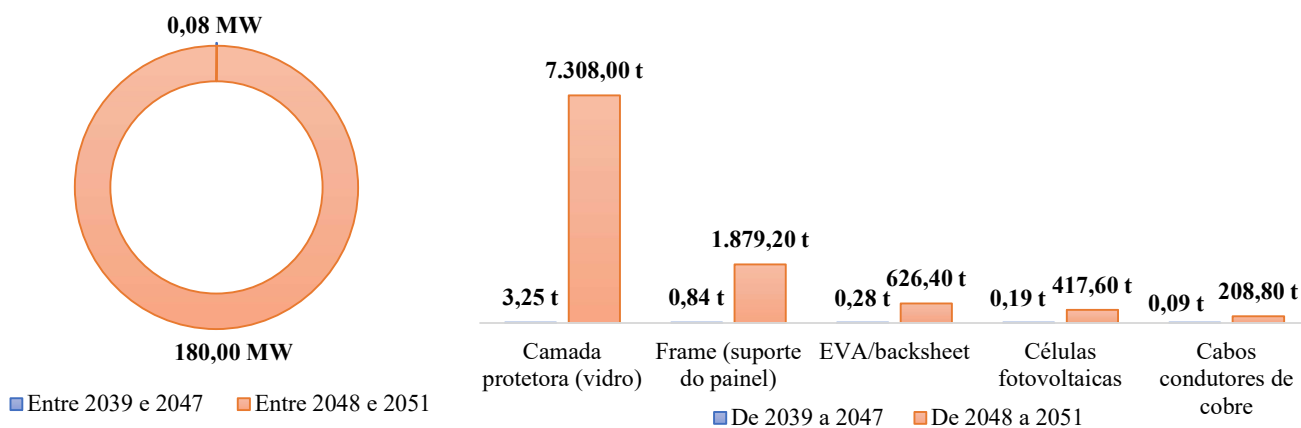


CEARÁ-MIRIM/RN

Área	724,838 km ²
População	74.268 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 12.914,33

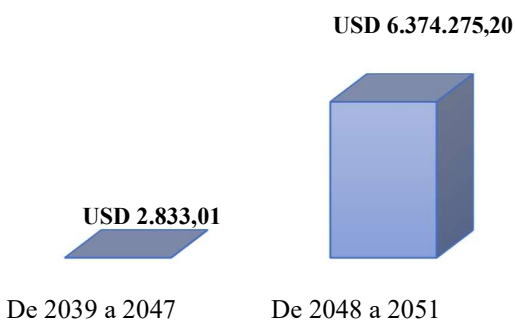
Fonte: IBGE (2023).

Figura 22 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Ceará-Mirim/RN

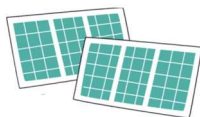


Fonte: Elaboração própria em 2023.

Figura 22 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Ceará-Mirim/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

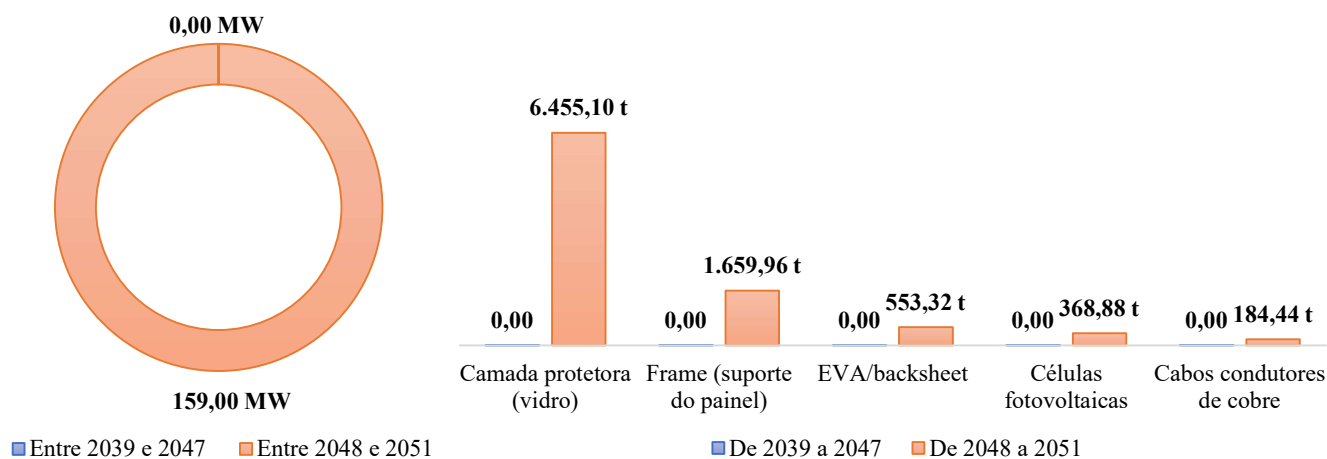


CURRAIS NOVOS/RN

Área	864,349 km ²
População	45.022 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 16.670,54

Fonte: IBGE (2023).

Figura 23 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Currais Novos/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

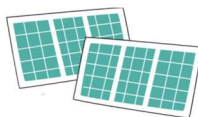
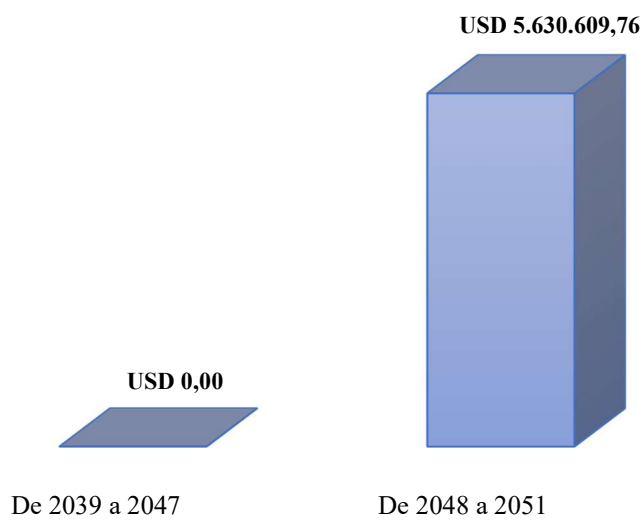
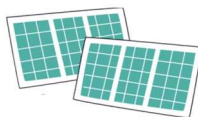


Figura 24 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Currais Novos/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

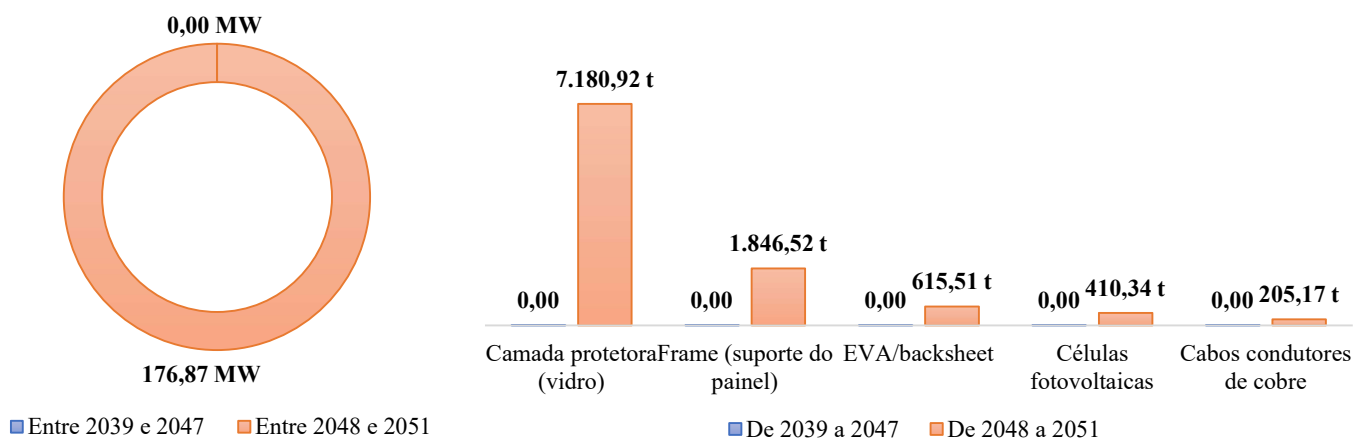


JANDAÍRA/RN

Área	442,754 km ²
População	6.907 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 10.812,44

Fonte: IBGE (2023).

Figura 25 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Jandaíra/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

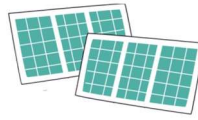
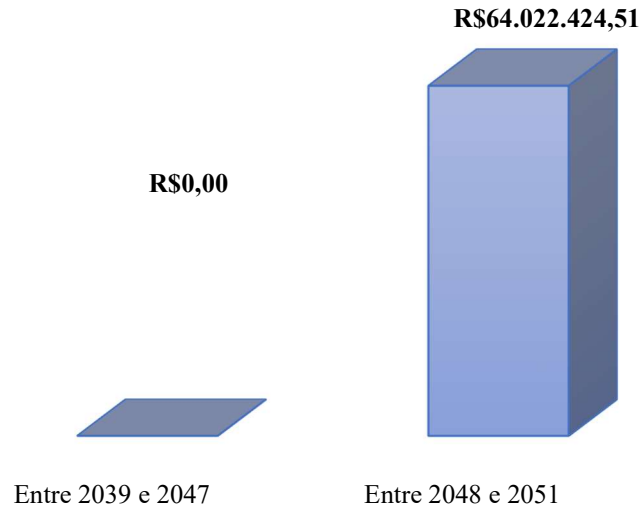
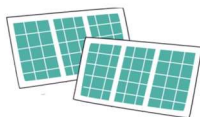


Figura 26 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Jandaíra/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

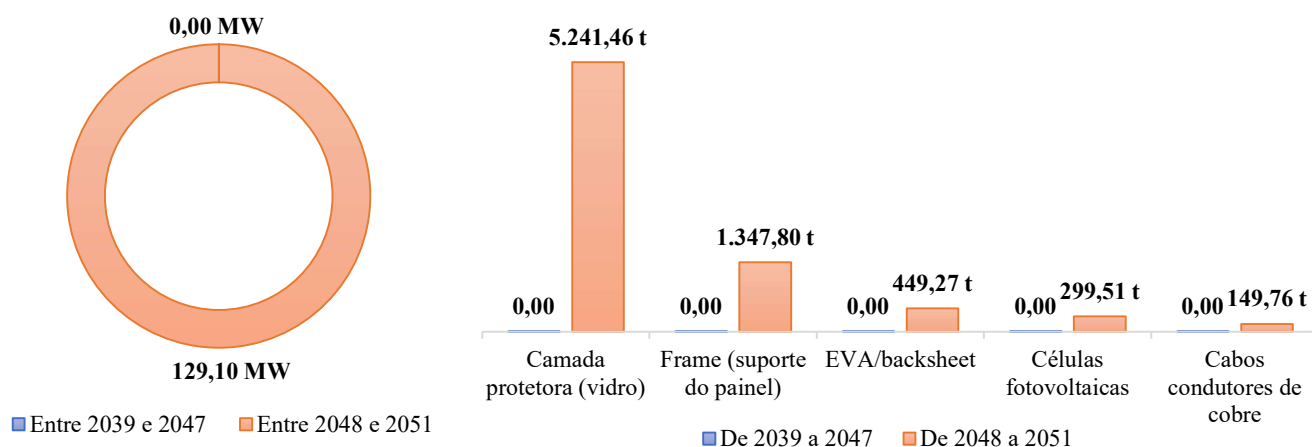


JOÃO CÂMARA/RN

Área	714,961 km ²
População	35.360 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 31.013,55

Fonte: IBGE (2023).

Figura 27 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de João Câmara/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

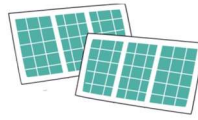
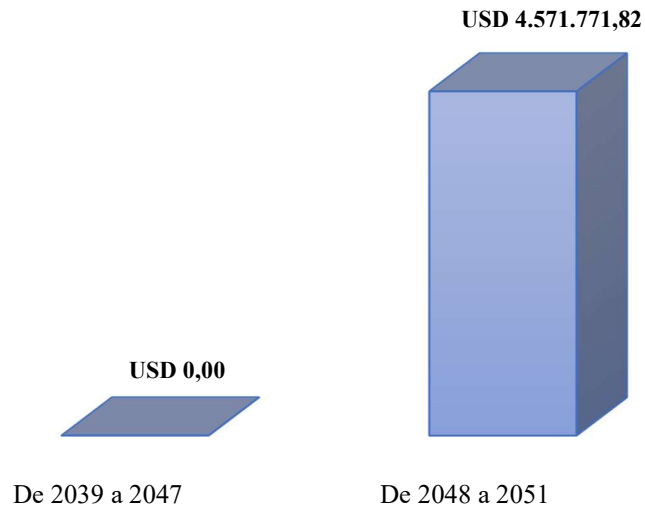
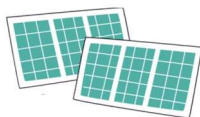


Figura 28 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de João Câmara/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.



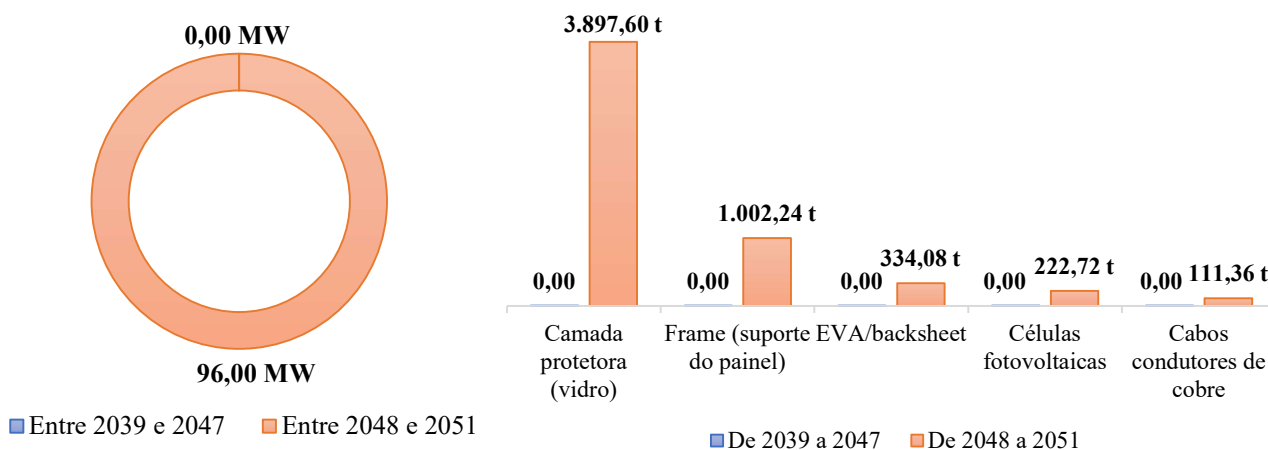
LAGOA NOVA/RN

Área	176,302 km ²
População	15.880 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 15.608,51

Fonte: IBGE (2023).

Figura 29 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Lagoa

Nova/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

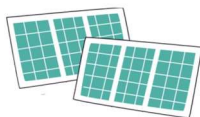
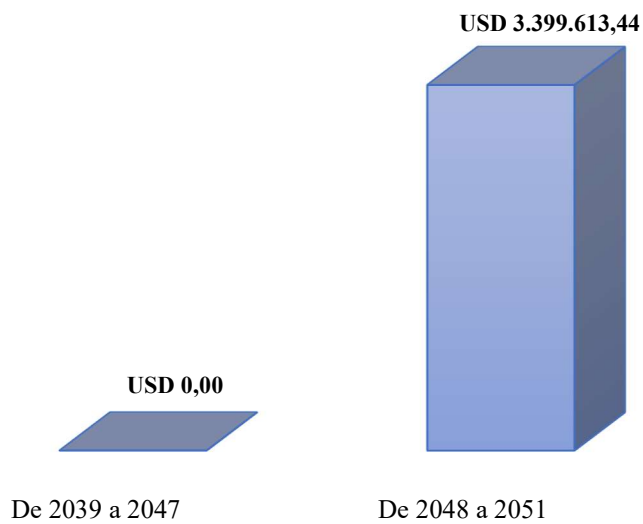
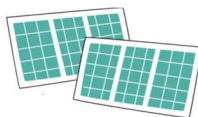


Figura 30 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Lagoa Nova/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

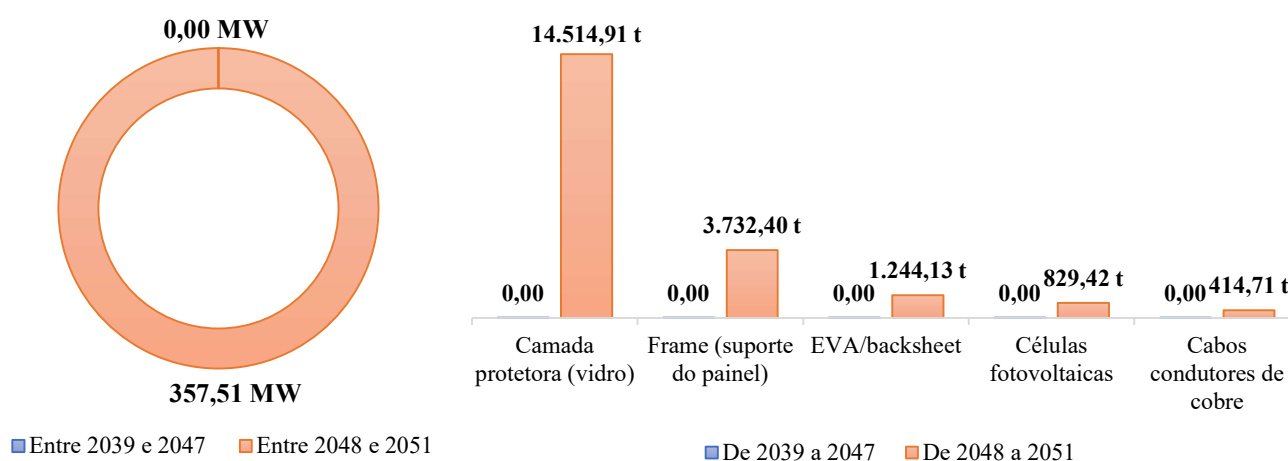


LAJES/RN

Área	676,625 km ²
População	11.410 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 12.286,67

Fonte: IBGE (2023).

Figura 30 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Lajes/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

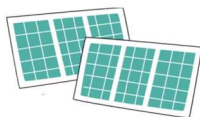
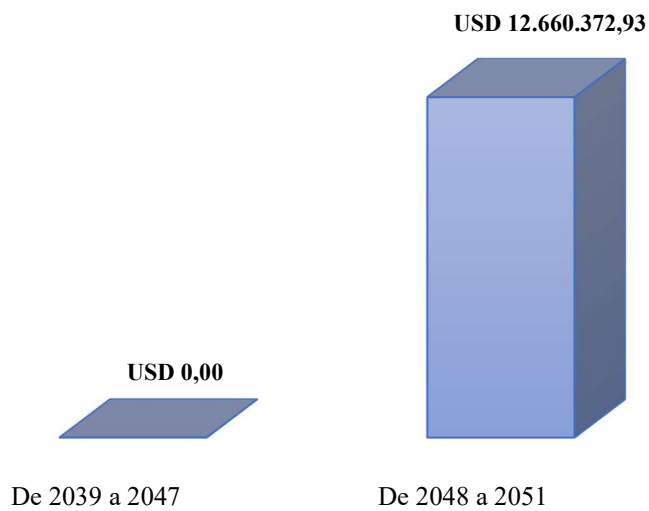
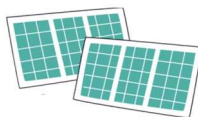


Figura 31 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Lajes/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

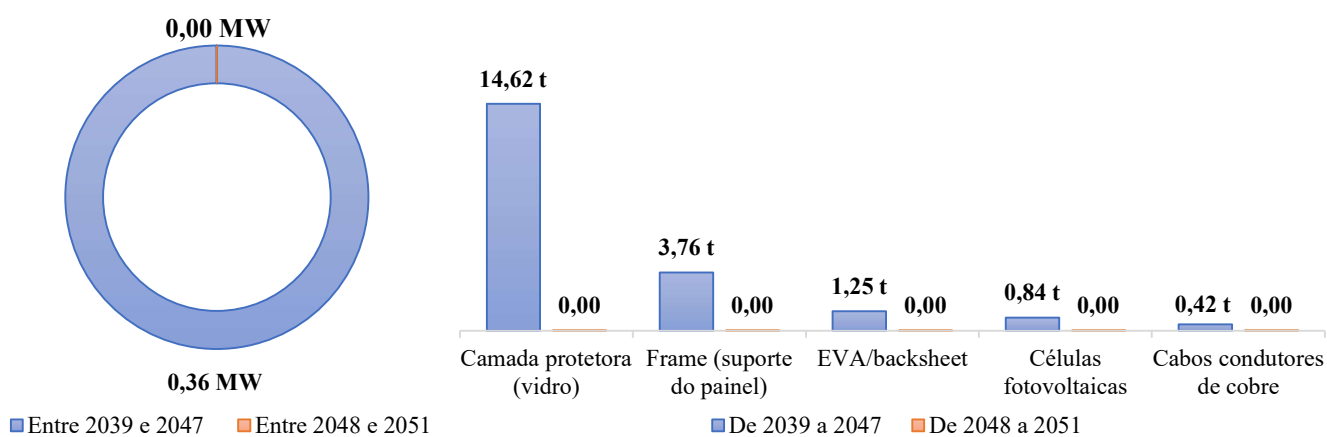


MACAÍBA/RN

Área	510,092 km ²
População	82.828 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 20.524,42

Fonte: IBGE (2023).

Figura 32 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Lajes/RN

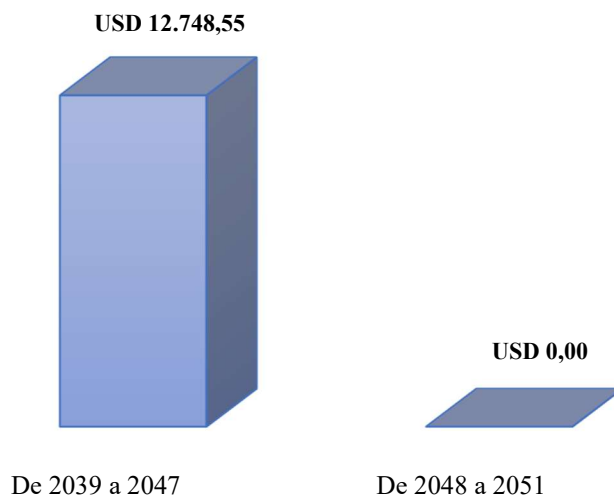


Fonte: Elaboração própria em 2023.

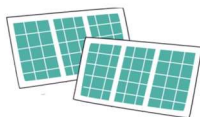
Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2048 e 2051, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.



Figura 33 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Macaíba/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

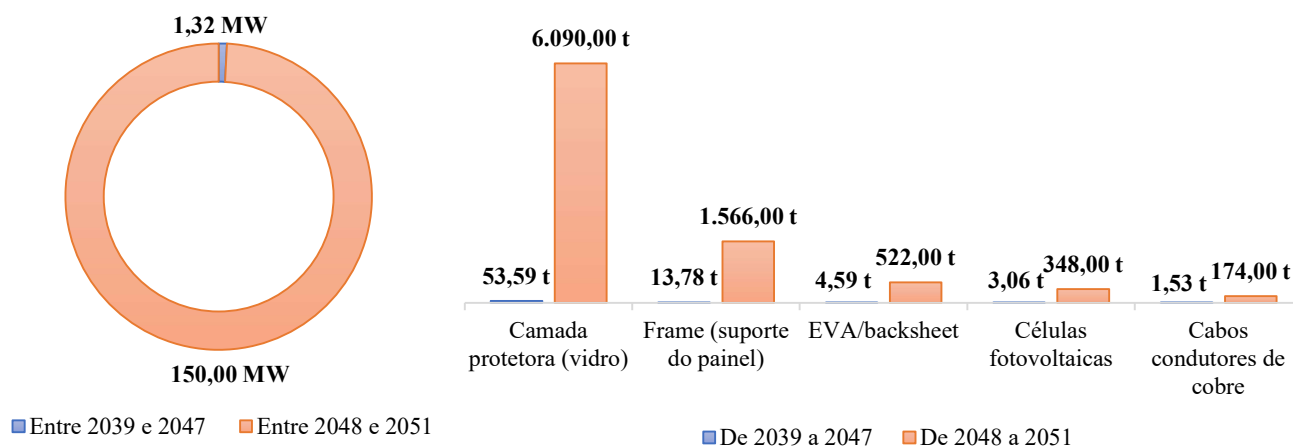


MOSSORÓ/RN

Área	2.099,334 km ²
População	303.792 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 23.838,91

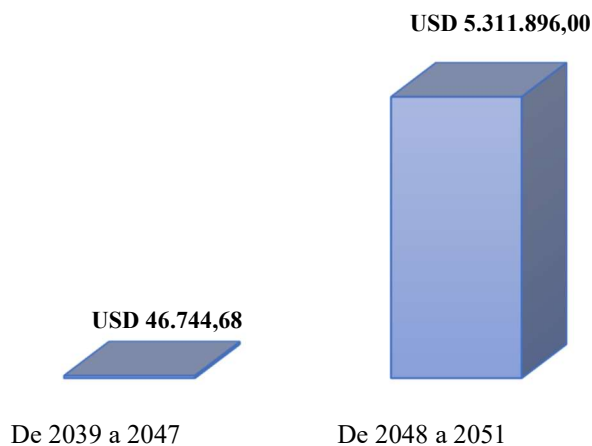
Fonte: IBGE (2023).

Figura 34 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Mossoró/RN

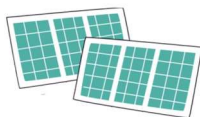


Fonte: Elaboração própria em 2023.

Figura 35 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Mossoró/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

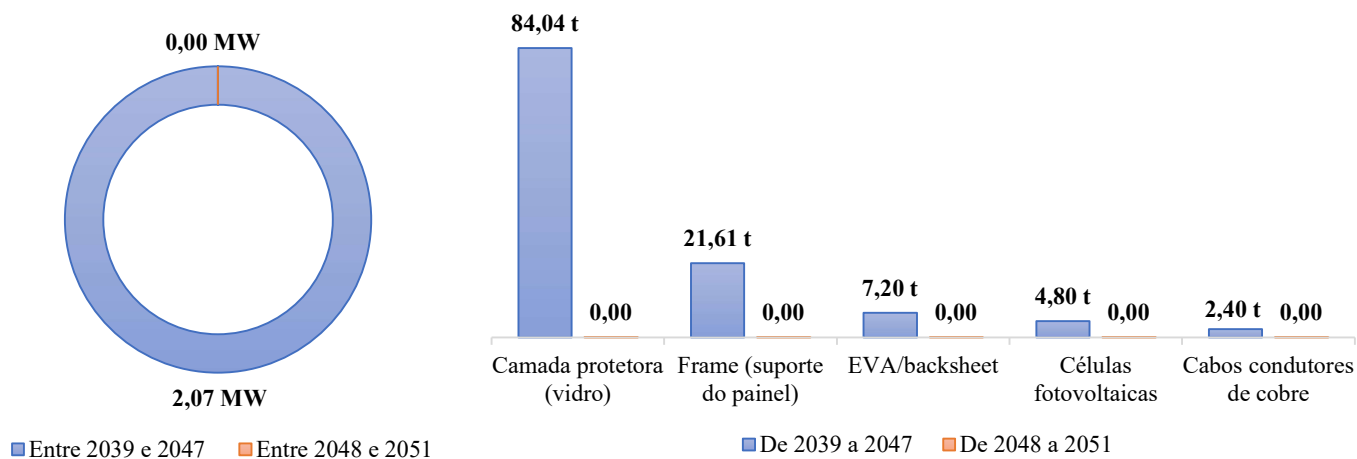


NATAL/RN

Área	167,401 km ²
População	896.708 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 25.525,30

Fonte: IBGE (2023).

Figura 36 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Natal/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2048 e 2051, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

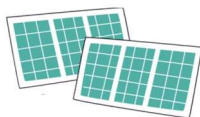
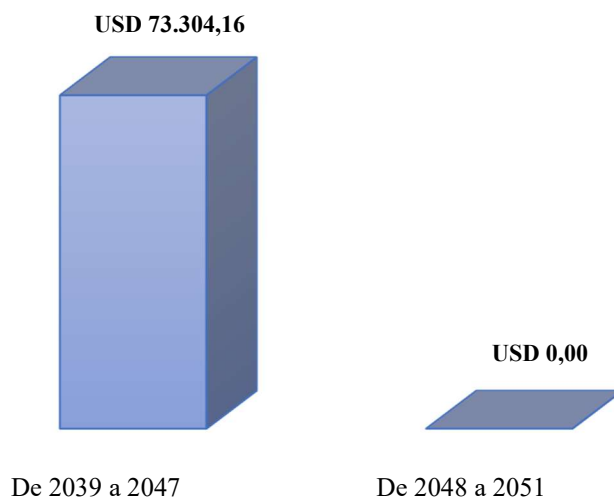
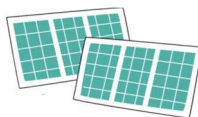


Figura 37 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Natal/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

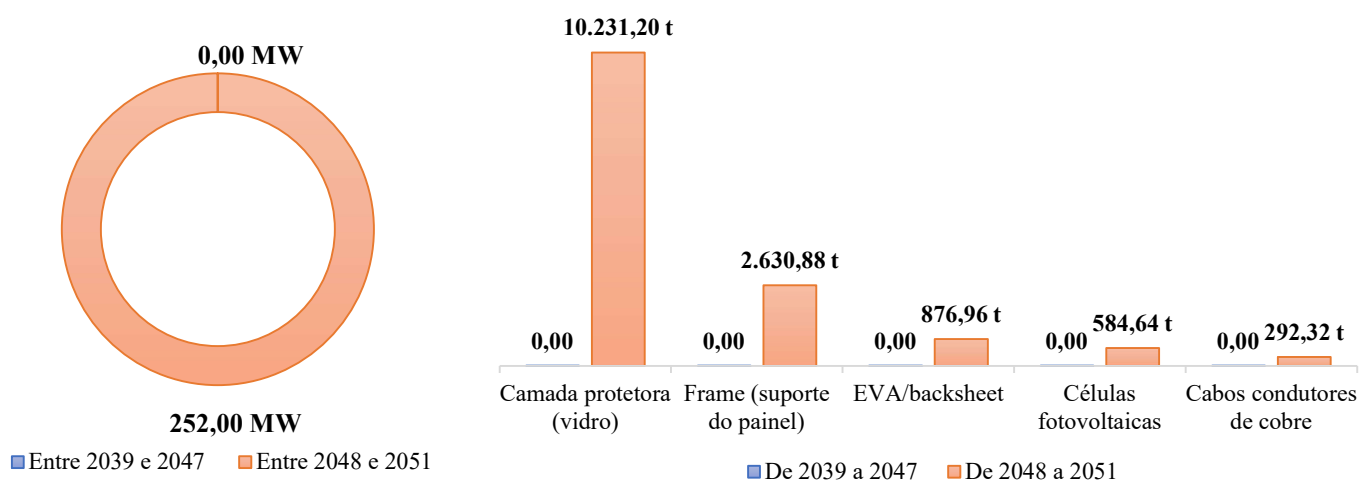


PARAZINHO/RN

Área	231,007 km ²
População	5.307 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 76.046,11

Fonte: IBGE (2023).

Figura 38 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Parazinho/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

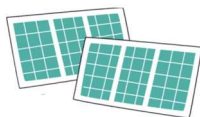
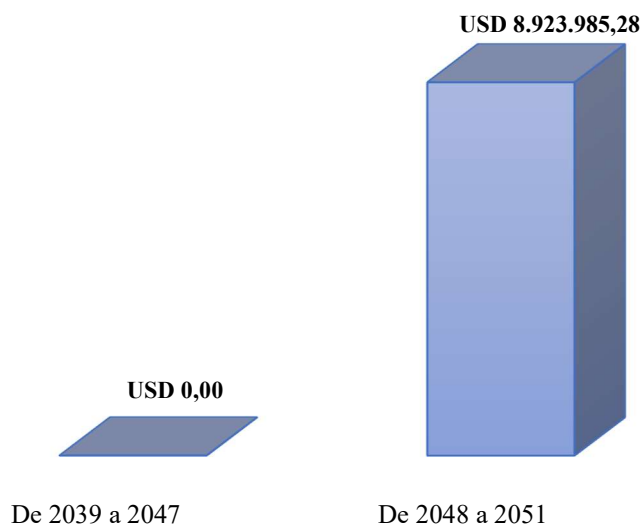
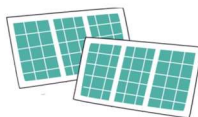


Figura 39 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Parazinho/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

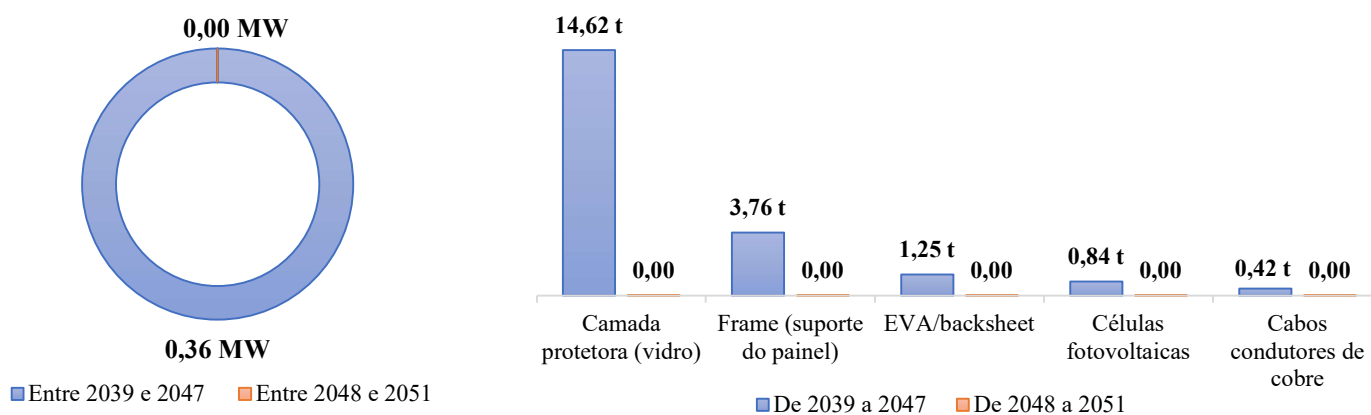


PARNAMIRIM/RN

Área	124,006 km ²
População	272.490 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 22.015,57

Fonte: IBGE (2023).

Figura 40 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Parnamirim/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2048 e 2051, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

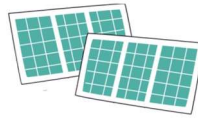
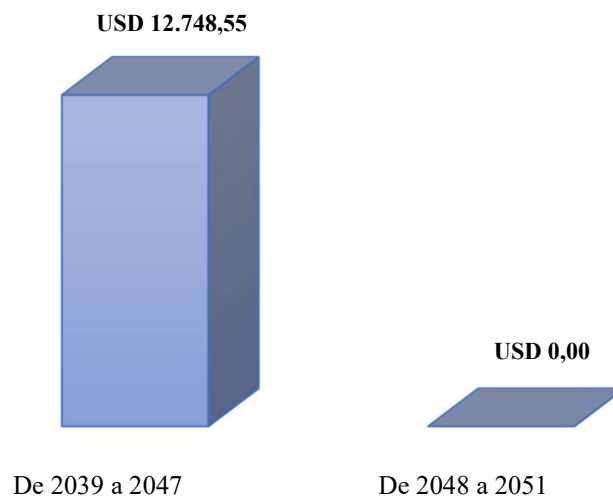
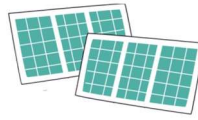


Figura 41 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Parnamirim/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

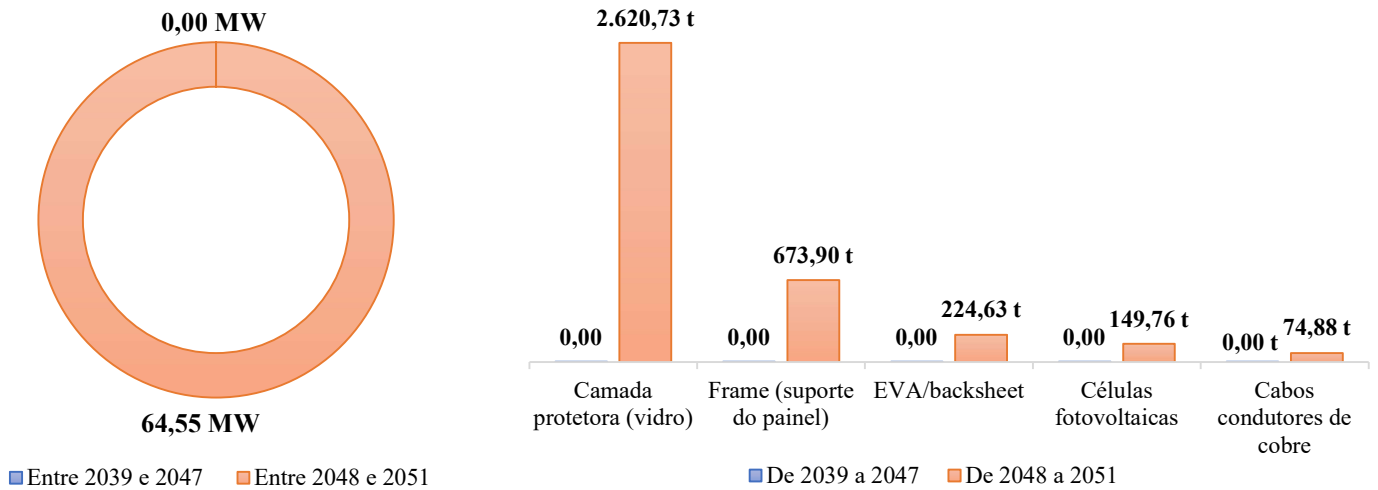


PEDRA GRANDE/RN

Área	221,167 km ²
População	3.163 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 124.924,52

Fonte: IBGE (2023).

Figura 42 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Pedra Grande/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

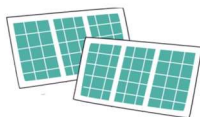
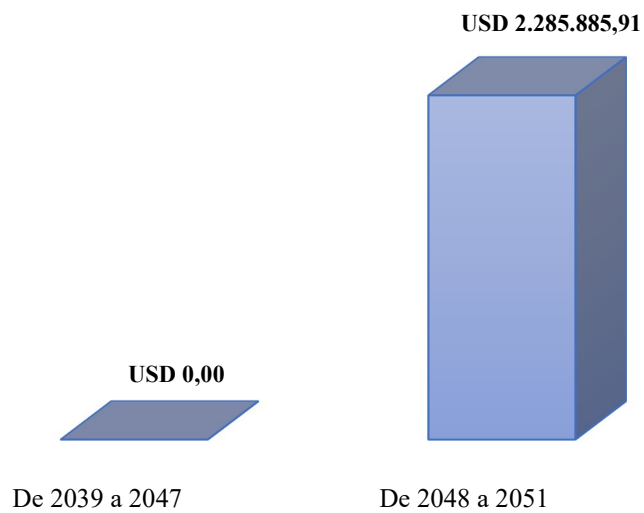


Figura 43 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Pedra Grande/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

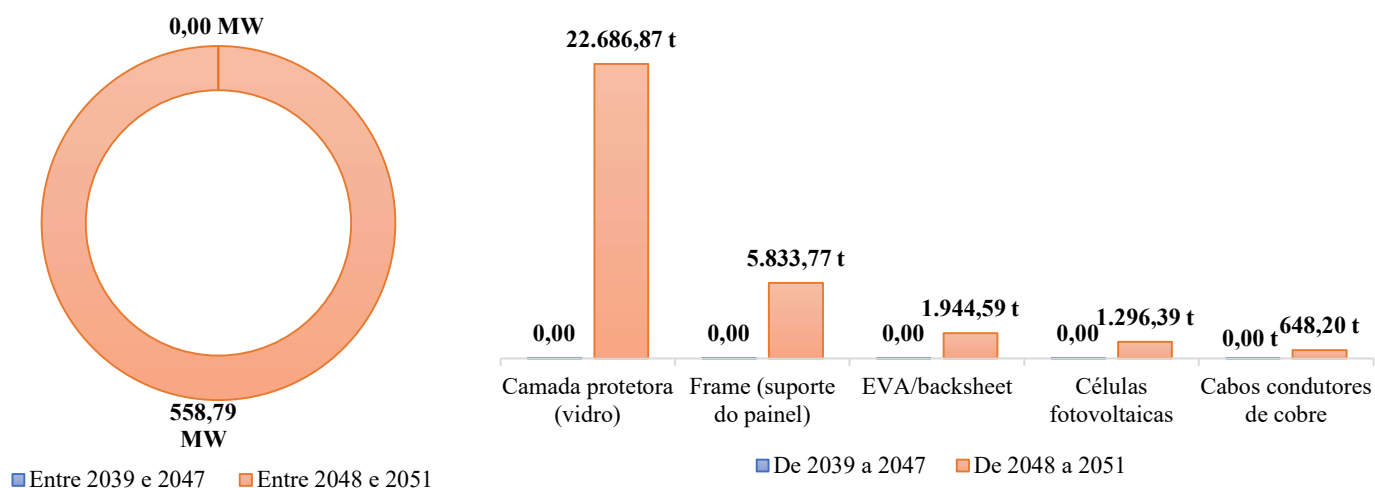


PEDRO AVELINO/RN

Área	952,755 km ²
População	6.591 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 10.484,77

Fonte: IBGE (2023).

Figura 44 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Pedro Avelino/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

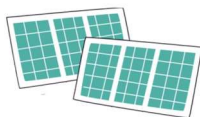
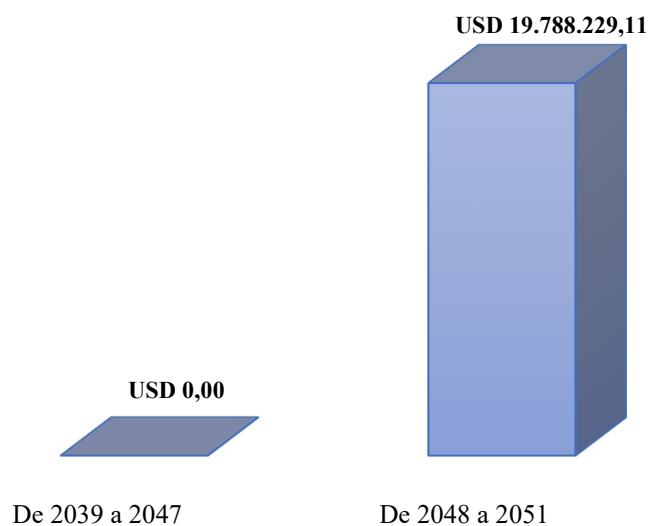


Figura 45 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Pedro Avelino/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

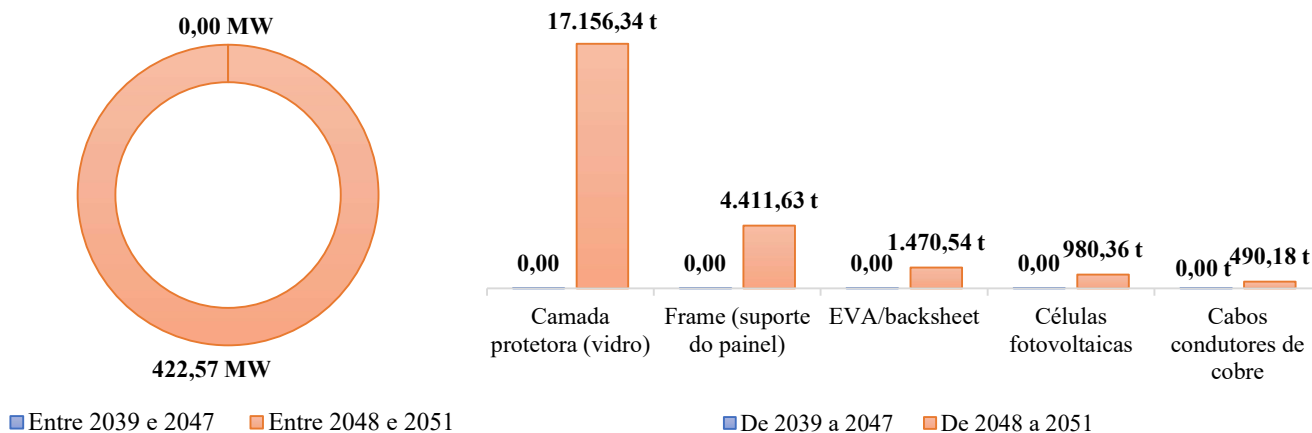


SANTANA DO MATO/RN

Área	1.422,268 km ²
População	11.808 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 12.174,03

Fonte: IBGE (2023).

Figura 46 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Santana do Mato/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

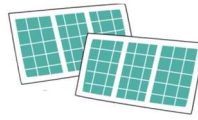
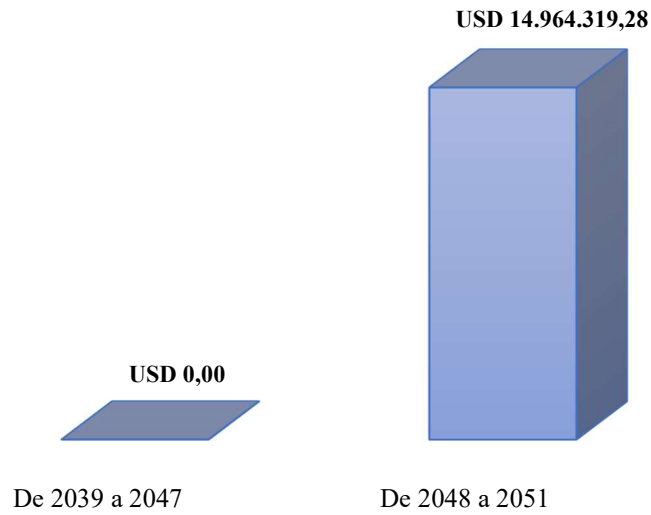
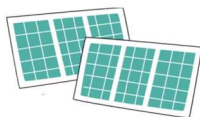


Figura 47 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Santana do Mato/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

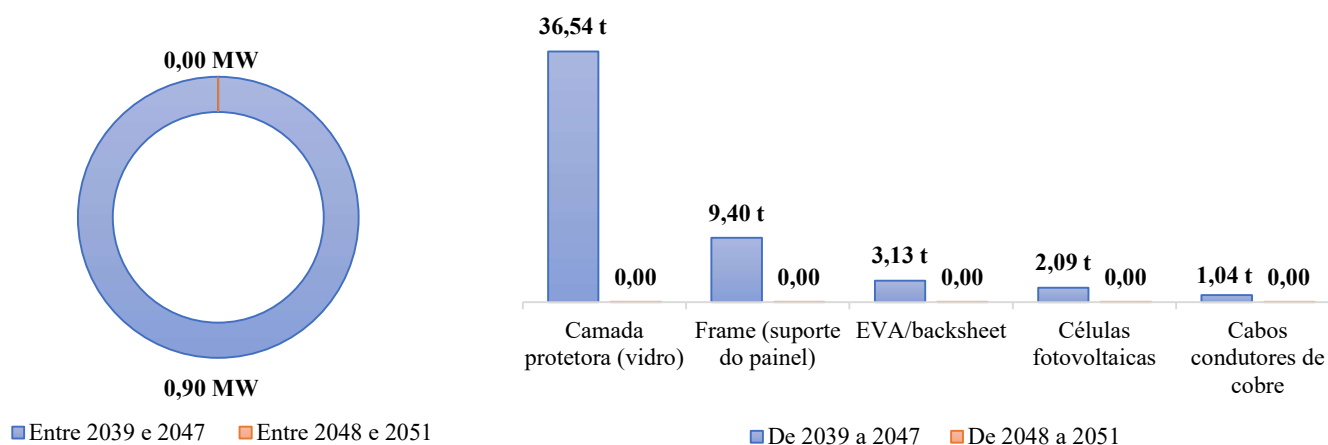


SÃO JOSÉ DE MIPIBU/RN

Área	289,987 km ²
População	44.566 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 20.865,03

Fonte: IBGE (2023).

Figura 48 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município São José de Mipibu/RN

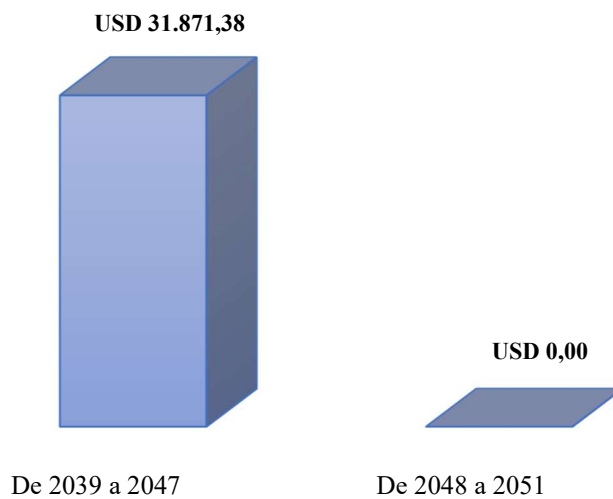


Fonte: Elaboração própria em 2023.

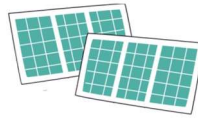
Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2048 e 2051, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.



Figura 49 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de São José de Mipibu/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

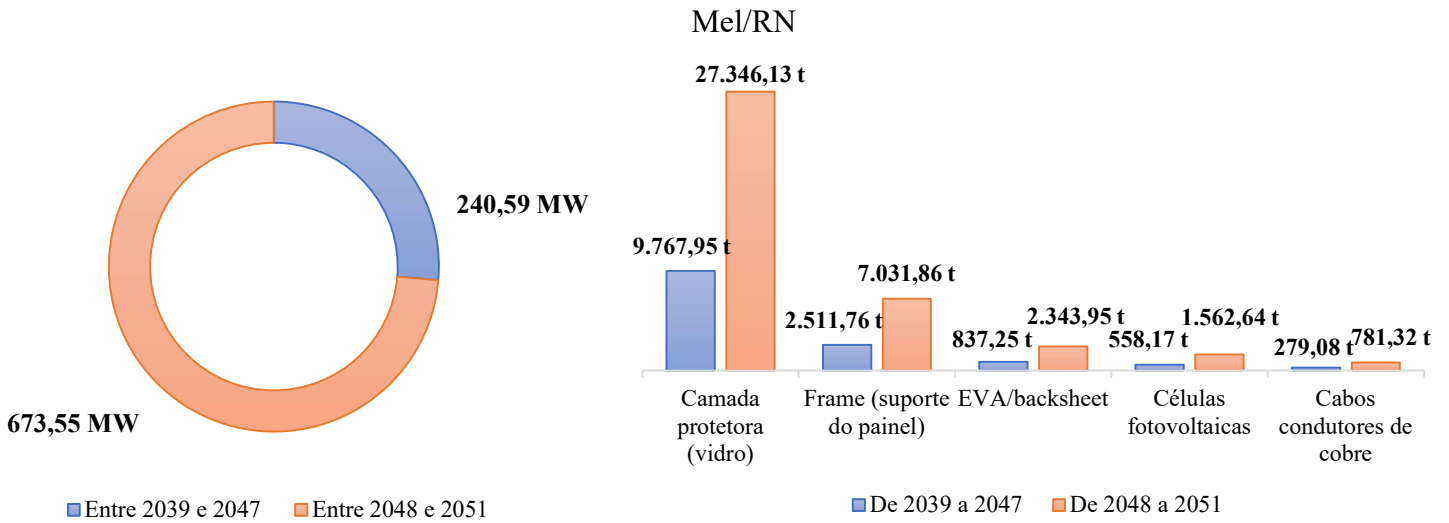


SERRA DO MEL/RN

Área	620,241 km ²
População	12.225 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 50.795,43

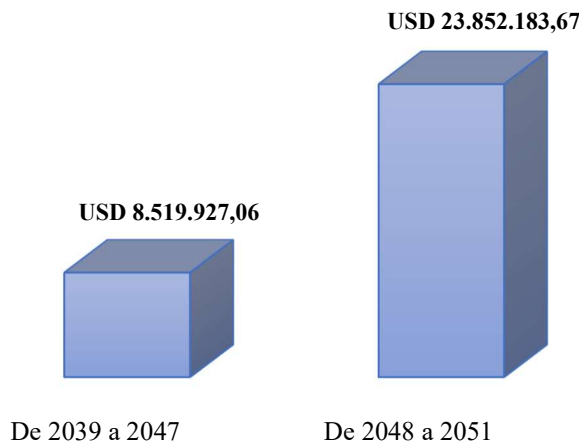
Fonte: IBGE (2023).

Figura 50 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Serra do

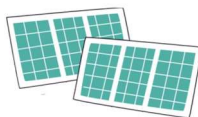


Fonte: Elaboração própria em 2023.

Figura 51 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Serra do Mel/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

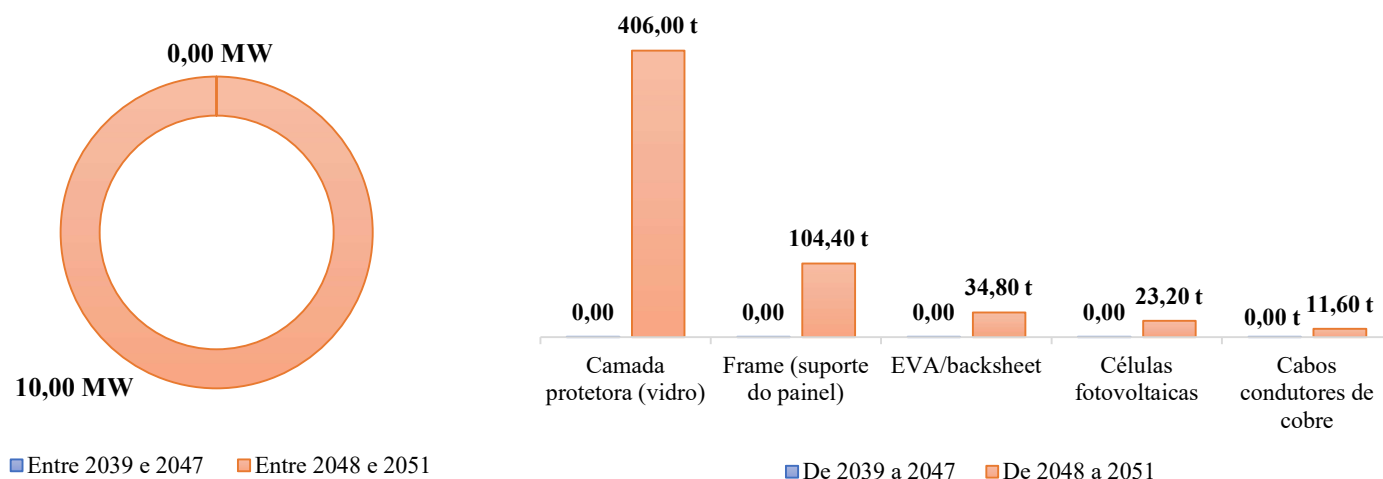


TOUROS/RN

Área	753,961 km ²
População	33.716 pessoas
PIB per capita (2022)	R\$ 18.206,68

Fonte: IBGE (2023).

Figura 52 – Volume de energia a ser descomissionada e resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município Touros/RN



Fonte: Elaboração própria em 2023.

Observa-se que não foram encontrados registros de empreendimentos a serem descomissionados no período entre os anos de 2039 e 2047, quando aplicada a metodologia empregada neste Report.

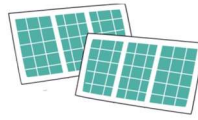
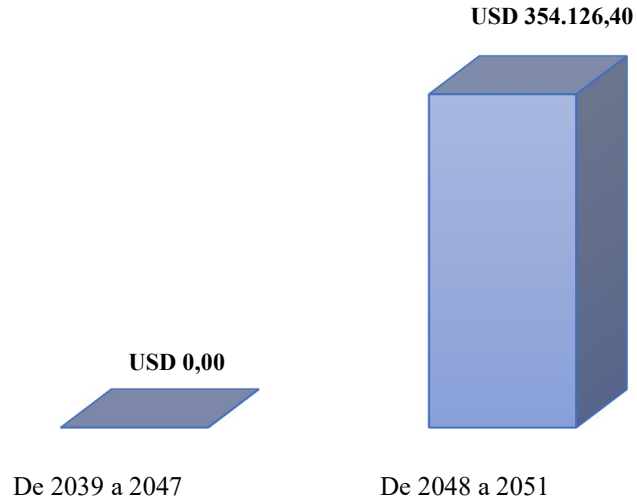
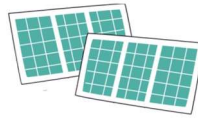


Figura 53 – Potencial de geração de receitas da reciclagem de resíduos gerados de empreendimentos outorgados geradores de energia elétrica a partir de fonte solar no município de Touros/RN



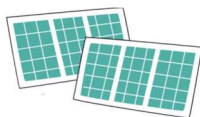
Fonte: Elaboração própria em 2023.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento exponencial da geração de resíduos oriundos da indústria fotovoltaica, podem representar um risco tanto ao meio ambiente, quanto a saúde humana. Porém, ele também pode ser vislumbrado como uma possibilidade de desenvolvimento, geração de riqueza e renda, caso sejam realizados investimentos em pesquisas, capacitação técnica e desenvolvimento de processos de reciclagem em escala industrial financeiramente viável.

A recuperação de metais preciosos e materiais oriundos de resíduos sólidos provenientes da reciclagem de painéis fotovoltaicos ainda é uma temática recente, pouco difundida, conseqüentemente pouco explorada, com lacunas nos processos aplicados e ausência de regulamentação pelo Poder Público. Contudo, os estudos preliminares demonstram um grande potencial econômico, concentrados no Estado do RN, principalmente em municípios que demonstram uma carência estrutural em atividades industriais.



REFERÊNCIAS

- BRASIL. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- GAHLOT, Rohit; MIR, Shaila; DHAWAN, Nikhil. Recycling of Discarded Photovoltaic Solar Modules for Metal Recovery: a review and outlook for the future. **Energy & Fuels**, [S.L.], v. 36, n. 24, p. 14554-14572, 2 dez. 2022. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02847>.
- RIO GRANDE DO NORTE. **IDEMA**. Lista de EIA / RIMA. 2023. Disponível em: <https://sistemas.idema.rn.gov.br/servicos/rima.php>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- SICA, Daniela; MALANDRINO, Ornella; SUPINO, Stefania; TESTA, Mario; LUCCHETTI, Maria Claudia. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 82, p. 2934-2945, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039>.
- SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- XU, Y. et al. Global status of recycling waste solar panels: A review. **Waste Management**, v. 75, p. 450–458, maio 2018.
- ZIEMIŃSKA-STOLARSKA, Aleksandra; PIETRZAK, Monika; ZBICIŃSKI, Ireneusz. Application of LCA to Determine Environmental Impact of Concentrated Photovoltaic Solar Panels—State-of-the-Art. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 3143, 27 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14113143>.