



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE – CAMPUS MARACANAÚ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

MICHELL ANDERSON SOUZA ANDRADE

**DESCARTE DE RESÍDUOS DE PÁS EÓLICAS POR MEIO DE
COPROCESSAMENTO EM FORNOS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO: UMA
ALTERNATIVA PARA IMPULSIONAR A ECONOMIA CIRCULAR NO BRASIL**

MARACANAÚ
2024

MICHELL ANDERSON SOUZA ANDRADE

DESCARTE DE RESÍDUOS DE PÁS EÓLICAS POR MEIO DE
COPROCESSAMENTO EM FORNOS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO: UMA
ALTERNATIVA PARA IMPULSIONAR A ECONOMIA CIRCULAR NO BRASIL

Dissertação submetida à
Coordenação do Curso de Pós-graduação
em Energias Renováveis do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Ceará, como requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre
em Energias Renováveis, área de
concentração Energias Renováveis.

Orientador: Profa. Dra. Erika da
Justa Teixeira Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Auzuir
Ripardo de Alexandria

MARACANAÚ

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A553d Andrade, Michell.

DESCARTE DE RESÍDUOS DE PÁS EÓLICAS POR MEIO DE COPROCESSAMENTO
EM FORNOS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO: UMA ALTERNATIVA PARA IMPULSIONAR A
ECONOMIA CIRCULAR NO BRASIL / Michell Andrade. - 2024.

194 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis,
Campus Maracanaú, 2024.

Orientação: Profa. Dra. Erika da Justa Teixeira Rocha.

Coorientação: Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria.

1. Pás eólicas. 2. Gestão sustentável.

CDD 620.91

MICHELL ANDERSON SOUZA ANDRADE

DESCARTE DE RESÍDUOS DE PÁS EÓLICAS POR MEIO DE
COPROCESSAMENTO EM FORNOS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO: UMA
ALTERNATIVA PARA IMPULSIONAR A ECONOMIA CIRCULAR NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Energias Renováveis
do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus
Maracanaú, como requisito parcial para a
obtenção do título de mestre em energias
renováveis.

Área de concentração: Energias
Renováveis.

Orientador: Profa. Dra. Erika da Justa
Teixeira Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Auzuir Ripardo de
Alexandria

Aprovado (a) em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Erika da Justa Teixeira Rocha (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria (Coorientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Francisco Humberto De Carvalho Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Dedico este trabalho aos
meus pais,
às minhas irmãs,
à minha esposa
e ao meu filho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para o sucesso deste trabalho:

À minha orientadora, Dra. Erika da Justa Teixeira Rocha, cuja disciplina e rigor acadêmico foram fundamentais para motivar-me e orientar-me ao longo deste processo. Sua atenção dedicada foi inestimável e proporcionou um ambiente propício para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas da Aeris Energy e VESTAS, cujas sugestões e compartilhamento de conhecimentos foram inestimáveis para enriquecer este trabalho. Em particular, gostaria de agradecer aos engenheiros Valdir Vidal, pelo incentivo inicial e constante orientação ao longo desta jornada desafiadora.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, fornecendo o suporte emocional necessário para superar os desafios deste percurso acadêmico. Em especial, à minha esposa Bruna Menezes, que mesmo nos momentos mais difíceis e mais felizes, como o nascimento do nosso filho Théo, me manteve focado e motivado. Seu amor incondicional e encorajamento foram verdadeiros pilares durante todo o processo.

Por fim, expresso minha gratidão a Deus, fonte de todas as coisas, cuja orientação e providência estiveram presentes em cada passo desta jornada.

A energia eólica sustentável depende da adoção de tecnologias inovadoras para a correta destinação de pás de turbinas eólicas existentes, assim como o desenvolvimento de materiais recicláveis para as futuras. Equilibrar durabilidade e custo é crucial para promover a responsabilidade ambiental. (LEON, 2023)

RESUMO

As mudanças climáticas impõem desafios crescentes a organizações e economias em todo o mundo. Invernos rigorosos e verões prolongados elevam a demanda por energia, tanto para aquecimento quanto para resfriamento, resultando em um aumento no consumo e nos preços, especialmente quando a energia é gerada a partir de fontes tradicionais, como hidrelétricas e combustíveis fósseis. Nesse contexto, a busca por fontes de energia alternativas e abundantes é essencial para um desenvolvimento sustentável. Projeções indicam que, até 2050, a demanda global de energia poderá atingir entre 40 e 60 TWh, com cerca de 70% desse total sendo suprido por fontes sustentáveis, como a energia eólica e solar. No Brasil, o setor eólico tem avançado de forma significativa, contando com 904 usinas e uma potência instalada de 25,63 GW em 2022, o que representa um crescimento de 18,85% em relação ao ano anterior. No entanto, esse crescimento traz à tona a preocupação com a gestão dos resíduos gerados pela energia eólica, incluindo materiais de construção e componentes de turbinas desativadas, como as pás feitas de materiais compósitos. Diante da previsão de uma quantidade considerável de resíduos compósitos a serem gerados e dos desafios relacionados à sua destinação, este estudo se propõe a analisar o descomissionamento de parques eólicos no Brasil, além de explorar o uso de resíduos de pás eólicas como fonte de energia e insumo em fábricas de cimento. As análises incluem previsões sobre a quantidade de pás a serem descartadas até 2035 em toneladas, a quantificação de unidades de cimento com sistemas de coprocessamento e suas capacidades de absorção, além da avaliação dos desafios logísticos e alternativas para minimizar o impacto do transporte desses resíduos. Também são consideradas as opiniões de especialistas sobre a gestão de resíduos de pás eólicas e seu uso em fábricas de cimento, comparando suas perspectivas futuras com as previsões de geração de resíduos, a fim de orientar estratégias sustentáveis na indústria eólica. A principal motivação deste trabalho reside na inexistência de ações, tanto privadas quanto governamentais, voltadas para o descarte adequado de resíduos provenientes de pás desativadas no Brasil, assim como na ausência de estudos científicos direcionados ao mercado brasileiro. A contribuição central deste estudo é a demonstração dos desafios e oportunidades relacionados ao coprocessamento de resíduos de pás eólicas, evidenciando a necessidade urgente de ações coordenadas e abrangentes para garantir que a

transição para uma economia de energia mais sustentável seja verdadeiramente benéfica para o meio ambiente e para as gerações futuras.

Palavras-chave: Pás eólicas. Gestão sustentável. Coprocessamento de resíduos. Destinação de resíduos. Impactos ambientais.

ABSTRACT

Climate change is presenting escalating challenges to organizations and economies worldwide. Severe winters and prolonged summers are increasing the demand for energy, both for heating and cooling, leading to heightened consumption and rising prices, particularly when energy is sourced from traditional means like hydropower and fossil fuels. In this context, pursuing alternative and abundant energy sources is essential for sustainable development. Projections suggest that by 2050, global energy demand could reach between 40 and 60 TWh, with around 70% expected to come from sustainable sources such as wind and solar energy. In Brazil, the wind sector has made notable advancements, featuring 904 wind farms and an installed capacity of 25.63 GW in 2022, marking an 18.85% increase from the previous year. However, this growth raises significant concerns regarding the management of waste generated by wind energy, including construction materials and components from decommissioned turbines, such as blades made from composite materials. Anticipating a substantial volume of composite waste, this study aims to analyze the decommissioning of wind farms in Brazil and explore the use of wind turbine blade waste as an energy source and raw material in cement production. The analysis encompasses forecasts for the quantity of blades to be discarded by 2035, the quantification of cement plants with coprocessing systems and their absorption capacities, and the assessment of logistical challenges to minimize the impact of waste transportation. Expert opinions on managing wind turbine blade waste and its application in cement factories are also considered, comparing future perspectives with waste generation forecasts to guide sustainable strategies within the wind industry. The primary motivation for this work is the lack of both private and governmental actions regarding the proper disposal of waste from decommissioned blades in Brazil, coupled with a shortage of scientific studies focused on the Brazilian market. This study's central contribution is to elucidate the challenges and opportunities related to coprocessing wind turbine blade waste, highlighting the urgent need for coordinated actions to ensure that the transition to a more sustainable energy economy benefits the environment and future generations.

Keywords: Wind turbine blades. Sustainable management. Waste coprocessing. Waste disposal. Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	— Cenários de previsibilidade do aumento de demanda energética em 2050.....	18
Figura 2	— Previsibilidade mundial de aumento de capacidade instalada a partir de geradores eólicas.....	19
Figura 3	— Expansão da capacidade instalada de turbinas eólica no Brasil. Dados em MW.....	20
Figura 4	— Estrutura de uma turbina eólica e seus componentes – Delimitação de tema.....	29
Figura 5	— Estrutura da dissertação de mestrado.....	31
Figura 6	— Esquema de fabricação de uma pá eólica. Montagem de duas cascas e almas por colagem (a cor cinza representa os compósitos primários de carga).....	33
Figura 7	— Seção transversal de uma pá eólica.....	34
Figura 8	— Imagem de microscópio eletrônico de varredura de um polímero reforçado com fibra de vidro.....	35
Figura 9	— Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função da concentração, forma, distribuição e orientação do reforço.....	36
Figura 10	— Deformação na matriz circundante de uma fibra submetida a uma carga de tração segue um padrão.....	37
Figura 11	— (a) Representações esquemáticas das curvas de tensão-deformação para materiais que combinam uma fibra com propriedades quebradiças e uma matriz maleável. (b) Diagrama esquemático ilustrando a curva de tensão-deformação para um compósito reforçado por fibras alinhadas, quando sujeito a uma carga uniaxial.....	38
Figura 12	— Orientação de fibras.....	39
Figura 13	— Laminado em diferentes direções.....	40

Figura 14	— (a) Espuma PET; (b) Balsa; (c) Espuma PVC.....	43
Figura 15	— (a) Típica estrutura de uma raiz de pá eólica com componentes mecânicos; (b) (c) Conexões mecânicas entre porca barril e parafuso	44
Figura 16	— Sistema de proteção contra descargas atmosféricas.....	45
Figura 17	— Projeção de descomissionamento de parques eólico no Brasil.....	47
Figura 18	— Hierarquia de gerenciamento de resíduos provenientes de pás eólicas segundo a 2008/98/EC.....	52
Figura 19	— Diagrama de processo para reutilização de pás de turbinas eólicas.....	53
Figura 20	— Diagrama de processo para reaproveitamento de pás de turbinas eólicas.....	53
Figura 21	— Cobertura de bicicletário público na Dinamarca.....	54
Figura 22	— Diagrama dos principais processos para reciclagem de pás de turbinas eólicas.....	55
Figura 23	— Diagrama de processo de moagem de compósitos.....	55
Figura 24	— Diagrama de processo da pirólise.....	56
Figura 25	— Diagrama de processo do leito fluidizado.....	57
Figura 26	— Diagrama de processo de solvólise.....	58
Figura 27	— Diagrama de processo de coprocessamento em forno de cimento.....	58
Figura 28	— Pás eólicas descartadas. Rodovia CE-040, estado do Ceará.....	59
Figura 29	— Pás eólicas descartadas no distrito industrial de Sorocaba, estado de São Paulo.....	60
Figura 30	— Pás eólicas descartadas em Mossoró, estado do Rio Grande do Norte.....	60
Figura 31	— Fluxo de tomada de decisão para pás em fim de vida útil.....	61

Figura 32	— Níveis de prontidão de tecnologia (TRL).....	63
Figura 33	— TRL de diferentes métodos de reciclagem.....	64
Figura 34	— Consumo aparente de cimento no Brasil (em milhões de toneladas).....	66
Figura 35	— Fluxograma de fábrica de cimento.....	67
Figura 36	— Ciclones de pré-aquecimento.....	69
Figura 37	— Conjunto do pré-aquecedor, pré-calcinador e forno rotativo de clínquer.....	70
Figura 38	— Projeção da transição do consumo energético em fábricas de cimento no Brasil.....	72
Figura 39	— Produção de cimento: consumo final energético por fonte.....	74
Figura 40	— Corte, trituração e transporte.....	82
Figura 41	— Resíduo de pá triturada e armazenamento de resíduos triturados provenientes de pás eólicas.....	83
Figura 42	— Fábrica de cimento e produção de clínquer.....	84
Figura 43	— Fluxo de coprocessamento com incremento de resíduo proveniente de pás eólicas.....	85
Figura 44	— Ilustração da configuração metodológica da pesqui.....	87
Figura 45	Parques eólicos em operação entre os anos de 2002 e 2035.....	91
Figura 46	— Cenário de parques que entraram em operação entre os anos de 2002 e 2015.....	92
Figura 47	— Distribuição histórica de fim de vida útil de turbinas eólicas.....	93
Figura 48	— Evolução histórica de tamanho de turbinas eólicas.....	94
Figura 49	— Fluxo de coleta de dados através de entrevista com especialistas.....	100

Figura 50	— Tempo de experiência em anos por função desempenhada.....	101
Figura 51	— Escala Likert aplicada ao questionário.....	102
Figura 52	— Estimativa de quantidade de resíduos provenientes de pás eólicas gerados pelo seu descomissionamento (Dados em toneladas).....	106
Figura 53	— Mapeamento de plantas de coprocessamento de resíduos no Brasil.....	107
Figura 54	— Pá eólica cortada para transporte para unidade de tratamento.....	111
Figura 55	— Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado do Ceará.....	112
Figura 56	Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado do Rio Grande do Norte.....	113
Figura 57	— Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado da Paraíba.....	114
Figura 58	— Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado de Pernambuco.....	115
Figura 59	— Pá eólica cortada para transporte para unidade de tratamento.....	116
Figura 60	— Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado da Bahia.....	117
Figura 61	— Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação ao parque eólico do Rio de Janeiro.....	118
Figura 62	— Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação ao parque eólico do Rio Grande do Sul.....	119
Figura 63	— Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento e parques eólicos no estado de Santa Catarina.....	120
Figura 64	— Sistema móvel de trituração de pás eólicas.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Propriedades relativas entre compósitos termofixos e termoplásticos como matrizes.....	45
Tabela 2	— Potencial eólico-elétrico estimado do Brasil.....	93
Tabela 3	— Posicionamento dos professores quanto à normalização dos trabalhos acadêmicos de acordo com os estudantes.....	97
Tabela 4	— Assuntos mais comentados pelos estudantes com relação à normalização de trabalhos acadêmicos.....	98
Tabela 5	— Assuntos mais comentados pelos estudantes com relação à normalização de trabalhos acadêmicos.....	103
Tabela 6	— Distribuição de parques eólicos por ano e somatório de potência.....	106
Tabela 7	— Potencial de coprocessamento.....	112

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Contextualização.....	16
1.2	Panorama da Energia Eólica no mundo e no Brasil.....	18
1.3	Lacuna de pesquisa.....	22
1.4	Objetivos da pesquisa.....	28
1.5	Limitação do tema.....	29
1.6	Justificativa da pesquisa.....	30
1.7	Estrutura da dissertação.....	33
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	35
2.1	Estrutura de uma pá de turbina eólica e turbina de composição.....	35
2.1.1	<i>Conceituação sobre materiais compósitos.....</i>	37
2.1.1.1	<i>Fibra (Fase dispersa).....</i>	42
2.1.1.2	<i>Resina.....</i>	44
2.1.2	<i>Outros materiais aplicados a pás de turbinas eólicas.....</i>	46
2.2	Gestão de resíduos.....	48
2.2.1	<i>Descomissionamento de parques eólicos.....</i>	48
2.2.2	<i>Enquadramento legal no Brasil.....</i>	51
2.2.3	<i>Alternativas para destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas</i>	54
2.2.4	<i>Coprocessamento de resíduos na indústria do cimento.....</i>	68
2.2.4.1	<i>Processo de fabricação do cimento.....</i>	68
2.2.4.2	<i>Combustíveis alternativos utilizados para a produção do cimento.....</i>	74
2.2.4.3	<i>Conceituação sobre coprocessamento de resíduos.....</i>	76
2.2.4.4	<i>Coprocessamento de fibras de pás eólicas.....</i>	83
3	METODOLOGIA.....	90

3.1	Pesquisa bibliográfica e documental.....	91
3.1.1	<i>Estimativa de quantidade de resíduos gerados pelo descomissionamento de pás eólicas.....</i>	92
3.1.2	<i>Quantificação de unidades de cimento no Brasil habilitadas a coprocessar resíduos em fornos de clínquer.....</i>	98
3.2	Pesquisa exploratória.....	100
3.2.1	<i>Avaliação de tema por especialistas.....</i>	101
4	RESULTADOS	106
4.1	Estimativa de quantidade de pás eólicas a serem descartadas.....	106
4.2	Quantificação de unidades de coprocessamento.....	109
4.3	Avaliação de tema por especialistas.....	124
	REFERÊNCIAS.....	144
	ANEXOS.....	169

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste primeiro capítulo é fornecer uma contextualização abrangente do presente trabalho, oferecendo uma explicação detalhada das motivações que levaram à sua realização. Além disso, são estabelecidos o objetivo geral e os objetivos específicos que direcionam esta pesquisa, delineando claramente o caminho a ser seguido. A metodologia utilizada para conduzir este estudo também é discutida, juntamente com a descrição da estrutura adotada nesta dissertação.

Em suma, este capítulo inicial busca situar o leitor no contexto do trabalho, destacando as razões por trás de sua realização, estabelecendo os objetivos a serem alcançados e balizando a abordagem metodológica e a estrutura seguida ao longo deste estudo.

1.1. Contextualização

O crescimento populacional tem implicações significativas na organização e no uso dos recursos naturais. A política, a dinâmica social, a estrutura urbana e rural, a educação e a disponibilidade de recursos são afetadas por esse crescimento. De acordo com as Nações Unidas do Brasil, em relatório divulgado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2019, a população mundial poderá chegar a 9,74 bilhões em 2050 e 10,88 bilhões em 2100.

Para satisfazer as necessidades da população em constante crescimento, é preciso garantir a disponibilidade de recursos para manter condições de vida adequadas. A energia, água e os alimentos são os principais elementos que garantem a sobrevivência humana. No contexto evolutivo atual, a energia é um recurso indispensável e tem moldado a forma como os seres humanos evoluem (ANEEL, 2005).

Nos últimos cem anos, a energia fornecida por combustíveis fósseis impulsionou o crescimento e a transformação global. No entanto, essa prática não é sustentável e é necessário transitar para fontes de energia limpas e de baixa emissão de carbono, garantindo o desenvolvimento sustentável e mantendo a oferta de energia compatível com o forte aumento do consumo provocado pelo novo ciclo econômico (ANEEL, 2008).

O aumento da demanda energética, impulsionado pelo progresso humano e descobertas, apresenta um desafio significativo na geração de energia elétrica para nações e empresas. A pressão para mudar as fontes de geração, predominantemente fósseis, é acentuada pelo surgimento das mudanças climáticas e pela necessidade premente de diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Neste momento crucial no desenvolvimento energético global, a busca por fontes limpas e de baixa emissão de carbono é inevitável, destacando a importância de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e priorizar alternativas que não causem poluição (Volkan, 2019; Zhang et al., 2016).

Nesse contexto de transição energética, novas tecnologias continuam sendo desenvolvidas para converter energia proveniente de fontes sustentáveis, como o sol e vento em energia elétrica. Esses estudos estão tornando as fontes de energia renovável mais acessíveis e reduzindo seus custos (Reges, 2015); (Volkan, 2019). Essa evolução tecnológica desempenha um papel fundamental na capacidade de enfrentar os desafios ambientais e climáticos globais, com a energia eólica emergindo como uma solução inovadora que não apenas diversifica a matriz energética, mas também impulsiona o desenvolvimento sustentável em um cenário de crescente demanda por alternativas ecológicas. No entanto, é importante lembrar que, apesar dos inúmeros benefícios que a geração de eletricidade por meio da energia eólica pode trazer, é necessário ter em mente que sua exploração pode acarretar riscos ambientais.

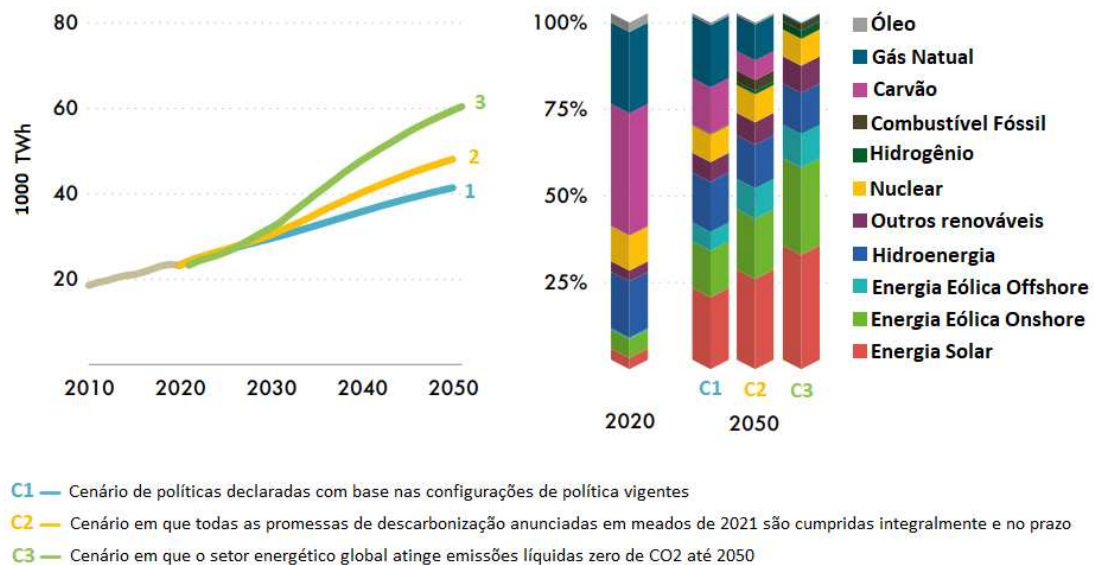
Por isso, para garantir um desenvolvimento sustentável do país e uma exploração eficiente dessa fonte energética, é crucial que o empreendimento eólico seja adequadamente planejado e gerenciado (Ferreira, 2008). A conexão entre a busca por fontes limpas e a conscientização sobre os possíveis impactos da energia eólica no meio ambiente se torna evidente nesse ponto. O avanço tecnológico que está tornando as energias renováveis mais acessíveis também deve ser acompanhado por uma abordagem responsável na implementação dessas soluções, garantindo que os benefícios ambientais não sejam comprometidos pelo desenvolvimento acelerado. Portanto, a transição para fontes de energia limpa exige não apenas inovação, mas também um compromisso contínuo com a sustentabilidade ambiental.

1.2. Panorama da Energia Eólica no mundo e no Brasil

Os impactos das mudanças climáticas irão impor ainda mais pressão sobre as organizações e economias mundiais. Invernos severos ou verões cada vez mais longos poderão desencadear altas demandas de energia para necessidades de aquecimento ou arrefecimento, elevando o consumo de energia e consequentemente de preços, principalmente proveniente quando a energia é resultado de fontes tradicionais como hidrelétricas e combustível fóssil. Exemplos recentes, com as elevadas temperaturas registradas em diversas regiões do Brasil em novembro de 2023, é uma demonstração de que a necessidade humana por uma condição climática confortável, demandará um grande volume de energia, e buscar energias alternativas e de alta abundância torna-se um caminho sem volta para o desenvolvimento sustentável e sem risco.

Cenários mundiais apontam que em 2050 a demanda de energia atingirá patamares de 40 a 60 TWh, onde aproximadamente 70% dessa demanda poderá ser suprida por energias provenientes de meios sustentáveis, eólica e solar (GWEC, 2022).

Figura 1 – Cenários de previsibilidade do aumento de demanda energética em 2050.

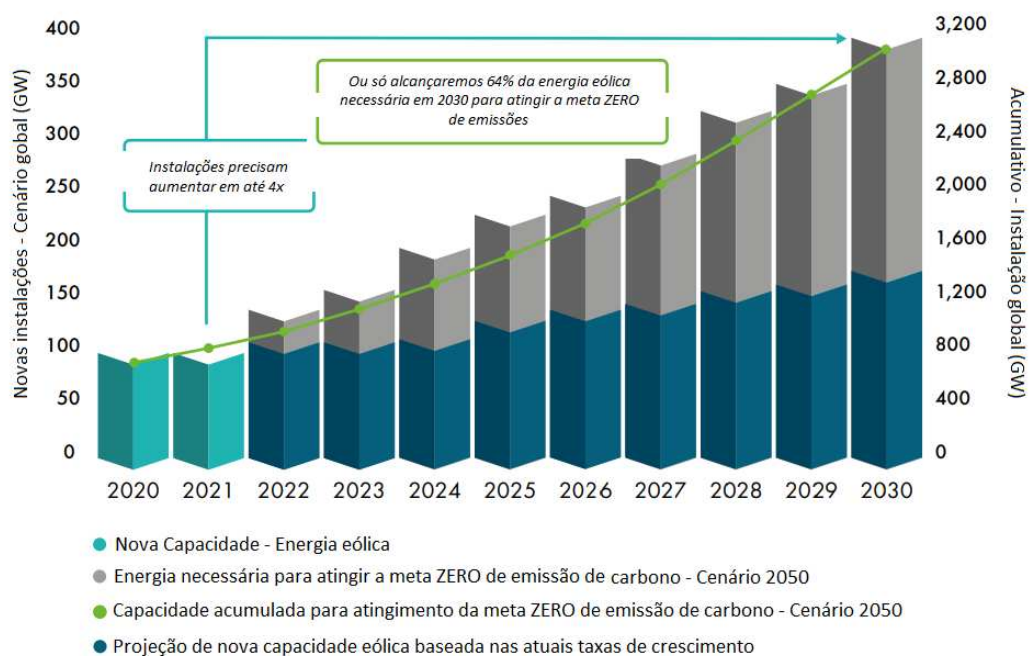


Fonte: Adaptado de GWEC – Global Wind Report 2022

Conforme observado por Sato (2015), em 2010 a reserva mundial de energia eólica, com potencial de conversão em eletricidade, excedia em cerca de três vezes o consumo global de energia, evidenciando sua significativa capacidade. Esse cenário ganha relevância dado o aumento constante na demanda energética global ao longo dos anos, acompanhado de perto pelo aproveitamento da energia dos ventos. Ampliando essa perspectiva, Yazdanbakhsh (2017) relata que a capacidade de geração de energia eólica no mundo, em 2017, havia crescido 30 vezes desde sua base de comparação em 1999, ressaltando a notável progressão nesse setor.

Em 2021, a capacidade instalada de geração de energia eólica no mundo chegou a 837 GW, mostrando um crescimento ano-a-ano de 12% (Global Wind Energy Council – GWEC, 2022). Somente a China atingiu 310,6 GW de potência instalada, aproximadamente 15 vezes mais que o Brasil para o mesmo ano. Conforme indicado no relatório do GWEC (2022), as projeções sugerem que a potência mundial aumente aproximadamente mais 300 GW até 2030, o necessário para garantir os níveis de emissões líquidas zero de dióxido de carbono (Net Zero), porém ainda se nota um retardamento do crescimento da energia eólica para atingimento de metas de emissão de carbono que leva a uma previsão de déficit em 2030, conforme Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Previsibilidade mundial de aumento de capacidade instalada a partir de geradores eólicos.

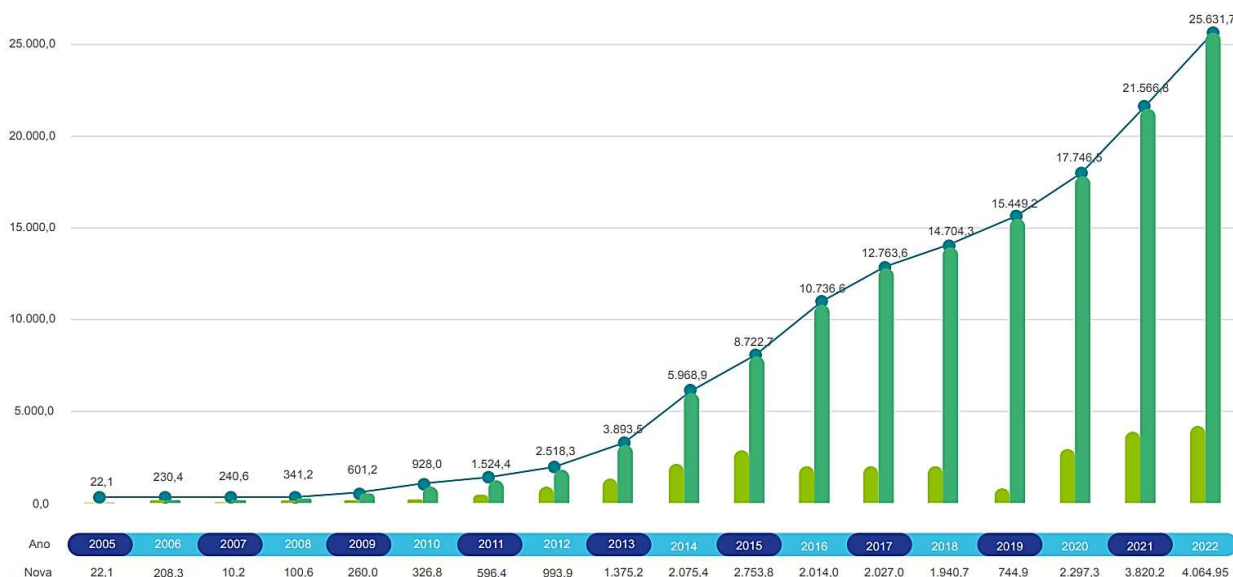


Fonte: Adaptado de GWEC – Global Wind Report 2022

Conforme informações divulgadas pela Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEólica) em 2022, embora o Brasil ainda não alcance a produção de energia eólica de países como a China e os Estados Unidos, tem se destacado positivamente no que se refere à capacidade de instalação dessa fonte de energia. Isso se deve, em grande parte, aos leilões de comercialização de energia, que têm impulsionado o desenvolvimento do setor nos últimos anos. Em 2021, por exemplo, foram contratados 580 MW de capacidade instalada em três leilões distintos (ABEEólica, 2021), já em 2022, esse número foi de 298 MW (ABEEólica, 2022), demonstrando um alto volume de investimento e desenvolvimento.

A expansão do setor de energia eólica no Brasil é ilustrada na Figura 3 presente no boletim anual de 2022 da ABEEólica. O gráfico mostra a evolução da capacidade instalada ao longo dos anos, impulsionada pelo aumento da exploração dos recursos eólicos em regiões com alto potencial de ventos. Esse fenômeno é uma das razões para a crescente expansão do setor de energia eólica no país.

Figura 3 - Expansão da capacidade instalada de turbinas eólica no Brasil. Dados em MW.



Fonte: AEEólica – Boletim Anual 2022

No cenário da energia eólica no Brasil, é evidente o notável avanço que o país tem experimentado. Segundo o Ranking Mundial de Capacidade Eólica Acumulada em 2022, divulgado pelo GWEC (2022), o setor encerrou o ano com 904 usinas e uma potência instalada de 25,63 GW. Esse desempenho representa um crescimento de 18,85% em comparação com dezembro de 2021, quando a capacidade instalada era de 21,57 GW. Ao longo de 2022, foram implementados 109 novos parques eólicos, totalizando uma nova capacidade de 4,06 GW. Esse feito estabeleceu um recorde de instalação para a energia eólica no Brasil, consolidando o país como o terceiro maior instalador de parques eólicos no mundo.

É evidente que a capacidade instalada acumulada tem apresentado um crescimento consistente ano após ano, com um aumento notável de instalações onshore, o que atesta a dinamicidade contínua do mercado eólico brasileiro.

Entretanto, junto com esse impressionante crescimento, surge uma importante consideração sobre os resíduos associados à geração de energia eólica. A expansão das turbinas eólicas e das instalações relacionadas contribui para a geração de resíduos, incluindo materiais de construção, componentes de turbinas desativadas, como as pás eólicas, fabricadas com materiais compósitos, e outros subprodutos. A gestão adequada desses resíduos se torna essencial para minimizar os impactos ambientais e maximizar

a sustentabilidade desse setor em expansão. Nesse sentido, além de comemorar os avanços na capacidade eólica, é crucial que o Brasil adote estratégias eficazes para o gerenciamento responsável dos resíduos provenientes da energia eólica, garantindo que o crescimento sustentável seja uma realidade concreta.

A previsão da considerável quantidade de resíduos compósitos que serão gerados e os desafios que surgirão para garantir sua destinação adequada emerge a partir da análise da implantação de parques eólicos no Brasil, ao longo de quase duas décadas, e do tempo de vida útil estimado para os principais componentes, como as pás eólicas, que frequentemente têm uma expectativa de vida de cerca de 20 anos. A relevância do término de vida útil dos materiais compósitos é clara, instigando a análise cuidadosa de seus destinos em consonância com práticas sustentáveis, constituindo assim o núcleo central desta investigação.

1.3. Justificativa

Os materiais metálicos constituem quase 85% da massa de uma turbina (sem a fundação), e eles podem ser reciclados. O restante 15% incluem pás de turbinas eólicas, feitas de fibra compósitos poliméricos reforçados (Mishnaevsky, 2023). Pás eólicas, projetadas para suportar por décadas cargas mecânicas e condições ambientais extremas, não podem ser facilmente recicladas, e isso causa a alta quantidade de resíduos de materiais compósitos quando essas chegam em seu estado final de uso.

Os compósitos poliméricos, combinando materiais com propriedades superiores, são amplamente utilizados em pás de turbinas eólicas modernas devido ao equilíbrio entre rigidez, flexibilidade e peso reduzido. Essas pás geralmente contêm madeira-balsa, espuma e polímeros, com resina epóxi e fibra de vidro sendo os compostos mais comuns, graças à sua combinação de características desejáveis e custo acessível (Mallic et al., 2007; Brahms et al., 2007; Fernandes, 2019). No entanto, a reciclagem desses materiais apresenta desafios, como a complexidade do processamento devido à composição heterogênea dos compósitos (Pimenta, 2011), a impossibilidade de remodelagem das resinas termofixas (Ma, 2018), e a dificuldade na separação e classificação de resíduos (Ilyas, 2018).

A busca por soluções sustentáveis é crescente, e em 2023, a VESTAS apresentou uma inovação que pode transformar pás de turbinas de epóxi em materiais circulares sem alterar seu design. Esse processo químico, desenvolvido em parceria com a Olin e a Stena Recycling, permite decompor a resina em materiais reutilizáveis, promovendo uma economia circular na indústria eólica (Rahimizadeh et al., 2019). No entanto, ainda não está disponível em escala industrial, e o descarte em aterros continua sendo uma prática comum, com a quantidade de pás descartadas podendo atingir 2 milhões de toneladas anuais até 2050 (Liu & Barlow, 2017).

Diversas tecnologias para reciclagem de compósitos estão em desenvolvimento, mas poucas alcançaram um grau de maturidade que as torne viáveis em grande escala. Alternativas como a incineração e o uso de resíduos sólidos na construção civil (Beauson et al., 2016; Yazbandakhsh et al., 2017) são consideradas, mas enfrentam desafios financeiros e ambientais (Jensen & Skelton, 2018). Propostas incluem o uso de resíduos em mercados emergentes ou como espaços de recreação (Sultan et al., 2018), além da reciclagem de materiais compostos por técnicas biotecnológicas e químicas (Novais et al., 2017). Outras iniciativas, como a utilização de fibra de carbono reciclada em cimento, demonstram o potencial para reduzir custos e impactos ambientais, promovendo alternativas mais ecológicas (Akbar & Liew, 2020). Além disso, projetos como o consórcio Decomblades buscam integrar a fragmentação das pás na produção de cimento (Veolia, 2020; Paulsen, 2021), enquanto a reciclagem mecânica combinada com coprocessamento em fornos de cimento surge como uma estratégia promissora para lidar com os resíduos (Paulsen, 2021).

Os estudos examinados ressaltam diversas alternativas, como reutilização, remanufatura, reciclagem e/ou disposição, para enfrentar os resíduos provenientes das pás de turbinas eólicas que chegaram ao final de sua vida útil. Todas essas possibilidades são abordadas no presente estudo.

No entanto, um dos principais desafios é a falta de pesquisas que abordem especificamente a realidade brasileira. Essa lacuna de informações detalhadas sobre os potenciais formas de viabilizar a manipulação apropriada e a disposição correta dos resíduos provenientes das pás de turbinas eólicas após sua utilização é evidente. Isso enfatiza a urgência de realizar investigações mais amplas, que possam proporcionar uma

compreensão mais profunda da situação e permitir a proposição de estratégias concretas para fomentar a circularidade dos materiais e reduzir o impacto ambiental associado aos resíduos das turbinas eólicas em um país que passa por uma notável expansão econômica e industrial.

1.4. Objetivos da pesquisa

Esse estudo tem como objetivo geral analisar o descomissionamento de parques eólicos no Brasil e o uso de resíduos de pás eólicas como energia e insumo em fábricas de cimento para reduzir impactos ambientais e promover sustentabilidade.

Os objetivos específicos são:

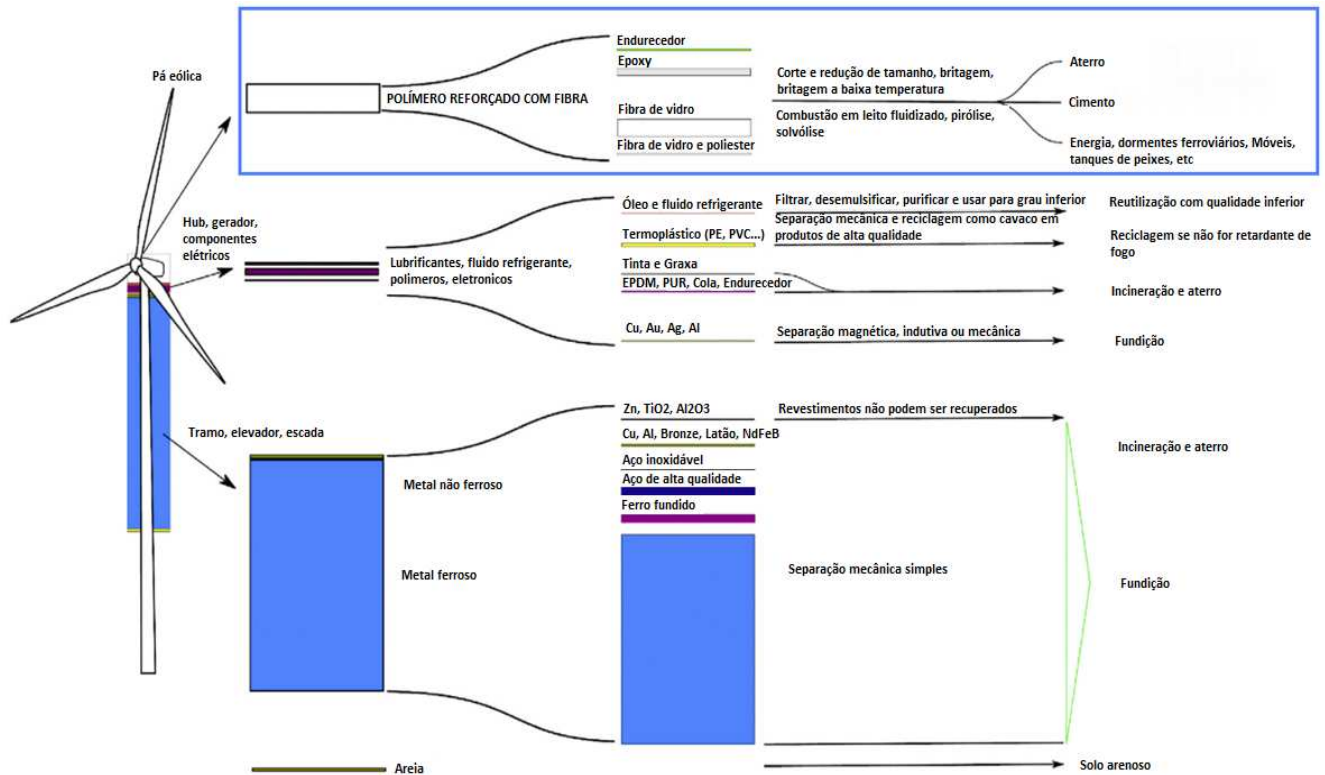
- Projetar a quantidade de pás eólicas a serem descartadas até 2035 em toneladas, com base no perfil etário dos parques eólicos brasileiros, destacando os riscos e oportunidades do descomissionamento desses ativos.
- Levantar o número de unidades coprocessadoras e sua capacidade no Brasil, validando o uso de materiais compósitos de pás eólicas como fonte energética para a produção de cimento;
- Abordar os desafios logísticos entre as unidades coprocessadoras e os parques eólicos geradores de resíduos;
- Examinar opiniões de especialistas sobre a gestão de resíduos de pás eólicas e seu uso em fábricas de cimento, comparando suas perspectivas futuras com previsões de geração de resíduos, a fim de orientar estratégias sustentáveis na indústria eólica.

1.5. Limitação do tema

Este estudo se concentra na análise das alternativas de descarte através do processo de coprocessamento dos resíduos provenientes das pás de turbinas eólicas que foram submetidas ao processo de descomissionamento, conforme indicado na

área delimitada em azul na Figura 4. O escopo da pesquisa se restringe à avaliação do destino ambiental das pás após o término de sua vida útil em serviço. Não são contemplados neste estudo os resíduos gerados durante a fabricação das pás, tais como os subprodutos decorrentes do processo de rebarbação comuns na laminação das fibras de vidro juntamente com resinas poliméricas, bem como os componentes descartados devido a defeitos ou acidentes durante o processo produtivo. Além disso, não são consideradas outras composições comuns das pás de turbinas eólicas, como os componentes reforçados com fibra de carbono para fins estruturais, ou o uso de madeira balsa na conformação do perfil das pás, que certamente gerariam resíduos adicionais a serem tratados. Adicionalmente, não são abordados os elementos metálicos presentes nas pás, como os parafusos prisioneiros de aço laminado utilizados para fixação no rolamento de posicionamento, comumente referido como rolamento de pitch. Da mesma forma, não são contempladas as instalações de fiação de cobre para o controle e dissipação de descargas elétricas atmosféricas, eventos comuns durante o período de operação das turbinas. Tão pouco é levado em consideração pás eólicas que por algum motivo foram descartadas ainda durante o processo de fabricação por falha irreversível de manufatura, chamadas pás de scrap, pás que sofreram algum sinistro durante o processo de operação ou seções de pás que foram removidas quando em operação, devido a processo de manutenção.

Figura 4 – Estrutura de uma turbina eólica e seus componentes – Delimitação de tema.



Fonte: Andre Dorigato, 2021.

1.6. Estrutura da dissertação

A estrutura adotada para a configuração deste estudo segue um delineamento cuidadoso, objetivando uma exposição clara e ordenada das diferentes etapas e abordagens ao longo da pesquisa. A fim de proporcionar uma compreensão aprofundada e articulada, a estruturação foi concebida de modo a englobar os principais aspectos relevantes do tema em questão.

Inicialmente, a Revisão da Literatura se destaca como o ponto de partida fundamental. Nessa fase, busca-se consolidar uma compreensão abrangente e contextualizada, explorando conceitos e informações cruciais relacionadas às estruturas de pás eólicas, materiais compósitos, gestão de resíduos e opções de descarte. Através dessa abordagem, pretende-se estabelecer uma base sólida de conhecimento, que não

apenas fundamenta as etapas subsequentes, mas também permite situar o estudo no panorama global de conhecimento.

Posteriormente, a Metodologia empregada assume um papel de destaque. Nesse estágio, o enfoque recai sobre a definição precisa dos parâmetros e critérios pelos quais a pesquisa será conduzida. Isso abrange a determinação da quantidade (tons) de resíduos gerados em um intervalo de tempo específico, juntamente com a avaliação cuidadosa da capacidade de absorção desses resíduos pela infraestrutura existente no contexto brasileiro. Detalhes da abordagem metodológica são delineados, incluindo o uso de questionários semiestruturados e os critérios de seleção aplicados para a escolha dos especialistas participantes na pesquisa de opinião.

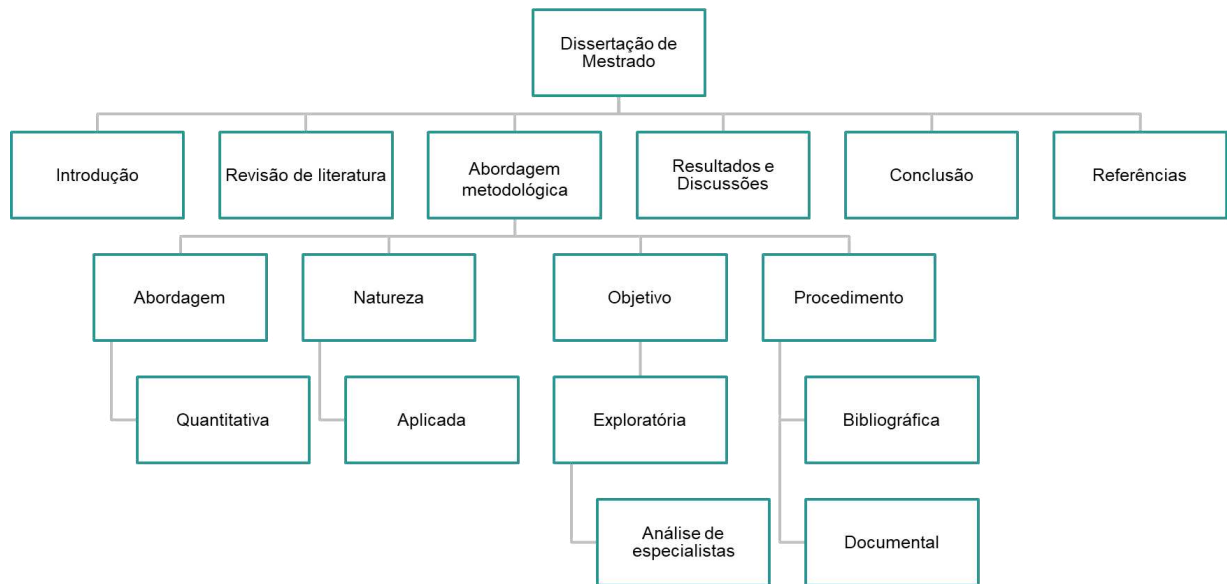
A compilação e análise das respostas obtidas constituem uma etapa crucial do estudo. Nesse ponto, o foco volta-se para a interpretação dos dados coletados e as conclusões que podem ser extraídas deles. Isso inclui a exploração minuciosa das alternativas disponíveis para o destino das pás de turbinas eólicas após sua vida útil. As percepções dos especialistas são examinadas em consonância com os dados provenientes da pesquisa documental e bibliográfica, permitindo uma análise enriquecedora das opções sob diferentes perspectivas.

À medida que o estudo avança, emergem as Conclusões, que sintetizam os *insights* obtidos ao longo da investigação. Estas conclusões são fundamentadas nas informações apresentadas, nos resultados das análises e nas discussões realizadas. Ao ponderar as informações à luz das descobertas, busca-se uma perspectiva prospectiva que contribua para uma visão informada sobre as possibilidades futuras nesse âmbito.

Finalmente, a seção de Referências reforça a integridade e credibilidade do estudo, fornecendo uma lista abrangente dos recursos utilizados como base para o desenvolvimento do trabalho. Dessa forma, a estrutura adotada para o estudo não apenas organiza o conteúdo, mas também assegura uma abordagem rigorosa e embasada ao tema.

A Figura 5 demonstra um organograma macro das atividades desenvolvidas ao longo desse trabalho.

Figura 5 – Estrutura da dissertação de mestrado.



Fonte: Autor

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O objetivo deste capítulo é fornecer uma base teórica para o desenvolvimento do trabalho. Ele começa com uma introdução aos conceitos básicos sobre a estrutura de uma pá eólica e a aplicabilidade de materiais compósitos em seus projetos.

A seguir, serão apresentados alguns princípios relacionados às principais abordagens discutidas na literatura para o manejo de resíduos, apresentando o enquadramento legal para essa prática. Alternativas tecnológicas para o descarte de pás eólicas em fim de vida útil e seus estágios de maturidade tecnológicos são aprofundados. Posteriormente, são introduzidos conceitos sobre a fabricação de cimentos, e o coprocessamento de resíduos como meio de substituição de combustíveis fósseis, a legislação brasileira aplicada a esse método, bem como a sua evolução histórica de aplicação, e a viabilidade de coprocessar resíduos tratados provenientes de pás eólicas em fim de vida útil, e como essa prática pode não só favorecer uma economia circular, mas também, como pode impactar positivamente o processo de produção de cimento em termos de redução de consumo de energia, e a busca por uma produção eco sustentável.

2.1. Estrutura de uma pá de turbina eólica e material de composição

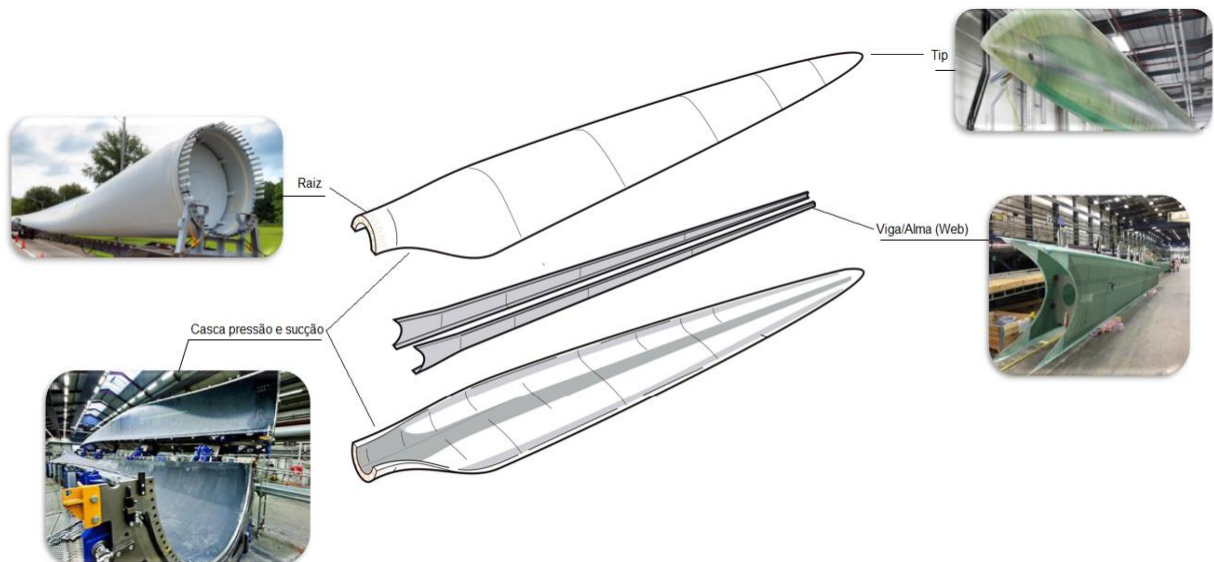
Devido às suas propriedades físicas e químicas vantajosas para essa finalidade, os materiais compósitos são amplamente utilizados na produção de pás e naceles (compartimento instalado no alto da torre e que abriga todo o mecanismo do gerador) de turbinas eólicas. Esses materiais são caracterizados por sua baixa densidade, alta resistência mecânica, excelente resistência à corrosão e degradação, e alta resistência à fadiga, o que os torna ideais para a fabricação de componentes de alta performance.

Para além dos materiais compósitos, é frequente a utilização de outros materiais na construção de turbinas eólicas. Os geradores são geralmente fabricados de metal, enquanto as torres podem ser construídas de concreto ou de aço, dependendo das necessidades de cada projeto.

No âmbito dos materiais compósitos, as pás eólicas são os elementos mais essenciais das turbinas eólicas, representando igualmente o maior investimento entre os componentes (Mishnaevsky, 2017).

As pás eólicas consistem em duas faces, chamadas de casca pressão e sucção, unidas e reforçadas por uma ou mais vigas, chamadas de alma, que conectam a parte superior a inferior.

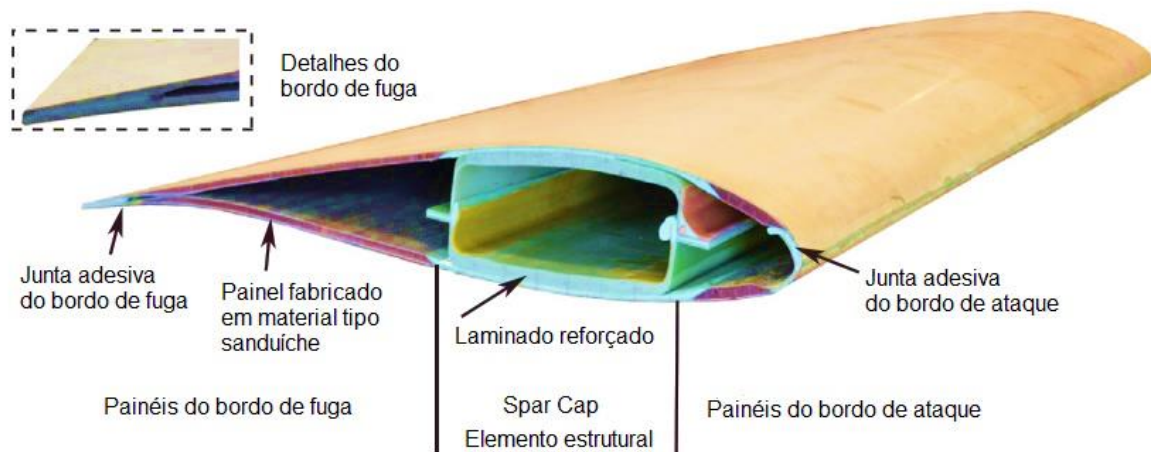
Figura 6 – Esquema de fabricação de uma pá eólica. Montagem de duas cascas e almas por colagem (a cor cinza representa os compósitos primários de carga).



Fonte: Autor

A seção transversal genérica de uma pá, ilustrada na Figura 7, demonstra que grande parte é composta de polímeros reforçados com fibra de vidro.

Figura 7 - Seção transversal de uma pá eólica.



Fonte: Adaptado de Lahuerta, Koorn e Smissaert (2018).

2.1.1. Conceituação sobre materiais compósitos

Um compósito é constituído por um material multifásico fabricado artificialmente, em contraposição a um material que ocorre ou se forma de maneira natural. (Callister, 2007). A combinação dos dois materiais oferece desempenho superior em comparação com qualquer material sozinho. (Sanjay, 2002), (Matthew, 2000), (Valery, 2001). Apresenta propriedades resultantes mais atraentes do que as de seus componentes individuais (Nogueira, 2004), e oferecem uma relação resistência-peso muito favorável para aplicações estruturais (Sanjay, 2002). Como exemplo, uma estrutura fabricada em materiais compósitos pode substituir dez ou mais peças de metal convencionais. Isso pode impactar positivamente o ciclo de manufatura e os custos envolvidos (Michael, 1988).

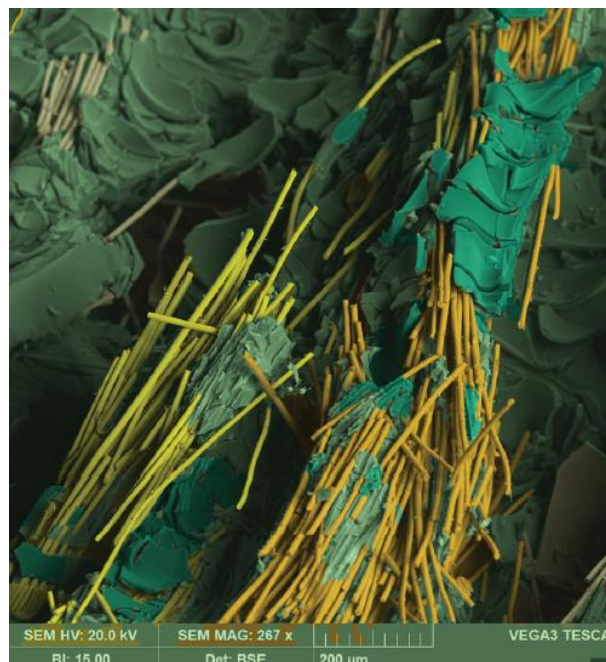
Os compósitos podem ser formados a partir da combinação de diferentes materiais, como metais, cerâmicas e polímeros, com o objetivo de se obter um material com propriedades superiores àsquelas dos materiais de origem. Esses materiais compósitos têm como principal vantagem uma baixa densidade, o que os torna mais leves do que os materiais convencionais. Além disso, os compósitos apresentam outras características importantes, tais como alta tenacidade, estabilidade térmica, resistência à fadiga, resistência mecânica e resistência à corrosão em condições ambientais e a altas

temperaturas. Essas propriedades fazem com que os compósitos sejam amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo a fabricação de pás eólicas (Nogueira, 2004).

Conforme citado por KAW (1997), compósitos são materiais que contêm um reforço, como fibras e partículas, suportado pela matriz aglutinante. Uma das funções da matriz é envolver o reforço, e em seu papel de matriz permite a transmissão dos esforços atuantes na peça (Gay, Hoa, Tsai, 2002).

No caso dos materiais aplicados em projetos de pás eólicas, os compósitos são uma combinação de fibras (reforço) e resina (matriz), com proporções de materiais de enchimento, como pet de PVC e madeira balsa. Unidos, eles apresentam características significativas, onde é notado relações de resistência/peso da ordem de 4 a 5 vezes maior que materiais metálicos, como é o caso da comparação da fibra de carbono e alumínio. (Mastemberg, 2004; Shackelford, 2008).

Figura 8 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura de um polímero reforçado com fibra de vidro.



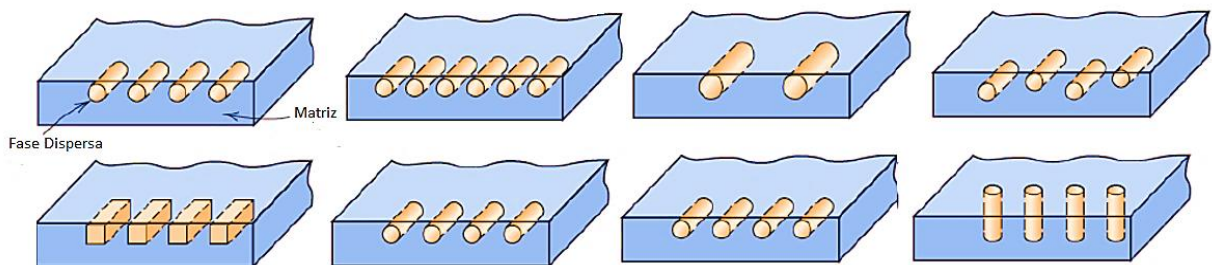
Fonte: Glosser (2022)

Os projetos atuais de pás eólicas são formulados para que estas sejam fabricadas com compósitos de matriz polimérica, uma escolha que oferece um excelente equilíbrio entre ductilidade e rigidez, juntamente com uma baixa massa específica (Mallick, 2007).

Como ilustrado na Figura 6, as pás de uma turbina eólica são constituídas de duas cascas ou lados, usualmente chamados de lado sucção e pressão, que são constituídas de várias sobreposições de fibras de vidro, madeira balsa, espuma pet, entre outros, que passam por um processo de infusão à vácuo, onde a resina (matriz) em estado líquido percorre toda a extensão projetada de forma a impregnar o reforço (fibra), posteriormente solidificando.

O processo de endurecimento, conhecido como processo de cura, envolve um aumento contínuo do peso molecular das moléculas poliméricas devido à formação de ligações primárias entre as ligações cruzadas. Isso permite que todas as moléculas se conectem para formar uma estrutura tridimensional rígida. Esse processo se torna irreversível após a polimerização, quando o material polimerizado não pode mais retornar ao estado líquido. O retorno a esse estado só pode ocorrer através da quebra das ligações intermoleculares, geralmente por fusão com termoplásticos entre as cadeias, que possuem ligações mais fracas do que as covalentes primárias dos termofixos. No entanto, a reciclagem baseada apenas em fusão não é viável. Referências: Ehrig (1992), La Mantia (2002), Wiebeck (2005), Zanin (2004), Manrich (1997), Mano (2006), Rader (1995).

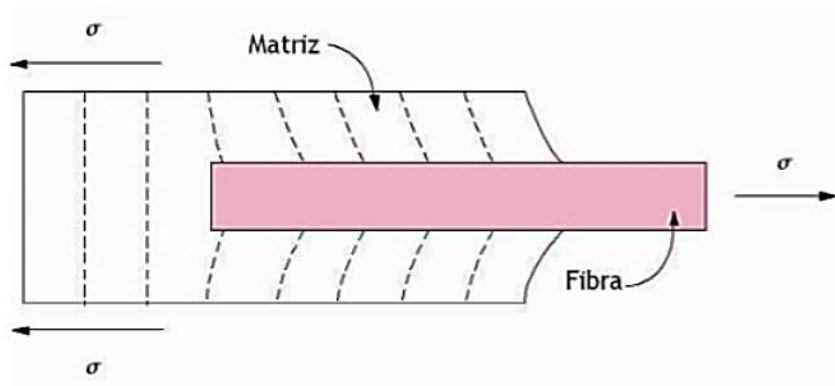
Figura 9 - Esquema das possíveis distribuições do reforço no compósito em função da concentração, forma, distribuição e orientação do reforço.



Fonte: Callister & Rethwisch, 2014

De acordo com Callister Jr. (2007), as características mecânicas de um compósito fortalecido com fibras, como resistência e rigidez, não são exclusivamente dependentes das propriedades das fibras, mas também da capacidade da matriz em transmitir a carga para as fibras. A qualidade da ligação entre as fibras e a matriz é crucial para a eficácia dessa transmissão de carga. Quando uma tensão é aplicada, a união entre a fibra e a matriz é interrompida nas extremidades da fibra, resultando em um padrão de distorção na matriz.

Figura 10 - Deformação na matriz circundante de uma fibra submetida a uma carga de tração segue um padrão.



Fonte: Callister Jr (2007).

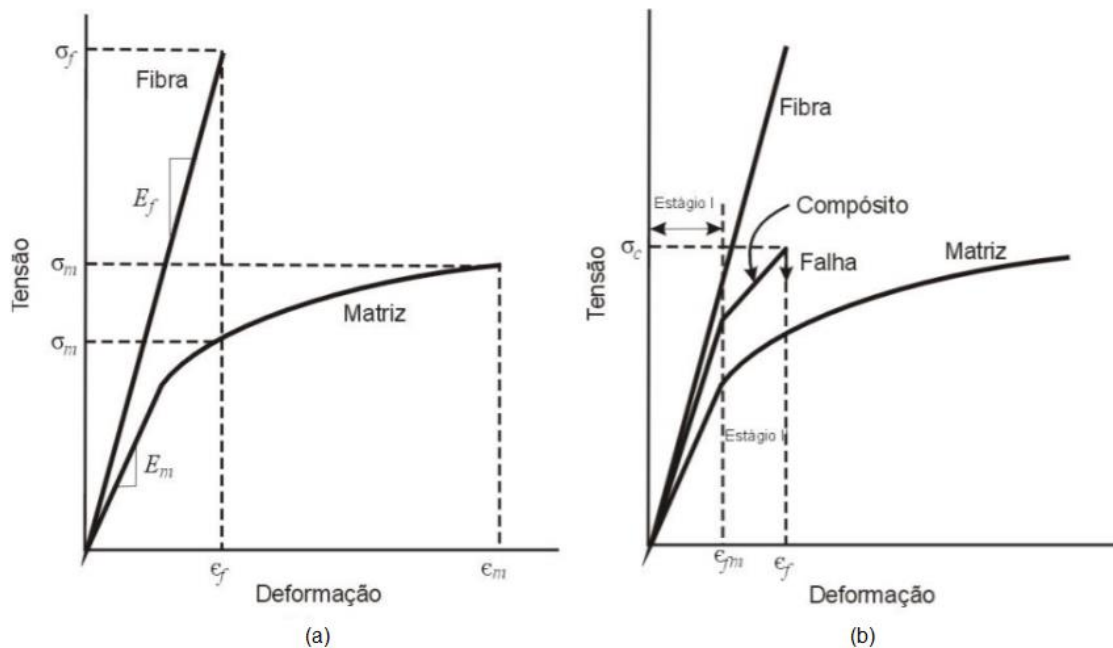
O tamanho das ligações interfaciais entre as fases fibrosa e da matriz é importante para a extensão desse transporte de carga. As ligações químicas, mecânicas e reativas entre as fibras e a matriz são responsáveis por formar essa interface. (Kaw, 1997).

A formação da ligação química ocorre quando a superfície da fibra se une à superfície da matriz. Algumas fibras aderem naturalmente à matriz, enquanto outras não. A rugosidade natural ou marcas presentes na superfície da fibra podem causar um encaixe mecânico entre a fibra e a matriz, resultando em uma adesão. (Milanese, 2008).

A representação gráfica da relação tensão-deformação de um compósito reforçado com fibras alinhadas e submetido a uma tensão uniaxial, demonstrado na Figura 11 (a), evidencia que a matriz sofre uma deformação considerável antes de atingir a tensão de fratura, enquanto a fibra se alonga até fraturar abruptamente. Outra diferença entre essas etapas reside no fato de que o módulo de elasticidade da fibra é significativamente

superior ao da matriz. O resultado da combinação entre a fibra e a matriz é ilustrado na Figura 11 (b).

Figura 11 - (a) Representações esquemáticas das curvas de tensão-deformação para materiais que combinam uma fibra com propriedades quebradiças e uma matriz maleável. (b) Diagrama esquemático ilustrando a curva de tensão-deformação para um compósito reforçado por fibras alinhadas, quando sujeito a uma carga uniaxial.



Fonte: Callister (2007).

Durante a fase inicial (estágio I), o compósito passa por deformação plástica. À medida que a tensão aumenta, ocorre uma transição para a próxima fase (estágio II), na qual a curva se torna linear, mas com uma inclinação reduzida. Neste estágio, a falha do compósito começa à medida que as fibras começam a se romper. A falha de uma pá eólica não é catastrófica por dois motivos: em primeiro lugar, nem todas as fibras quebram simultaneamente devido a uma variação significativa na resistência à fratura dos materiais fibrosos frágeis; em segundo lugar, mesmo após a ruptura das fibras, a matriz permanece intacta, ou seja, após a falha das fibras, a matriz continua a sofrer deformação plástica.

2.1.1.1. Fibra (Fase dispersa)

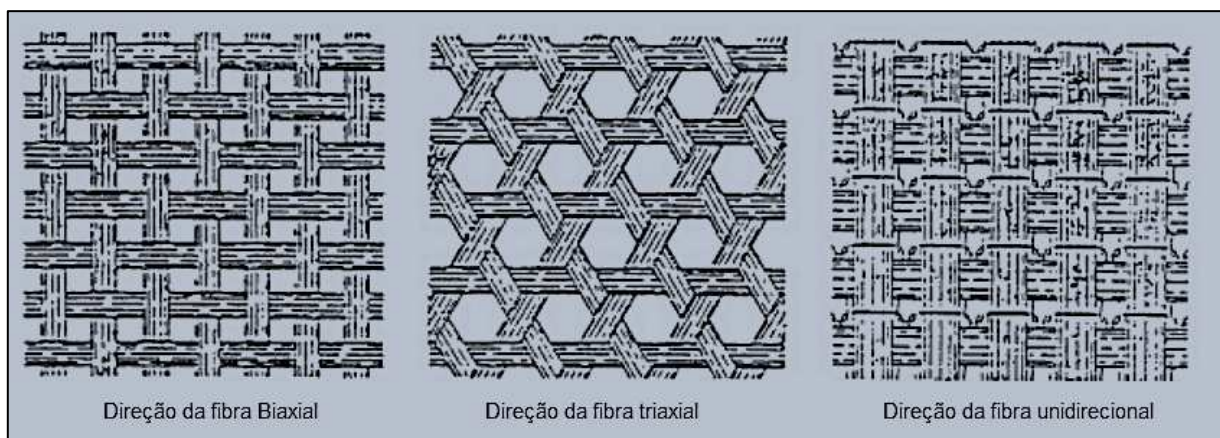
As propriedades estruturais dos materiais compósitos dependem principalmente do tipo de reforço aplicado, sua relação de volume no material, orientação das fibras e a eficiência de aplicação do material. (May, 1988; Shackelford, 2008).

O reforço pode ser constituído por partículas, fibras picadas ou contínuas. Este componente é, prioritariamente, responsável pela resistência mecânica aos esforços, principalmente, de tração e fadiga. O reforço, tratando-se de compósitos estruturais, é constituído de fibras contínuas que podem ser de diferentes materiais, por exemplo, fibras de vidro, carbono e aramida. (Vidal Junior, 2022)

As fibras, podem ser sintéticas ou naturais, dispostas continua ou descontinuamente, podendo ser obtidas em uma variedade de formas como tecidos e mantas de diferentes arquiteturas, no entanto, em projetos de pás eólicas raramente essas substituem a fibra de vidro ou carbono. (Milanese, 2008) (Brøndsted et al., 2005).

As fibras são usadas em várias formas. Os pré-fabricados de fibra, comumente usados em projetos de pás eólicas, incluem tecidos construídos com fibras unidirecional, biaxiais e triaxiais.

Figura 12 - Orientação de fibras



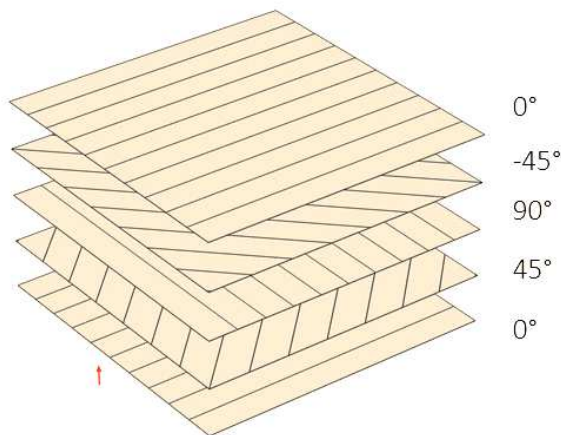
Fonte: Adaptado de National Research Council (1991).

O tipo classificado como Vidro-E (ou E-Glass em inglês, o "E" vem de "Eletric" devido a sua alta resistência elétrica) é o mais utilizado. O componente mais importante deste tipo de fibra é a sílica, ou SiO_2 , dióxido de silício (Mastemberg, 2004; May, 1988).

Os compósitos reforçados com fibras são classificados de acordo com seu comprimento, enfatizando a melhor resistência das fibras curtas em comparação com as fibras longas. Também deve ser notado que materiais reforçados com fibras podem adotar comportamento anisotrópico ou quase isotrópico (Callister & Rethwisch, 2014; Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018).

As camadas dos laminados são compostas por fibras de vidro organizadas de maneira a assegurar alta resistência em direções específicas. No âmbito dos projetos de pás eólicas, os laminados são empilhados e posicionados de forma que a orientação da resistência elevada varie em cada camada. Embora os laminados unidirecionais, constituídos unicamente por fibras alinhadas na direção de 0° , demonstrem uma resistência excepcional nessa orientação, eles apresentam baixa resistência na direção de 90° , visto que a carga é suportada apenas pela matriz. Para lidar com a carga de momento significativa gerada durante o funcionamento das pás, é necessário aumentar o número de fibras na direção longitudinal.

Figura 13 - Laminado em diferentes direções.



Fonte: Saomi (2018).

O posicionamento das fibras em um compósito é fundamental para determinar suas propriedades mecânicas. Em projetos de pás eólicas, esse posicionamento é denominado de lay-up, e consiste em posicionar laminados com direções de fibras combinadas para reforçar a pá. Para isso, são utilizados laminados com orientações em 30°, 45° ou 90° em relação ao eixo longitudinal da pá, de modo a garantir que ela possa suportar todas as cargas geradas durante o seu funcionamento. Com essa combinação de fibras em diferentes direções, é possível criar um compósito com propriedades mecânicas ideais para o projeto em questão.

2.1.1.2. *Resina*

A função da matriz polimérica nos materiais compósitos é fornecer um ambiente para suportar as fibras em sua forma original e protegê-las de danos físicos e intempéries ambientais que podem ser responsáveis por ataques químicos que podem causar corrosão ou delaminação (Nasseh, 2021).

As resinas são constituídas por polímeros de elevado peso molecular, compostos por uma sucessão de monômeros reiterados. Os polímeros de síntese exibem uma configuração química essencialmente simples, na qual a molécula final do polímero é composta por múltiplas unidades repetitivas, denominadas monômeros, unidas covalentemente em uma cadeia polimérica. As características físicas e mecânicas de um polímero estão essencialmente vinculadas à sua estrutura (Nasseh, 2021).

A porção reativa de um polímero pode ser usada para produzir uma resina que, quando misturada com um material de reforço (como fibras), pode ser transformada em um material compósito. Se o polímero tiver ligações cruzadas muito fortes para serem quebradas com calor moderado, ele é considerado um termofixo e pode ser usado para produzir resinas, como epóxi, estervinílica e poliéster insaturado, entre outras. Essas matrizes podem ser notadas em uso em diversos setores industriais, como o eletroeletrônico, de embalagem, construção civil e transporte (Lee; Nevile, 1968).

Existem outras opções além das resinas convencionais, como as resinas termoplásticas. Essas resinas têm a vantagem de poderem ser reaquecidas e reutilizadas sem perder sua resistência. No entanto, elas também possuem algumas desvantagens,

como a alta temperatura necessária para o seu processamento, o que pode comprometer a integridade das fibras. Além disso, pode ser difícil obter uma impregnação uniforme e completa das fibras com termoplásticos. No entanto, eles têm características promissoras, como baixo custo de produção (Grewal, 2020).

A matriz polimérica, classificada como termofixa ou termoplástica, tem a função de transferir forças por meio do alinhamento e proteger as fibras da abrasão e degradação ambiental. Este elemento está diretamente relacionado com a resistência, compressão e cisalhamento dos materiais compósitos. A matriz também confere rigidez ao componente compósito (Mastemberg, 2004).

Os reforços com polímeros baseados em compósitos termofixos representam aproximadamente 80% do mercado. Esses materiais recebem essa denominação devido ao seu endurecimento irreversível através da cura de um prepolímero viscoso (ou resina) ou de um sólido maleável. A cura pode ocorrer por meio de calor, mediante altas temperaturas, ou pela adição de um catalisador. Esses materiais possuem muitas ligações cruzadas, o que torna o rompimento dessas ligações um processo complexo e praticamente impossível. Como resultado, uma vez que o material é curado, não é possível retornar ao seu estado líquido original. Em contraste, os termoplásticos são matrizes que podem ser remodeladas a altas temperaturas, o que lhes confere a vantagem de serem reciclados e processados repetidamente. (Campbell, 2004); (Mishnaevsky et. al, 2017) (Fernandes, 2019).

Tabela 1 – Propriedades relativas entre compósitos termofixos e termoplásticos como matrizes.

Propriedade	Termofixo	Termoplástico
Formulações	Complexo	Simples
Viscosidade	Muito baixo	Alto
Impregnação de fibra	Fácil	Difícil
Aderência pre-impregnação	Bom	Nenhum
Estabilidade de pre-impregnação	Ruim	Excelente
Ciclo de processamento	Longo	Curto a longo
Temperatura de processamento	Baixo a moderado	Alto
Pressão de processamento	Baixo a moderado	Alto

Custo de fabricação	Alto	Baixo
Propriedades mecânicas	Aceitável	Aceitável
Durabilidade	Bom	Desconhecido
Resistencia a solventes	Excelente	Ruim a bom
Tolerância a danos	Ruim a excelente	Aceitável a bom

Fonte: Adaptado de National Research Council (1991)

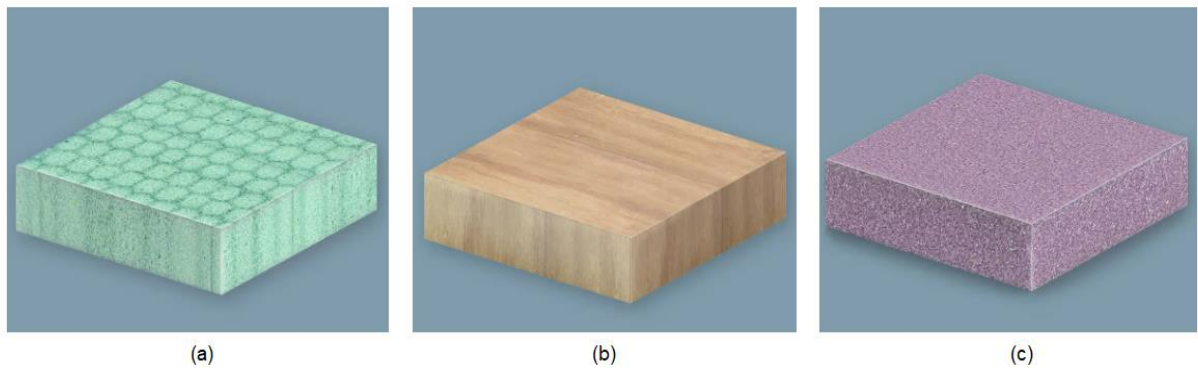
Esse trabalho se limita a avaliação de compósitos termofixos, material presente em projetos de fabricação de pás de turbinas eólicas.

2.1.2. Outros materiais aplicados a pás de turbinas eólicas

Além de fibras e resina, outros materiais compõem o projeto de uma pá de turbina eólica, sendo eles:

Madeira balsa, espumas de policloreto de vinila (PVC) ou polietilenotereftalato (PET): As cascas da pá eólica são compostas de camadas de fibras de vidro, que podem variar de 2 a 54, dependendo da localização da casca. Essas camadas são finas e necessitam de estabilização para manter o perfil necessário da pá. Para este propósito, são empregados materiais conhecidos como núcleos. A falta desses elementos acarretaria em deformações nas estruturas e comprometeria a manutenção do perfil necessário. Os materiais mais comumente utilizados como núcleo incluem a balsa, uma madeira leve e resistente, e as espumas de PVC ou PET, plásticos de baixa densidade reconhecidos por sua capacidade de suportar cargas de compressão e tensão.

Figura 14 - (a) Espuma PET; (b) Balsa; (c) Espuma PVC.

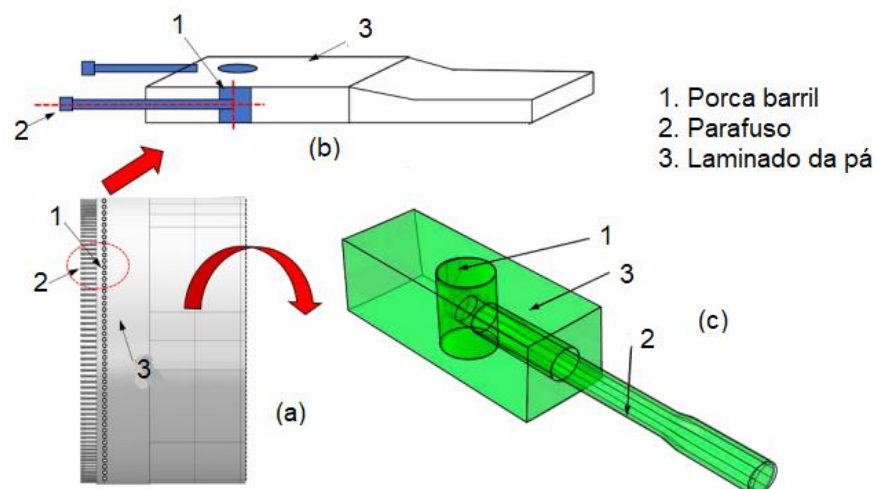


Fonte: Gurit.

Além de proporcionar estabilidade às camadas de fibra, os materiais de núcleo aumentam a espessura da pá bem como, reduzem o seu peso, uma vez que é um material leve e poroso. Em projetos modernos a balsa é utilizada na região da raiz e a espuma da raiz ao tip.

- Porca barril (Barrel): é um componente cilíndrico feito de aço e encaixado em um furo plano feito no laminado de raiz na seção de raiz da pá. A porca barril é unida com a superfície do furo do laminado através de um adesivo, mantendo uma distância específica da borda da raiz da pá (Verma et al., 2019).

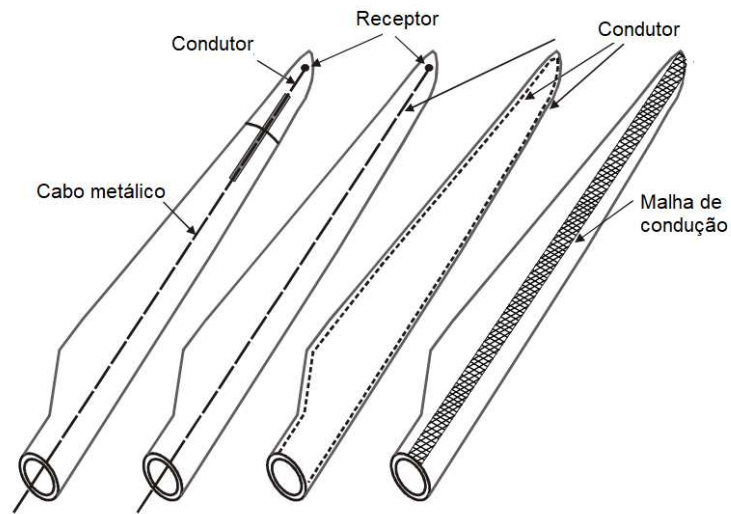
Figura 15 - (a) Típica estrutura de uma raiz de pá eólica com componentes mecânicos; (b) (c) Conexões mecânicas entre porca barril e parafuso.



Fonte: Adaptado de Verma (2019).

- Sistema de proteção contra descargas elétrica: são condutores metálicos distribuídos ao longo da pá que tem como objetivo conduzir a corrente elétrica proveniente de uma descarga atmosférica. Sistemas de detecção de raios podem ser usados para minimizar os efeitos nocivos do raio a partir de uma avaliação preliminar e definição de parâmetros de proteção (Kramer et al., 2007).

Figura 16: Sistema de proteção contra descargas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de Kramer et al. (2007).

Esses componentes representam uma baixa parcela de materiais não compósitos presentes em projetos de pás eólicas.

2.2. Gestão de resíduos

2.2.1. Descomissionamento de parques eólicos

A crescente expansão da participação dos parques eólicos na matriz energética brasileira suscita uma reflexão mais aprofundada sobre os possíveis cenários futuros

desses empreendimentos. Esse exame se concentra especialmente no período imediatamente após os 20 anos de operação para produção de energia, coincidindo com a duração dos contratos de fornecimento. Algumas fontes, como os relatórios anuais do Global Wind Energy Council (GWEC), já começaram a integrar dados relativos ao processo de desativação de parques eólicos em todo o mundo.

Embora a obrigação de descomissionamento esteja estipulada nos contratos de arrendamento de terras particulares no Brasil, a necessidade de uma regulação normativa, à semelhança das normas ANP 27/2006 e 17/2015 do setor petrolífero ou das CNEN NN 9.01 e 9.02 no setor nuclear, deve ser objeto de discussão entre o setor eólico e a ANEEL.

O descomissionamento de um parque eólico engloba os procedimentos de desmontagem, descontaminação e preparação para o encaminhamento e destinação final dos aerogeradores e outros elementos. Este processo visa garantir conformidade com os requisitos legais de segurança e contribuir para a preservação ou recuperação do meio ambiente. A retirada abrange todos os dispositivos, como aerogeradores, linhas de transmissão, transformadores, acessos e sistemas associados. As fases orientadoras desse descomissionamento são diversas, considerando particularidades técnicas e a extensão do período de operação. O propósito dessa ação pode variar, seja para a futura utilização e instalação do aerogerador em outro local ou a desmontagem completa visando reutilização, revenda, reciclagem ou inutilização (EPE, 2021) (Ortegon et al., 2013).

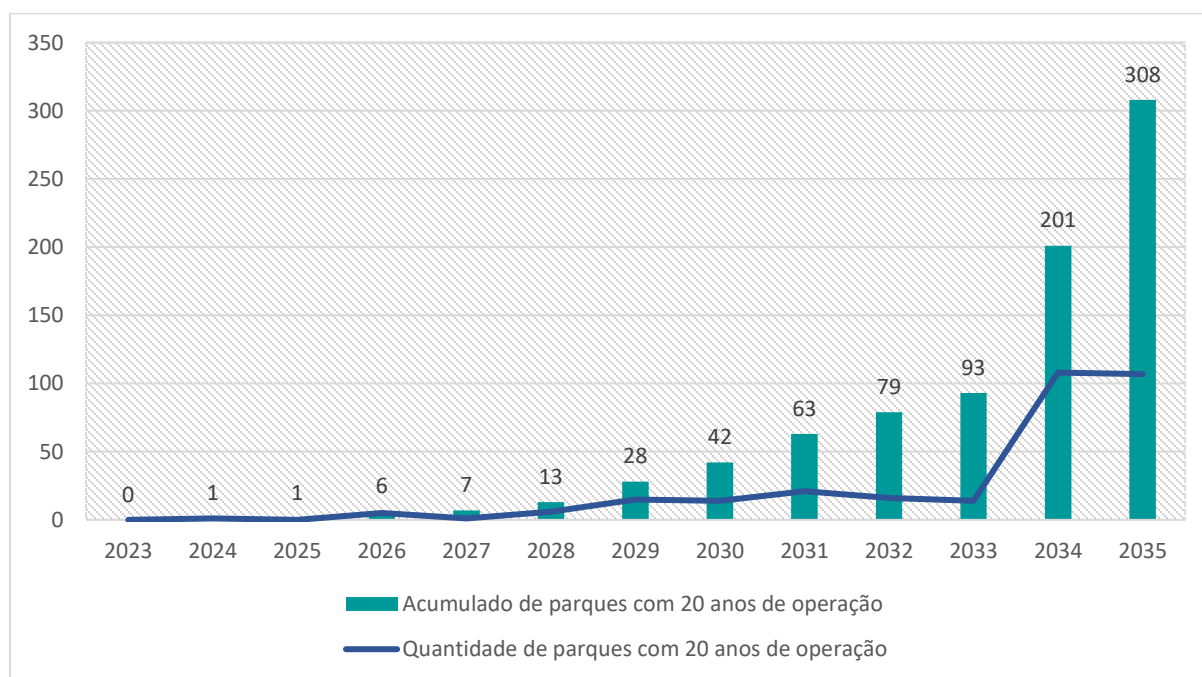
Não existe um processo padronizado para o desmonte de turbinas eólicas. O principal componente a ser removido é a própria turbina, envolvendo essencialmente um processo inverso à instalação, exigindo muitos dos mesmos equipamentos, incluindo guindastes. O desmonte da turbina envolve a remoção das pás, da nacele e da torre, com a separação no local dos módulos e o transporte para aproveitamento do material ou de suas partes (Stripling, 2016). Uma parte significativa do aerogerador é predominantemente composta por componentes metálicos, os quais são amplamente suscetíveis à reciclagem, exceto as pás. As estimativas indicam que entre 80% e 90% do aço e ferro fundido podem ser reutilizados, alcançando uma taxa ainda mais elevada de 95% para alumínio e cobre. Entretanto, de maneira geral, todos os óleos utilizados no

processo são submetidos a procedimentos de incineração (Zimmermann, Göbling-Reisemann, 2012; Martínes et al., 2018).

Um dos principais obstáculos reside na remoção das fundações das torres eólicas, que pode exigir escavações de 8 a 16 metros de profundidade (Stripling, 2016). Há uma considerável disparidade nas regulamentações internacionais referentes à profundidade necessária para a remoção das estruturas das fundações das torres. Por exemplo, na Austrália, a profundidade mínima pode ser de 1,0 metro, no Canadá, 1,2 metros, e varia entre 76 centímetros a 2,5 metros em governos locais dos Estados Unidos (Machuca, 2015). Outro desafio significativo é o descarte das pás eólicas, que são compostas por uma mistura de resina termofixa e fibra de vidro. Diferentemente de outros termoplásticos, essa composição não pode ser simplesmente derretida e reciclada (Institute for Energy Research, 2019; Bomgardner, Scott, 2018).

Baseado em dados coletados de parques eólicos instalados e considerando a vida útil técnica e econômica dos parques eólicos de 20 anos, temos a seguinte projeção de descomissionamento no Brasil, sendo 80% aproximadamente no Nordeste:

Figura 17 - Projeção de descomissionamento de parques eólico no Brasil.



Fonte: Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA

A maioria dos contratos que regula os direitos relacionados à utilização e administração de áreas destinadas a empreendimentos eólicos estipula que o descomissionamento é uma obrigação atribuída ao empreendedor. Nesse cenário, ao encerrar o contrato ou a operação do parque eólico, cabe ao empreendedor desmontar integralmente todos os equipamentos e instalações de geração, restaurando o terreno à sua condição original de modo a se aproximar o máximo possível do estado inicial no início do contrato. Por outro lado, uma fração desses acordos encara o descomissionamento como um direito do empreendedor. Nessas circunstâncias, ao término do contrato ou da operação do parque eólico, o empreendedor tem duas opções. Primeiramente, pode escolher retirar os equipamentos e instalações eólicas do terreno, atribuindo-lhes a destinação que melhor lhe convier. Como alternativa, pode optar por deixar esses elementos no local, ficando a cargo do proprietário suportar os custos financeiros e logísticos do descomissionamento, caso não deseje manter os equipamentos sem operação em sua propriedade. É relevante destacar que uma pequena parcela desses contratos não incorpora cláusulas específicas sobre descomissionamento, deixando em aberto a determinação da responsabilidade pelo processo entre empreendedor e proprietário (EPE, 2021).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece a responsabilidade compartilhada entre todos os participantes do ciclo de vida de um produto, incluindo fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e agentes públicos. Nesse contexto, ressalta-se a relevância de instrumentos como acordos setoriais e a logística reversa, que desempenham um papel crucial na definição de responsabilidades e ações dos diversos atores envolvidos na cadeia produtiva. Essas ferramentas contribuem para a efetiva gestão dos resíduos sólidos, promovendo a sustentabilidade ambiental e a minimização do impacto negativo no meio ambiente.

2.2.2. Enquadramento legal no Brasil

Na década de 1980, surgiram os primeiros indícios de iniciativas legislativas relacionadas ao meio ambiente. Com o passar dos anos, a questão ambiental ganhou

relevância no poder legislativo, levando à criação das "Diretrizes Técnicas para a Gestão de Resíduos Sólidos" em 1999, aprovadas pelo Governo Federal, porém sem efetivação. A falta de uma legislação específica voltada para os resíduos sólidos, separada de outros dispositivos legais, tornou necessário estabelecer uma legislação dedicada exclusivamente a esse tema.

Antes da implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, ocorreram avanços significativos no campo das leis ambientais. Destacam-se duas leis em particular: a Lei nº 9.974, que trata do manuseio e operações diversas com Agrotóxicos, datada de 6 de junho de 2000; e a Lei nº 9.966, referente à Contaminação das Águas, estabelecida em 28 de abril de 2000. A existência dessas leis ambientais reflete um reconhecimento cada vez maior da necessidade de abordar de forma adequada a problemática dos resíduos sólidos. A partir de 2000, o poder legislativo passou a estabelecer marcos legais mais robustos, estabelecendo diretrizes claras para o saneamento básico, o manuseio de agrotóxicos e a contaminação das águas. Essa evolução legislativa buscava promover a conscientização sobre a importância da gestão adequada dos resíduos sólidos, fornecendo um arcabouço legal abrangente e detalhado para lidar com essa questão ambiental crucial.

A sucessão dessas legislações ao longo dos anos de 2000 a 2007 ressalta a crescente importância de uma legislação esclarecedora, rigorosa e específica para abordar a questão dos resíduos sólidos. Uma das legislações em destaque, a Lei nº 11.445, promulgada em 5 de janeiro de 2007 no artigo 3º, inciso I, letra c, destaca explicitamente que a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos são partes integrantes do processo de saneamento, abrangendo os serviços, estruturas e instalações operacionais relacionadas. Essa inclusão é de suma importância não somente para essa lei em específico, mas também para as demais legislações mencionadas anteriormente, pois atribui a devida relevância ao tema dos resíduos sólidos.

Após mais discussões, a Lei nº 12.305, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos, foi promulgada em 2 de agosto de 2010. Esse marco inicial impulsionou debates sobre lixões e outras formas irregulares e prejudiciais de disposição de resíduos no meio ambiente, estabelecendo um processo desafiador de

conscientização sobre a necessidade de mudança de comportamento em relação aos resíduos sólidos de forma abrangente. Essa lei, juntamente com a Lei nº 9.605, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, promulgada em 12 de fevereiro de 1998, que estabelece punições por danos ao meio ambiente, evidenciam o amadurecimento legal em relação aos resíduos sólidos. A inclusão dos resíduos sólidos na Lei de Crimes Ambientais destaca a importância da gestão integrada desses resíduos e esclarece as possíveis consequências legais em caso de danos causados (Corbucci Neto, 2012).

Quando um parque eólico é descomissionado, é gerada uma quantidade significativa de resíduos que requerem um tratamento adequado para evitar danos ao meio ambiente. É fundamental que a energia eólica mantenha sua reputação como uma fonte de energia limpa e ecologicamente amigável. Portanto, a indústria tem a responsabilidade de reduzir o impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida de um parque eólico, inclusive na fase pós-operacional, conforme estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, definida pela Lei nº 12.305/2010, que também se aplica aos parques eólicos. De acordo com essa Lei, os grandes geradores de resíduos, bem como os geradores de resíduos não classificados, são responsáveis por garantir a destinação adequada de seus resíduos de maneira ambientalmente correta. Para isso, é necessário seguir a hierarquia de gestão de resíduos, que inclui ações como evitar a geração, reduzir, reutilizar, reciclar, tratar os resíduos sólidos e dispor adequadamente dos rejeitos. Além disso, de acordo com o artigo 19 da Lei, esses geradores devem elaborar seus próprios planos de gerenciamento dos resíduos que produzem.

Para fortalecer a necessidade de cumprimento da lei, em 23 de outubro de 2017, o Governo Federal publicou o Decreto Federal nº 9.177, que estabeleceu a igualdade de tratamento na fiscalização e no cumprimento das obrigações para todos os responsáveis pelo ciclo de vida do produto. Isso significa que a fiscalização será realizada de forma igualitária para fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes. Diante disso, várias organizações começaram a desenvolver planos de resíduos sólidos e acordos setoriais para cumprir a Política Nacional de Resíduos Sólidos, incluindo os produtores de materiais compósitos.

O Decreto Interministerial Nº 274, emitido em 30 de abril de 2019, estabelece as diretrizes para a implementação da conversão de energia a partir dos resíduos sólidos

urbanos conforme definido na Política Nacional de Resíduos Sólidos. Neste texto, é validada a transformação energética como uma forma de encaminhamento final ecologicamente apropriada para os detritos, além de categorizar aqueles adequados para passarem por esse procedimento. Adicionalmente, o Decreto nº 274/19 destaca a relevância da autorização ambiental para as Instalações de Transformação Energética, definindo protocolos operacionais e requisitando a elaboração de Planos de Prevenção, Planos de Crise e Planos de Encerramento. É importante observar que esta legislação não trata da utilização de energia proveniente dos gases resultantes da fermentação e da decomposição da matéria orgânica em depósitos de resíduos.

Considerando o tempo decorrido, a legislação ambiental brasileira teve um avanço relativamente rápido. No entanto, em comparação com outros países, o Brasil ainda não avançou o suficiente na regulamentação da reciclagem de materiais compósitos, especialmente suas principais fontes, de maneira especializada.

Atualmente, já existem algumas iniciativas em andamento no Brasil para a implementação de sistemas de logística reversa voltados para materiais compósitos. No entanto, essas iniciativas ainda se aplicam apenas a alguns tipos específicos de materiais compósitos, e sua viabilidade depende de acordos e parcerias com os fabricantes para definição dos custos envolvidos (Devolva, 2023).

2.2.3. Alternativas para destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas

Presentemente, existem múltiplos contextos e tecnologias que tratam das pás eólicas de aerogeradores após o fim do seu ciclo de vida. Consoante as informações apresentadas por Beason et al. (2022), as alternativas disponíveis após a utilização completa dessas pás eólicas incluem a reutilização, a reciclagem ou o descarte.

A instrução diretiva europeia de destinação de resíduos (2008/98/EC), define conceitos básicos relativos à gestão de resíduos, com ênfase na necessidade do aumento da reciclagem e destaque para a redução de utilização de aterros como opção

final. Essa mesma instrução diretiva define um nível hierárquico para a destinação sustentável de resíduos desta natureza, porém não é uma diretriz definitiva, mas representa aproximadamente os custos ambientais e econômicos relativos associados a cada opção.

Figura 18 – Hierarquia de gerenciamento de resíduos provenientes de pás eólicas segundo a 2008/98/EC.



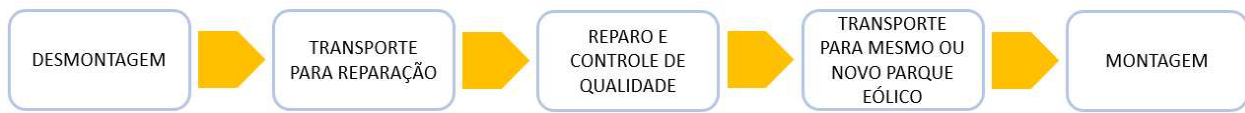
Fonte: Adaptado de Ierides et al. (2018)

A “Prevenção” aborda a reutilização das pás de turbinas eólicas já existentes e de suma importância. No entanto, à medida que mais pás eólicas estão sendo fabricadas, surge a necessidade de elaborar projetos que evitem o desperdício no fim de sua vida útil e/ou simplificar sua posterior reciclagem. Essa abordagem de ecodesign tem como objetivo prolongar a durabilidade das peças, ao planejar sua desmontagem e reciclagem de maneira mais acessível e/ou reduzir a quantidade e diversidade de materiais utilizados nas pás eólicas. No momento atual, apenas algumas iniciativas seguem essa estratégia de ecodesign. Essas iniciativas se baseiam principalmente na substituição de materiais por aqueles de origem biológica ou reciclável. Os biocompósitos são uma ampla classe de materiais geralmente definidos como compósitos poliméricos nos quais um dos componentes é derivado naturalmente. Os biocompósitos podem ser caracterizados pela fonte do polímero (biológica ou petroquímica) e sua capacidade de biodegradação. Para

aplicações em pás de turbinas eólicas, diversos biocompósitos promissores têm sido investigados, os quais são compósitos por fibras naturais e uma resina de base petroquímica não biodegradável (Beauson, 2022).

A “Reutilização” consiste no reuso de uma porção preexistente da pá eólica para uma aplicação distinta. Uma das vantagens é a reutilização da estrutura sem a necessidade de um processamento extensivo, embora seja desafiador implementar essa solução em uma escala de produção em larga escala. A adoção de métodos para avaliar o grau de degradação e estimar o tempo de vida útil restante das pás de turbinas eólicas ao final de seu ciclo operacional poderia facilitar a reutilização segura de um número ampliado dessas pás.

Figura 19 – Diagrama de processo para reutilização de pás de turbinas eólicas.

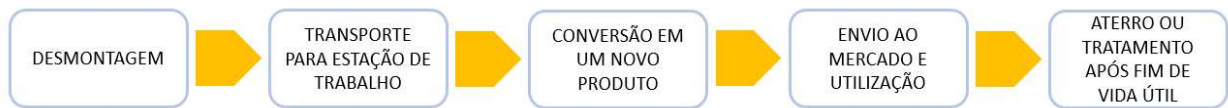


Fonte: Adaptado de Grewal (2020)

A reutilização das pás de turbinas eólicas, ao término de sua vida útil, desempenha um papel crucial na redução do impacto ambiental global associado ao ciclo de vida das turbinas eólicas. Isso ocorre ao evitar a necessidade de produção de novas pás eólicas, bem como de outras fontes alternativas de geração de eletricidade (Vigolo, 2022).

No processo de “Reaproveitamento”, qual representa uma etapa subsequente na hierarquia de resíduos, envolvendo o reaproveitamento de uma porção preexistente da pá eólica em uma aplicação distinta, geralmente de valor inferior à sua utilização original (Windeurope, 2020). O reaproveitamento busca manter intactas as propriedades estruturais e materiais do compósito, utilizando todas ou seções menores da lâmina para novos fins (Gentry et al., 2020).

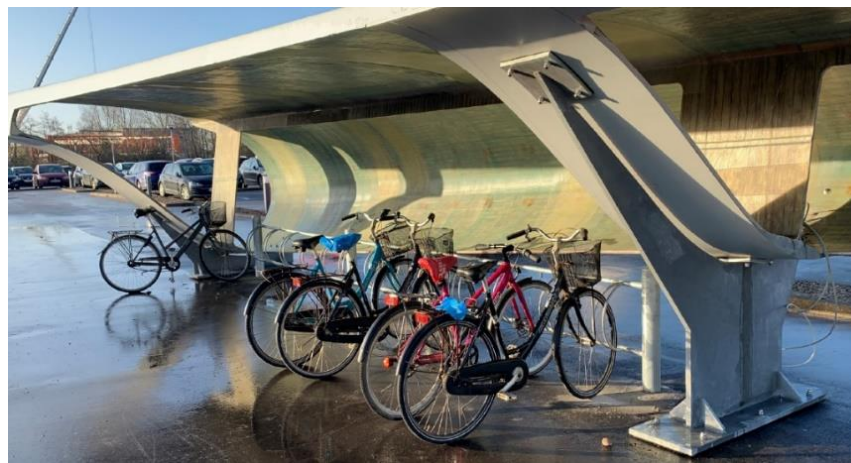
Figura 20 – Diagrama de processo para reaproveitamento de pás de turbinas eólicas.



Fonte: Adaptado de Grewal (2020)

Como exemplo, na Figura 21 é demonstrado a reutilização de pás eólicas em infraestruturas urbanas.

Figura 21 – Cobertura de bicicletário público na Dinamarca.

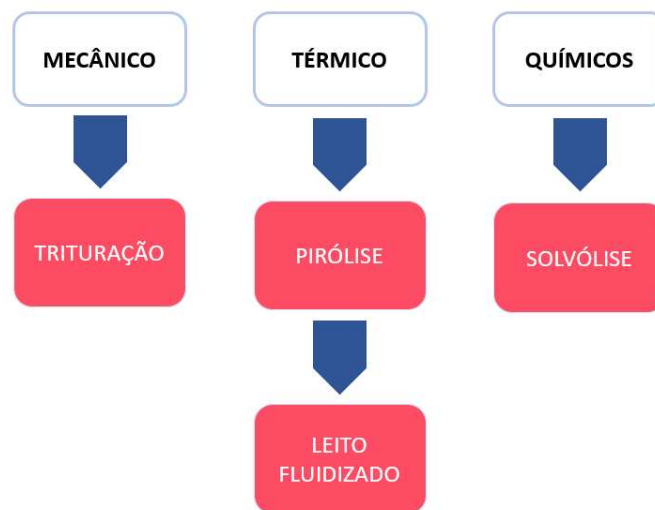


Fonte: WINDEUROPE (2020)

Na “Reciclagem”, tem sido explorada a utilização de resíduos moídos provenientes de filamentos retirados de pás descartadas como aditivo para concreto, visando melhorar suas propriedades mecânicas, além de perspectivas termodinâmicas, como apontado por Glosser et al.(2022), que confirmou em seu artigo os benefícios técnicos e ambientais da inclusão de fibras provenientes de pás descartadas como suplemento para materiais cimentícios. Recentemente, têm surgido diversas tecnologias para explorar a reciclagem de Plásticos Reforçados com Fibras de Vidro (GFRP). Entre essas técnicas, destaca-se a trituração mecânica, conforme mencionada por Post et al. (2020), caracterizada pela redução gradual do tamanho do material no final de sua vida útil, seja por corte em placas com dimensões adequadas para equipamentos de processamento mecânico (aproximadamente 100mm) ou por esmagamento.

Paralelamente, avanços têm sido alcançados por meio de processos químicos e termoquímicos, como a separação por pirólise, solvólise com ácido nítrico, amônia ou glicol, bem como a decomposição da matriz polimérica em sistemas de leito fluidizado, permitindo a separação eficiente das fibras de vidro da matriz polimérica com o auxílio de ciclones de separação, conforme enfatizado por Gopalraj (2020).

Figura 22 – Diagrama dos principais processos para reciclagem de pás de turbinas eólicas.



Fonte: Autor

A reciclagem mecânica consiste na moagem mecânica, na qual o material compósito é moído em pó e separado em pó rico em fibras e pó rico em matriz. Até cerca de 40% do material compósito permanecerá como resíduo, que é depositado em aterro (Grewal, 2020).

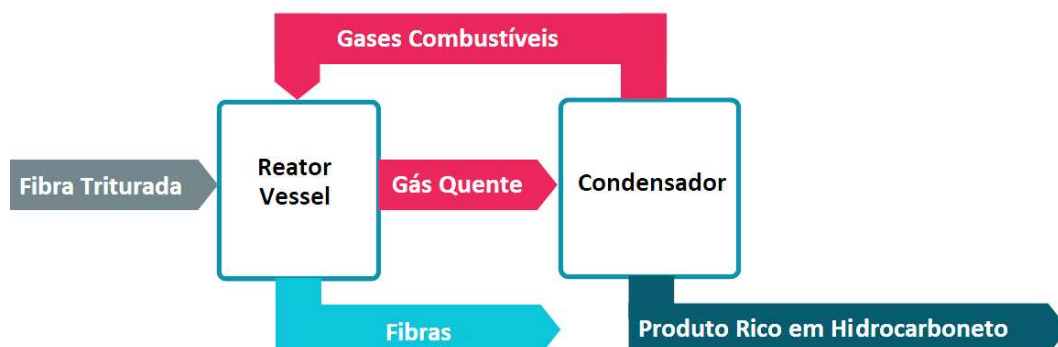
Figura 23 – Diagrama de processo de moagem de compósitos.



Fonte: Adaptado de Grewal (2020)

O método de reciclagem térmica é dividido principalmente em dois grupos, sendo a a) pirólise e o b) leito fluidizado. A pirólise é caracterizada pelo aquecimento controlado do material desejado, na ausência de oxigênio, visando sua separação. O objetivo desse processo é converter as moléculas de materiais orgânicos (resina) em moléculas de menor peso, gerando principalmente gases e frações de óleo que podem ser empregados na recuperação de energia durante a pirólise e outros procedimentos. Os materiais inorgânicos (fibras e materiais de enchimento), por sua vez, permanecem intactos e podem ser recuperados. A faixa de temperatura de operação da pirólise varia entre aproximadamente 450 e 700 °C, dependendo do tipo de resina utilizado na produção do material compósito. A resina de poliéster sofre decomposição a temperaturas entre 400 e 450°C, enquanto a resina epóxi requer temperaturas mais elevadas, situando-se entre 500 e 550°C. (Jesen, 2018) (Ramirez-Tejeda et al., 2017) (Oliveux et al., 2015)(Overcash et al., 2017) (Cherrington, 2012).

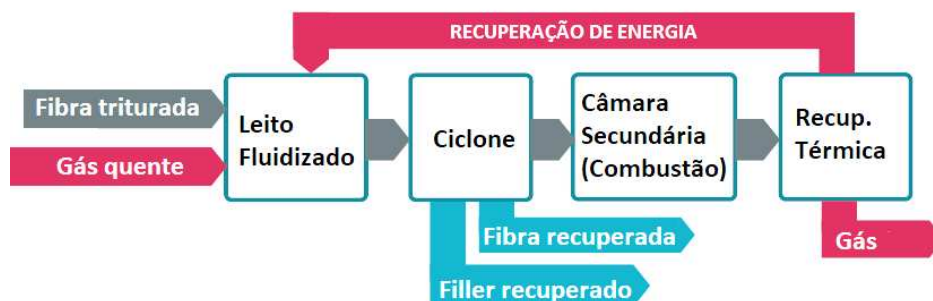
Figura 24 – Diagrama de processo da pirólise.



Fonte: Adaptado de Grewal (2020)

Já o processo de reciclagem via leito fluidizado, consiste na pirólise da matriz de polímero em uma camada de areia de sílica que é fluidizada por um fluxo contínuo de ar quente com alto teor de oxigênio. Dentro de um leito fluidizado, o material em processamento se separa em fibras e cargas (compostos voláteis), que são transportadas pela corrente de ar como partículas individuais. As partículas individuais são suspensas em uma câmara secundária de alta temperatura (1000 °C), que resulta na oxidação dos compostos voláteis, separando as fibras (Pickering, 2006) (Pickering et al., 2000). Esta opção de tratamento também requer o corte prévio das pás em pequenos pedaços (Grewal, 2020). Como citado por Gopalraj (2020), esse método de reciclagem é capaz de processar fibras de vidro e de carbono e é bastante favorável como meio de reciclagem de compósito provenientes de pás eólicas em fim de vida útil, no entanto, é notado uma baixa resistência da fibra bem como reduções consideráveis do tamanho da fibra, além da sua característica porosa.

Figura 25 – Diagrama de processo do leito fluidizado.

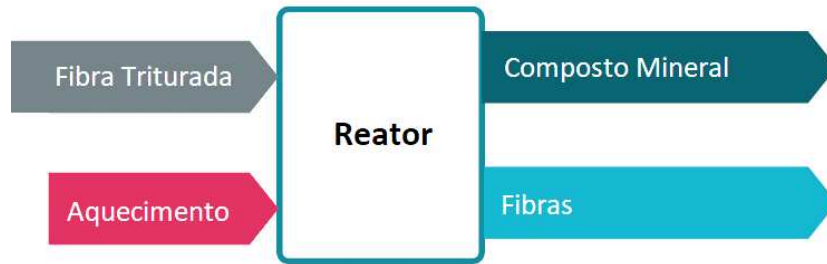


Fonte: Adaptado de Gopalraj (2020)

A reciclagem química, sendo o método mais comum a solvólise, é um método que utiliza um solvente composto de catalisadores/aditivos para despolimerizar o produto químico reticulado, ligação presente em produtos poliméricos termofixos. Os solventes podem ser, por exemplo, álcoois, água, glicóis ou cetonas (Yang et al., 2012). O problema com o processo de solvólise reside no fato de que a escolha do solvente varia,

consequentemente, a temperatura e pressão que é diretamente relacionado ao material no qual o compósito é posto é construído.

Figura 26 – Diagrama de processo de solvólise.

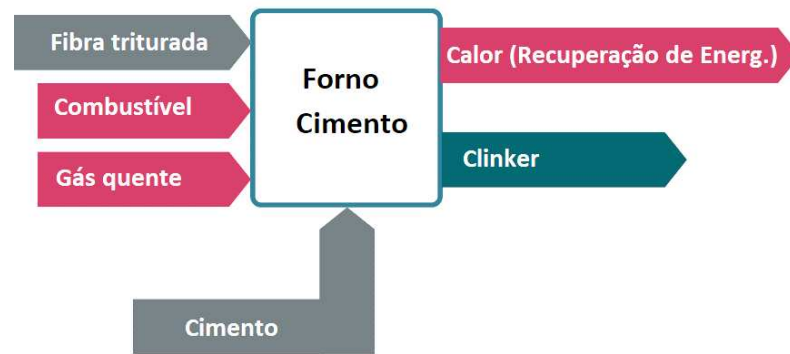


Fonte: Adaptado de Grewal (2020)

Embora os produtos específicos do tratamento sejam diferentes dependendo de qual solvente é usado, o objetivo sempre é separar fibras da resina (Grewal, 2020). Conforme citado por Liu et al. (2019), em uma projeção industrial, a reciclagem química poderia potencialmente reduzir os impactos ambientais das pás das turbinas eólicas em 14% a 44% em comparação com o aterro. Muitos estudos mostram que o custo da reciclagem química ou térmica de GFRP ainda é demasiado elevado, enquanto a qualidade do GF é demasiado baixa (Ginder e Ozcan, 2019).

A “Recuperação” é o método que busca a eliminação de todos os elementos singulares que podem ser reaproveitados posteriormente e converter os resíduos remanescentes em combustível ou energia térmica. Por exemplo, o coprocessamento de resíduos com recuperação de energia no setor cimenteiro, no qual é evitado o depósito de resíduos em aterros sanitários, tornando a indústria do cimento menos exigente em termos de energia e mais eficiente em termos de recursos Windeurope (2020).

Figura 27 – Diagrama de processo de coprocessamento em forno de cimento.



Fonte: Adaptado de Grewal (2020)

Essa destinação já é aplicada em escala industrial nos Estados Unidos e países europeus, onde é comprovado que até 75% das matérias-primas do cimento são substituídas por materiais compósitos, reduzindo não só a quantidade de resíduos provenientes de pás eólicas como também o impacto ambiental da indústria cimenteira (Grewal, 2020).

Por fim, o “Descarte” é o método de tratamento de resíduos menos favorecidos porque não há recuperação de material ou energia. Os materiais são destinados a aterros sanitários. Esta opção está caindo em desuso lentamente, uma vez que as pás eólicas praticamente nunca se degradam naturalmente. Além disso, espera-se que mais países restrinjam cada vez mais o aterro de materiais compósitos (Sakellariou, 2018) (Karavida, 2015).

Figura 28 – Pás eólicas descartadas. Rodovia CE-040, estado do Ceará.



Fonte: Autor

Figura 29 – Pás eólicas descartadas no distrito industrial de Sorocaba, estado de São Paulo.



Fonte: Scinocca (2018)

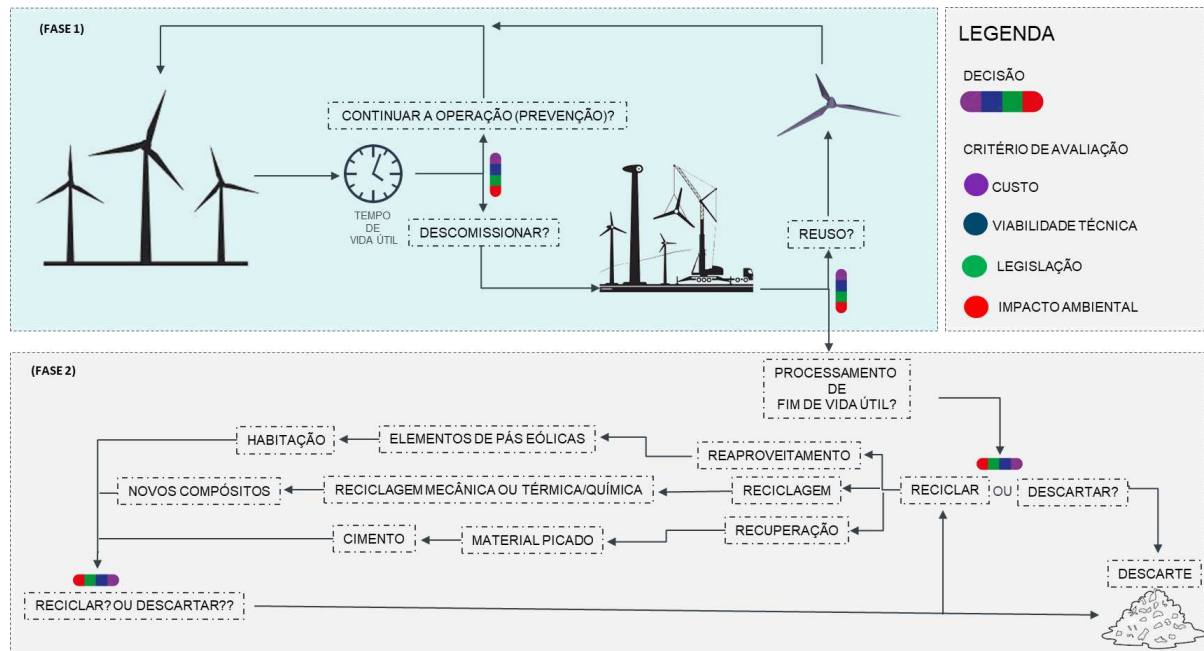
Figura 30 – Pás eólicas descartadas em Mossoró, estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: Autor

Em 2022, em uma publicação onde se abordou o difícil contexto europeu de descarte de pás eólicas em fim de vida útil, Beauson demonstrou em um diagrama, decisões a serem tomadas no final da vida útil das pás das turbinas eólicas. Os critérios para as decisões foram: custo, viabilidade técnica, legislação e impactos. O diagrama é separado em duas fases principais. Uma primeira fase inclui operações contínuas e reutilização. Na segunda fase, as pás das turbinas eólicas são recicladas e transformadas em novos materiais ou descartados dependendo da avaliação feita dos critérios. A partir dessa segunda fase, não há como voltar para a primeira fase, pois é altamente improvável que os materiais recuperados das pás das turbinas eólicas possam ser reutilizados em nas pás novamente. O descarte, incluindo o aterro, é a última etapa do diagrama. O diagrama é demonstrado na Figura 31.

Figura 31 – Fluxo de tomada de decisão para pás em fim de vida útil.



Fonte: Adaptado Beauson et al. (2022)

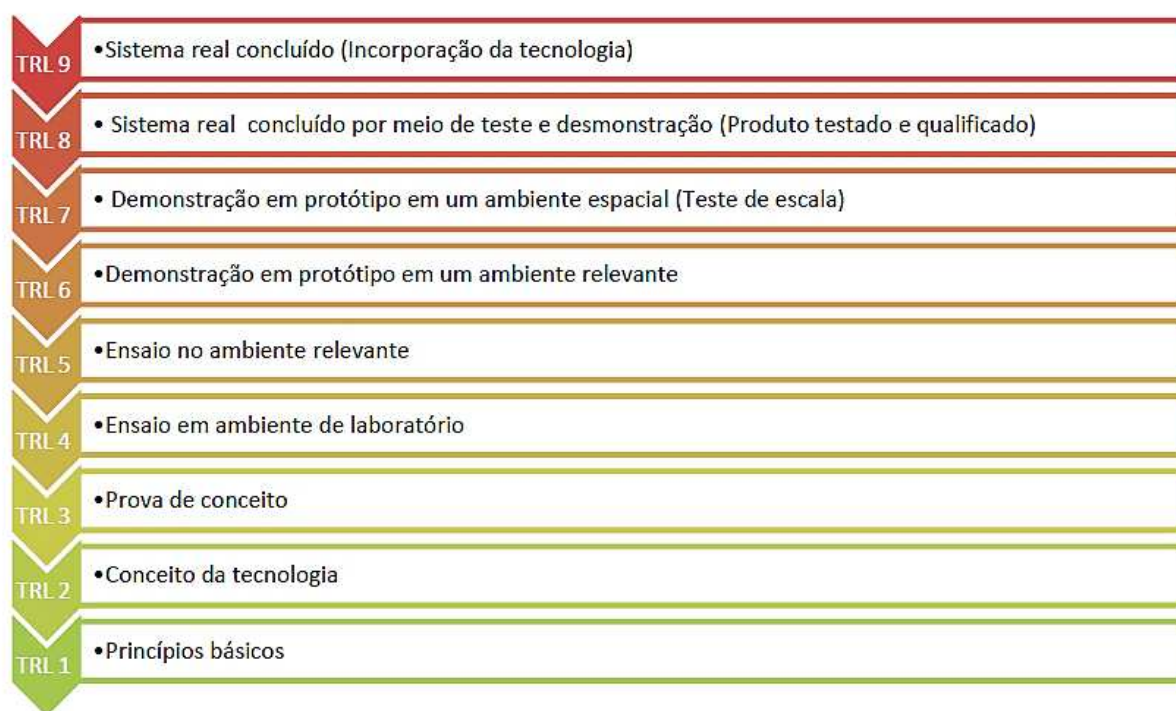
Essas definições estabelecem as possibilidades para uma adequada gestão das pás de aerogeradores ao fim de sua vida útil, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade.

De acordo com Paulsen (2021), com base no conhecimento estabelecido sobre o histórico e o desenvolvimento dos métodos de reciclagem individuais, juntamente com as condições e requisitos associados a cada método, é possível realizar uma estimativa do nível de prontidão tecnológica (TRL) desses métodos e suas tecnologias correspondentes. O Technology Readiness Level (TRL), ou Níveis de Prontidão Tecnológica, é uma metodologia amplamente empregada para avaliar o nível de maturidade de tecnologias em várias áreas. Inicialmente desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) na década de 1970, esse sistema de classificação oferece uma estrutura consistente e objetiva para estimar o nível de desenvolvimento e prontidão de uma determinada tecnologia. Ao atribuir uma pontuação de 1 a 9, o TRL permite uma avaliação clara e comparativa, fornecendo uma base sólida para tomar decisões estratégicas relacionadas à implementação e adoção de tecnologias inovadoras. Sua aplicação abrange diversos setores, desde a exploração espacial até a

indústria, e desempenha um papel fundamental no direcionamento de recursos e no estabelecimento de expectativas realistas em relação ao progresso tecnológico.

Conforme estabelecido pela escala de Níveis de Prontidão Tecnológica (TRL), as fases iniciais, compreendidas entre TRL 1 e 4, denotam o estágio em que a tecnologia é concebida e desenvolvida em ambiente laboratorial. À medida que a tecnologia avança, os estágios TRL 5 e 6 assinalam a transição para as fases operacionais, caracterizadas pela fabricação de protótipos em escala real, seguida por testes e validação do produto. Estas etapas são fundamentais no progresso do desenvolvimento tecnológico, aproximando a inovação de sua implementação prática e eventual comercialização.

Figura 32 – Níveis de prontidão de tecnologia (TRL).

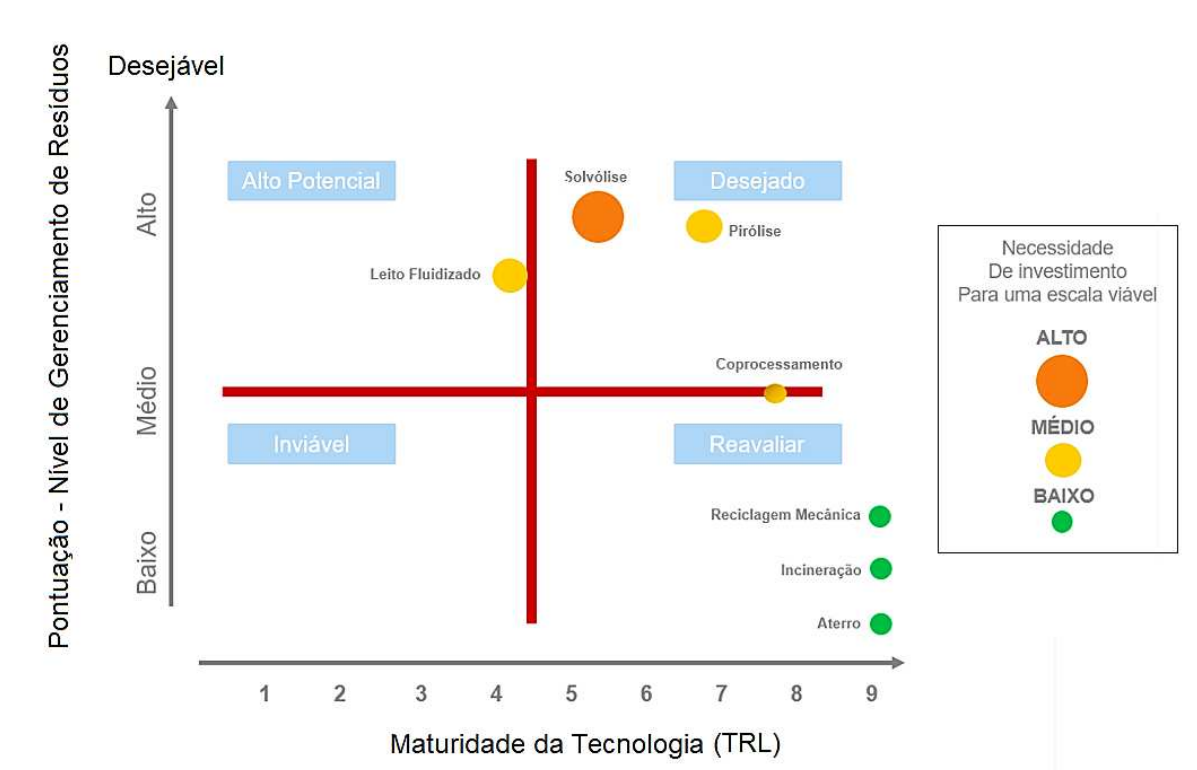


Fonte: Adaptado de Vigolo (2022)

Ao combinar a escala de Níveis de Prontidão Tecnológica (TRL) com o conhecimento sobre os diferentes métodos de reciclagem e suas posições na hierarquia estabelecida pela Diretiva 2008/98/EC, é possível obter insights valiosos sobre as

tecnologias disponíveis. Em seu estudo, Paulsen (2021) elabora um diagrama TRL que mapeia as tecnologias de reciclagem conhecidas, levando em consideração os possíveis resultados dos materiais residuais. Essa abordagem permite uma visualização clara da maturidade e viabilidade dessas tecnologias, fornecendo uma base sólida para tomadas de decisão e orientando esforços de pesquisa e desenvolvimento em direção a soluções eficazes de reciclagem.

Figura 33 – TRL de diferentes métodos de reciclagem.



Fonte: Adaptado de Paulsen (2021)

Considerando a avaliação dos diversos métodos e seus atuais Níveis de Prontidão Tecnológica (TRL), destaca-se atualmente o método de reciclagem mecânica para viabilizar o coprocessamento como a abordagem mais vantajosa no tratamento dos resíduos provenientes de pás eólicas no final de sua vida útil. Esse método, devido à sua capacidade de operar em escala industrial, é considerado a solução mais adequada para lidar com esses resíduos. Sua aplicação na reciclagem mecânica permite uma abordagem eficiente e econômica para o reaproveitamento dos materiais dessas pás,

contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a gestão responsável de resíduos na indústria eólica.

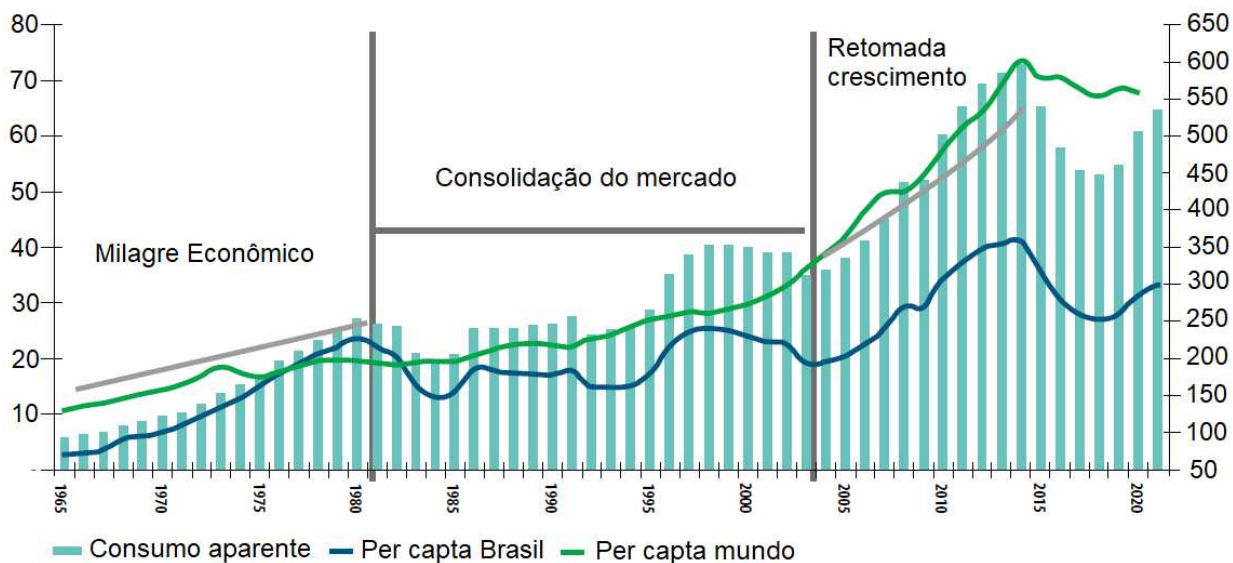
2.2.4. Coprocessamento de resíduos na indústria do cimento

Tendo em vista que o propósito deste trabalho se concentra na utilização de resíduos provenientes de pás eólicas em fim de vida útil para recuperação energética por meio de processo de coprocessamento em indústrias cimenteiras, é fundamental fornecer uma descrição do processo de produção do cimento, a fim de obter um maior *entendimento sobre essa operação*.

2.2.4.1. Processo de fabricação de cimento

O cimento representa um dos principais itens comercializados em escala global, e o Brasil ocupa posição de destaque entre os principais produtores mundiais desse material. No decorrer do ano de 2021, observou-se um incremento de 6,5% no consumo de cimento no território brasileiro em relação ao ano precedente, totalizando 64,5 milhões de toneladas ao término do período em questão. Tal crescimento se traduziu em um consumo per capita de 300 kg/hab/ano, conforme indicado pelo Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) para o ano de 2021. Atualmente, os distribuidores destacam-se como os principais consumidores de cimento no Brasil, respondendo por 58% do consumo total, seguidos pelas empresas de concreto (20%), construtoras e empreiteiras (9%), outros consumidores industriais (9%), e fabricantes de artefatos (4%) (SNIC, 2021).

Figura 34 – Consumo aparente de cimento no Brasil (em milhões de toneladas)



Fonte: SNIC (2021)

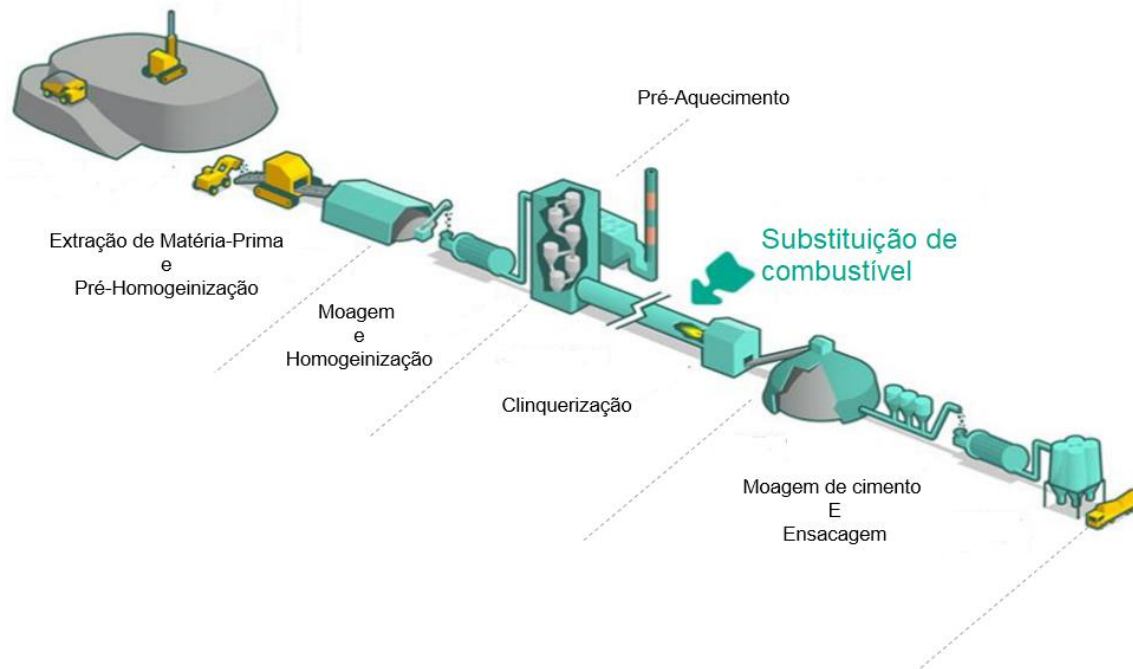
Os dados indicam que o tipo de cimento mais amplamente produzido no Brasil é o Cimento Portland Composto (CPII), o qual corresponde a cerca de 70% da produção total. Conforme determinado pela norma NBR 11578/91, este tipo de cimento é constituído por aproximadamente 54 a 56% de clínquer e sulfatos de cálcio, de 6 a 34% de escória granulada de alto-forno, de 6 a 14% de material pozzolânico e até 10% de material carbonático.

No contexto da fabricação do cimento, conforme detalhado na Figura 35, os principais elementos constituintes são o calcário (87%) e a argila (11%), portadores, respectivamente, de CaCO_3 e SiO_2 . Ao longo do processo produtivo, são incorporados diversos compostos, tais como minério de ferro (Fe_2O_3), argila (SiO_2) e bauxita (Al_2O_3), com a finalidade de corrigir os argilo-minerais (Feam, 2008).

Os complexos de produção de cimento são compostos por duas principais atividades: extração de calcário e fabricação de cimento. A mina e a área industrial estão conectadas fisicamente por meio de sistemas de transporte, como teleféricos ou correias transportadoras, responsáveis por movimentar o calcário extraído da mina até a fábrica de cimento. Essa interligação física entre as etapas de mineração e fabricação é essencial para viabilizar a eficiência e a continuidade do processo produtivo. Em linhas

gerais, a produção de cimento é dividida em cinco macro fases, desde a extração da matéria prima à ensacagem e expedição (Santi & Sevá Filho, 2004).

Figura 35 – Fluxograma de fábrica de cimento.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2012)

Macro Fase 01 - Extração de matéria prima e pré-homogeneização: O cimento é composto por calcário, argila, óxidos de ferro e alumínio, e gesso. No Brasil, o calcário é extraído em minas a céu aberto por meio de explosivos, onde esses são utilizados para descolar os blocos de rocha, que são posteriormente transportados para a fábrica e submetidos ao processo de britagem (Santi e Sevá Filho, 2004) (Nielsen, 2012). A argila também é extraída nessa etapa, com base em critérios como disponibilidade e composição. O gesso, derivado da gipsita, é adicionado ao cimento antes da moagem, retardando seu endurecimento após a adição de água (Bernardo, 2009). Posteriormente a extração, os materiais são transportados e inseridos em equipamentos denominados britadores, principal equipamento da etapa de britagem. A etapa de britagem tem por objetivo a redução granulométrica das partículas do calcário proveniente da mina. Essa etapa desempenha um papel fundamental, pois a diminuição do tamanho das partículas

resulta em um aumento significativo da área superficial disponível para as reações químicas no interior do forno. Adicionalmente, é importante ressaltar que durante a etapa de cominuição ocorre a remoção da maior parte das impurezas presentes no calcário, contribuindo para a obtenção de um material mais puro e adequado para a produção de cimento (Silva, 1994).

Após o processo de britagem, os materiais são conduzidos para uma zona de armazenamento, onde ocorre a pré-homogeneização do calcário e da argila. Essa etapa tem como objetivo assegurar a uniformidade da matéria-prima que será submetida à queima no forno de clínquer, visando à obtenção de um produto de qualidade consistente (Silva, 1994).

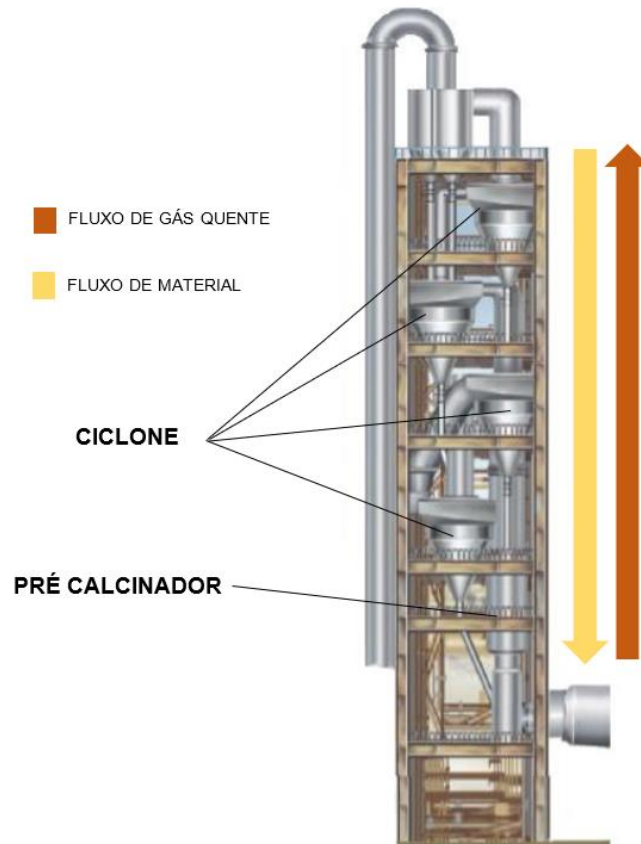
Macro Fase 02 - Moagem e homogeneização: Após a pré-homogeneização, proporções são direcionadas a uma estação de moagem, que visa reduzir a granulometria do material, dando origem à chamada farinha. A estação de moagem é composta por rolos cilíndricos que tem a função de comprimir a matéria, reduzindo a grãos minimamente pequenos a pontos de serem sugados por uma pressão negativa produzida por um separador eletromecânico.

Após a moagem, a farinha é transferida e armazenada em silos para homogeneização da matéria.

Macro Fase 03 - Pré-aquecimento: o processo inicia-se com o encaminhamento da farinha para a torre de ciclone, onde passará por um estágio inicial de aquecimento antes de entrar no forno rotativo. Este estágio compreende a condução da farinha através de uma série de ciclones verticais, nos quais entra em contato com os gases de exaustão provenientes do forno rotativo, movendo-se em sentido contrário à direção da farinha. Esse procedimento visa a eliminação da umidade residual presente na farinha. Durante este processo, a energia térmica dos gases de exaustão é recuperada, enquanto a farinha é submetida ao processo de pré-aquecimento. O intuito é reduzir o gradiente de temperatura entre a farinha e o forno, resultando em uma otimização da eficiência das reações e, conseqüentemente, em uma significativa economia de combustível. Ao término deste processo, a farinha atinge uma temperatura aproximada de 800°C no pré-calcinador, uma câmara de combustão secundária posicionada antes da entrada da

farinha no forno. Desta forma, quando a farinha adentra o forno rotativo, já se encontra com aproximadamente 30% da calcinação realizada (Belato, 2013) (Ramos, 2015).

Figura 36 – Ciclones de pré-aquecimento.



Fonte: Adptado de Belato (2013)

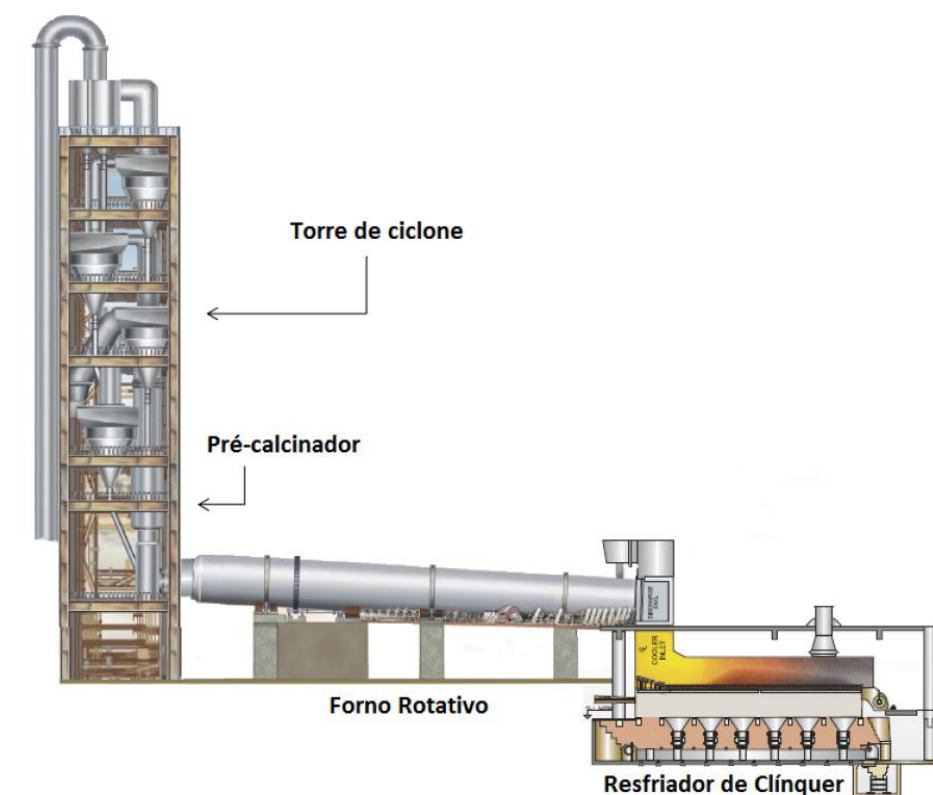
No Brasil, as unidades fabris de cimento adotam o emprego do pré-aquecedor e do pré-calcinador em seu processo produtivo, pois a sua aplicação acarreta uma diminuição considerável do consumo energético durante a etapa de calcinação (SNIC, 2011).

Macro Fase 04 – Clinquerização: a farinha pré-aquecida é submetida ao processo de aquecimento dentro do forno, resultando na formação do clínquer. Ao ser introduzida no forno, em uma faixa de temperatura entre 500 e 900°C, ocorre a descarbonatação do calcário, conhecida na indústria cimenteira como calcinação. A etapa final da formação

do clínquer acontece quando a temperatura atinge os 1450°C, seguida por um resfriamento rápido subsequente (Ramos, 2015).

Após a conclusão do processo de clinquerização, o clínquer é ejetado com uma temperatura superior a 1400 °C, requerendo um resfriamento imediato para estabilizar suas propriedades termodinâmicas e facilitar a manipulação posterior (Sydrião, 2018). Esse resfriamento é conduzido por meio de um dispositivo conhecido como resfriador de clínquer, onde a temperatura do clínquer cai abruptamente, alcançando em média 80°C (Belato, 2013). O clínquer é então transportado e armazenado em silos de estocagem.

Figura 37 - Conjunto do pré-aquecedor, pré-calcinador e forno rotativo de clínquer.



Fonte: Belato (2013)

Macro Fase 05 - Moagem de cimento e ensacagem: Nessa etapa, o clínquer já resfriado é transferido dos silos para moinhos de cimento, onde materiais adicionais são inseridos, em quantidades adequadas. A escória, gesso e calcário, juntos ao clínquer, fornecem a condição ideal para a produção do cimento. Após moído, o cimento é

armazenado em silos, onde posteriormente poderão ser expedidos à granel, ou ensacados em sacos de 50kg ou 25kg.

2.2.4.2. *Combustíveis alternativos utilizados para a produção do cimento*

A indústria cimenteira apresenta uma demanda energética considerável, com uma parcela significativa dos custos diretos de produção de uma fábrica destinada às despesas relacionadas a combustíveis e eletricidade (SNIC, 2021). Dentre as diversas fontes energéticas utilizadas por este setor, destacam-se o coque de petróleo, a moinha de carvão vegetal, o carvão mineral, o óleo combustível, a eletricidade e os combustíveis alternativos.

O crescente foco nas questões ambientais está se tornando cada vez mais evidente na indústria do cimento, reconhecida como uma das mais intensivas em carbono dentro do contexto industrial. Globalmente, esta indústria é responsável por aproximadamente 7% das emissões totais de dióxido de carbono.

No entanto, é importante ressaltar que a indústria cimenteira brasileira possui uma das menores intensidades de carbono do mundo por tonelada de cimento produzida. Esse desempenho é resultado das medidas implementadas ao longo de décadas visando a redução das emissões de gases de efeito estufa. A busca por fontes energéticas com menor teor de carbono em comparação com os combustíveis convencionais tem se mostrado uma ferramenta crucial para o setor na redução de suas emissões de CO₂, além de contribuir para a atenuação do passivo ambiental associado ao acúmulo de resíduos em lixões e aterros. A transição da utilização de combustíveis fósseis não renováveis para combustíveis alternativos, principalmente por meio do coprocessamento de resíduos, emergirá como a mudança principal no setor nas próximas décadas. como para o aprimoramento do monitoramento e controle ambiental (EPE, 2020).

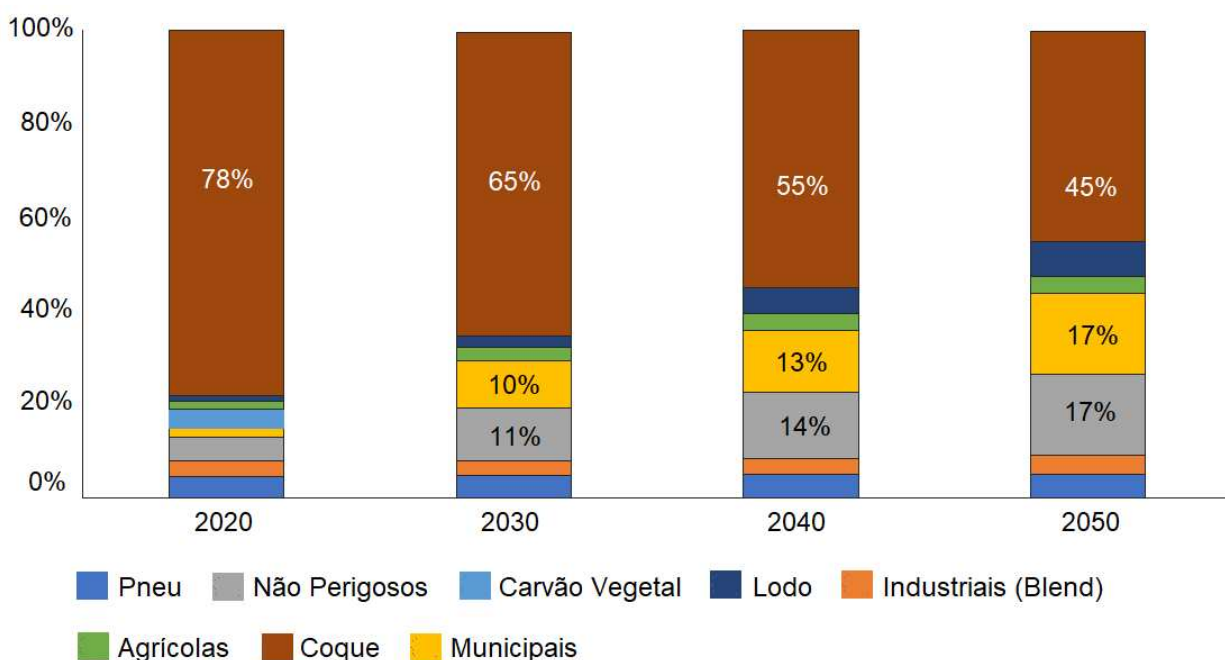
Os combustíveis alternativos, empregados na produção de cimento, provêm de diversas fontes e são coprocessados nos fornos rotativos de produção de clínquer, destacando-se os resíduos com poder calorífico superior a 11.300 kJ/kg como alternativa energética viável (Paula, 2009).

A utilização de resíduos como combustíveis alternativos na indústria cimenteira é vista como uma medida positiva do ponto de vista ambiental e uma estratégia economicamente vantajosa para reduzir os custos de produção do cimento. Essa prática permite a diminuição do consumo de outras fontes energéticas, a preservação de recursos naturais e uma abordagem ecologicamente sustentável para o tratamento desses resíduos, contribuindo para mitigar os impactos negativos sobre o meio ambiente. Assim, a indústria cimenteira é incentivada a adotar essa abordagem, uma vez que passa a obter uma receita adicional pela destinação final desses resíduos, ao invés de arcar com os custos de sua disposição (Paula, 2009).

Conforme estipulado pela Resolução CONAMA 499/2020, determinados tipos de resíduos são vetados para o coprocessamento. Essa lista inclui desde resíduos hospitalares não tratados, passando por resíduos domésticos ou urbanos não classificados, materiais radioativos e substâncias explosivas, até resíduos provenientes de fossas orgânicas, pilhas, baterias e aqueles com altos teores de cloro, metais pesados e pesticidas. A intenção principal dessa regulamentação é garantir a preservação do meio ambiente e a salvaguarda da saúde pública, evitando possíveis impactos adversos decorrentes do manejo inadequado ou da destinação imprópria desses resíduos.

Por outro lado, existem diversos materiais alternativos, como óleos hidráulicos, lubrificantes, catalisadores usados, resinas, colas, látex, pneus inservíveis, madeira, solventes, ceras, borrachas não cloradas, carvão ativado usado como filtro, borras de tintas, borras ácidas, resinas fenólicas e acrílicas, lodos de estação de tratamento de esgoto, papel, entre outros, que podem ser utilizados como combustível em fornos de cimento.

Figura 38 – Projeção da transição do consumo energético em fábricas de cimento no Brasil.



Fonte: EPE (2020)

Seguindo uma tendência global, espera-se que o setor cimenteiro brasileiro atinja níveis de cerca de 55% de utilização de combustíveis alternativos até 2050 - valores já praticados atualmente por alguns países europeus, como a Alemanha. Na Europa, a taxa média de substituição é de aproximadamente 40% (EPE, 2020).

2.2.4.3. *Conceituação sobre coprocessamento de resíduos*

O processo de fabricação do cimento envolve etapas cruciais, como a calcinação e a fusão, realizadas em fornos rotativos nas indústrias cimenteiras. Durante a calcinação, o calcário é submetido a altas temperaturas, resultando na formação do clínquer, que, por sua vez, passa por outros processos até se transformar no cimento final. No entanto, a obtenção dessas elevadas temperaturas nos fornos rotativos de clínquer requer um consumo expressivo de combustíveis, geralmente provenientes de fontes fósseis, para gerar o calor necessário (Rocha et al., 2011), como o coque de petróleo (Tocchetto, 2005).

O complexo cimenteiro enfrenta desafios relacionados à sustentabilidade devido às altas temperaturas envolvidas no processo do forno rotativo de clínquer, o que

demanda o consumo de quantidades significativas de combustíveis. Essas questões abrangem desde a garantia de suprimentos adequados de matéria-prima e energia até a conformidade com regulamentações e padrões ambientais (Rocha et al., 2011).

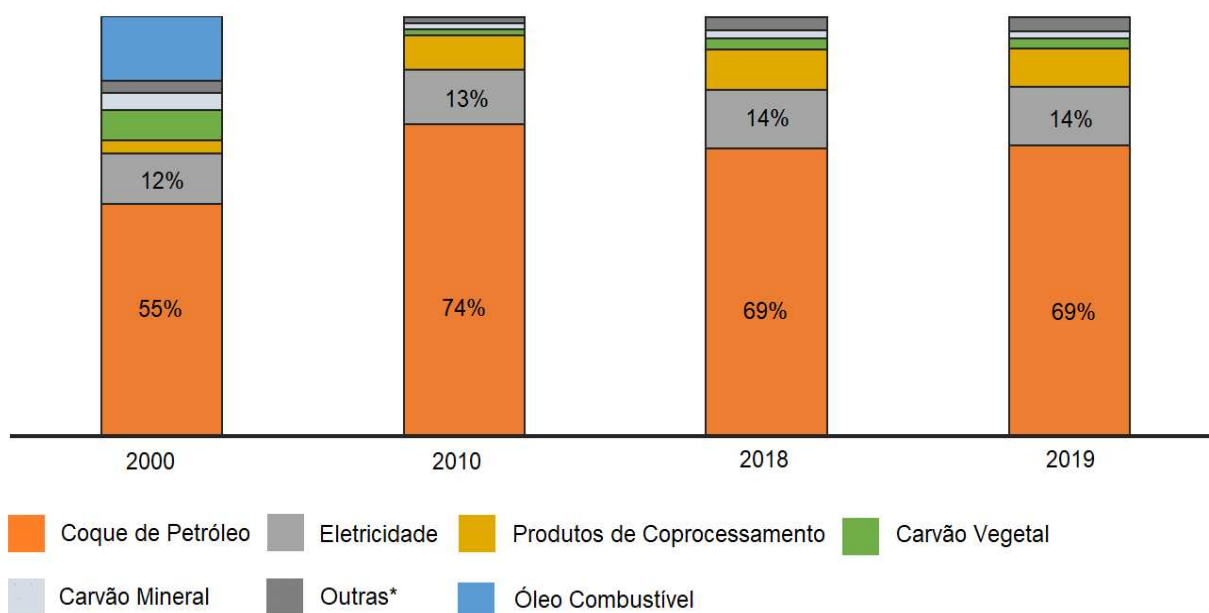
O consumo de energia térmica para a produção de cimento está diretamente relacionado com a tecnologia empregada, características químicas e mineralógicas, umidade e situação técnica da planta. Em plantas modernas, o consumo médio é abaixo de 3.000 MJ/t clínquer. Plantas antigas, anteriores aos anos 2000, apresentavam um consumo da ordem de 6.000MJ/t clínquer (Belato, 2013). Esse elevado consumo tem influência direta na emissão de gases poluentes, e consequentemente na luta global pela redução de emissão de gases que contribuem para o efeito estufa.

O histórico do coprocessamento de resíduos no Brasil remonta à década de 1990, quando essa prática começou a ser adotada como uma alternativa viável para o tratamento e destinação adequada dos resíduos sólidos gerados pelo país. Nesse período, a conscientização sobre os impactos ambientais provocados pelo descarte inadequado de resíduos estava em ascensão, impulsionando a busca por soluções mais sustentáveis.

Foi nessa conjuntura que o setor industrial brasileiro, em especial a indústria cimenteira, passou a explorar o potencial do coprocessamento de resíduos. A utilização de resíduos como substitutos de combustíveis e matérias-primas em processos industriais, notadamente na produção de cimento, mostrou-se uma opção promissora.

A partir dos anos 2000, teve início uma notável revolução energética impulsionada pelo surgimento dos combustíveis alternativos. Esses combustíveis se destacam pelo seu processo de coprocessamento de resíduos e pelo aproveitamento de biomassas.

Figura 39 - Produção de cimento: consumo final energético por fonte



Fonte: EPE (2020)

Desde o período de 1999 a 2022, já foram coprocessadas 25.813 milhões de toneladas de resíduos nos fornos de cimento. Esses números refletem a substancial redução de resíduos destinados a aterros, pois são convertidos em fontes de energia ou substituem matérias-primas anteriormente utilizadas pela indústria do cimento. Essa prática é fundamental para um gerenciamento mais sustentável e eficiente dos resíduos, contribuindo para a preservação do meio ambiente e o uso mais responsável dos recursos.

Atualmente, os combustíveis alternativos já correspondem a 15% do consumo térmico no setor e continuam a crescer diariamente. Eles têm sido amplamente adotados como substitutos do coque de petróleo, que ainda representa 80% do consumo. Além disso, 5% do consumo é proveniente do uso de moinha de carvão vegetal (EPE, 2020).

Apesar da variação na implementação do coprocessamento, influenciada pela localização geográfica das instalações da planta cimenteira, as características intrínsecas do processo de fabricação do cimento garantem sua viabilidade. Conforme indicado pelo EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau) em 2009, citado pela UNEP (2010b), diversas características fundamentais do processo garantem a utilização eficaz de combustíveis alternativos. Tais características abrangem uma série

de elementos, como a alta temperatura máxima de aproximadamente 2000°C nos fornos rotativos, a eficiente retenção de gases por cerca de 8 segundos em temperaturas superiores a 1200°C, a temperatura média do material de aproximadamente 1450°C na zona de sinterização dos fornos rotativos, a oxidação dos gases atmosféricos nos mesmos fornos e o tempo de retenção do gás no sistema de queima secundário (pré-calcinador) de mais de 2 segundos em temperaturas superiores a 850°C, o qual é ainda mais prolongado em temperaturas mais elevadas. Adicionalmente, as temperaturas dos sólidos atingem 850°C no sistema de queima secundário e/ou no pré-calcinador. Outros aspectos cruciais incluem condições uniformes de queima para acomodar variações na carga, devido às altas temperaturas e tempos de retenção suficientemente prolongados, a decomposição de poluentes orgânicos devido às altas temperaturas e tempos de retenção estendidos, a absorção de gases como HF, HCl e SO₂ pelos reagentes alcalinos, a alta capacidade de retenção de partículas de metais pesados e o curto tempo de permanência dos gases de exaustão em uma faixa de temperatura conhecida por favorecer a formação de substâncias poluentes.

Diferentemente do método de incineração de resíduos, caminho mais comum para a destinação de resíduos de pás (Jesen & Skelton, 2018), que não reutiliza as cinzas resultantes da queima como parte de um produto, a indústria cimenteira consegue aproveitar esses resíduos do processo. Isso se deve ao fato de que as cinzas contêm altas proporções de sílica e cálcio, dois elementos fundamentais na produção de cimento (Marsh, 2017). Não há, portanto, a geração de subprodutos decorrentes da queima dos resíduos, já que o material é completamente integrado à matriz do clínquer, incorporando metais pesados não voláteis na estrutura do clínquer de forma químico-mineralógica (Silva, 2015). As altas temperaturas e o extenso tempo de permanência nos fornos rotativos são fundamentais para garantir a decomposição eficaz dos compostos orgânicos.

Além disso, o ambiente naturalmente alcalino do forno promove a absorção de ácidos e óxidos, enquanto os subprodutos provenientes da queima de combustíveis convencionais e alternativos são reutilizados. Com tais características, a indústria cimenteira emerge como uma escolha privilegiada para a reciclagem energética de resíduos industriais e ambientais, conforme ressaltado por Silva et al. (2015).

De forma geral, as pesquisas indicam que o coprocessamento oferece diversas vantagens, incluindo a eliminação térmica de resíduos perigosos e ambientais, bem como a redução do consumo de combustíveis derivados do petróleo.

Apesar dos fornos de clínquer terem a capacidade técnica de utilizar até 100% de combustíveis alternativos, existem limitações práticas a serem consideradas. No processo de produção, é necessário lidar com combustíveis alternativos que possuem propriedades químicas significativamente diferentes dos combustíveis convencionais, como baixo poder calorífico, alto teor de umidade e elevada concentração de cloro e outras substâncias-traço. Esses combustíveis devem ser preparados adequadamente, onde essa preparação envolve a segregação, preparo.

Apesar dos fornos de clínquer terem a capacidade técnica de utilizar até 100% de combustíveis alternativos, existem limitações práticas a serem consideradas. No processo de produção, é necessário lidar com combustíveis alternativos que possuem propriedades químicas significativamente diferentes dos combustíveis convencionais, como baixo poder calorífico, alto teor de umidade e elevada concentração de cloro e outras substâncias-traço. Esses combustíveis devem ser preparados adequadamente, onde essa preparação envolve a segregação, preparo.

Os resíduos são inicialmente segregados, descaracterizados, combinados e triturados em proporções específicas, com o objetivo de obter uma mistura homogênea com características físico-químicas adequadas para constituir um "blend" - termo em inglês que se refere à composição ou mistura de diferentes elementos. Essa mistura, conhecida como blend, desempenha o papel crucial de fornecer a energia necessária para a formação de clínquer durante o processo de queima. Além disso, as cinzas resultantes desse processo são aproveitadas e integradas ao produto final, complementando os outros materiais utilizados (Silva, 2021).

Paralelamente às limitações práticas que dificultam uma maior substituição dos combustíveis convencionais pelos alternativos, existem também limitações de ordem política e jurídica. Para que haja uma ampliação significativa na utilização dos combustíveis alternativos, é imprescindível que a legislação local ou regional relativa à gestão de resíduos restrinja a disposição em aterros e a prática da incineração, ao

mesmo tempo que viabilize a coleta e o tratamento adequado dos resíduos controlados para sua utilização como combustíveis alternativos.

No Brasil, o coprocessamento é regulado por resoluções de nível federal, estadual e municipal, sendo os órgãos estaduais competentes responsáveis pela supervisão e pelo processo de concessão de licenças para essa prática, desempenhando um papel crucial na manutenção das práticas adequadas e da rigidez necessária para o desempenho da atividade.

A Resolução CONAMA nº 499/20, principal documento federal que regulamenta o coprocessamento, estabelece diretrizes específicas, procedimentos e critérios técnicos para a obtenção da licença ambiental destinada a essa prática em fornos rotativos de clínquer na produção de cimento. De acordo com suas disposições, os resíduos que possuem poder calorífico ou podem substituir matérias-primas no processo de produção do clínquer são passíveis de serem submetidos ao coprocessamento. No entanto, existem restrições para alguns materiais devido aos níveis de determinadas substâncias e a fatores que inviabilizam a utilização de certos materiais, pois podem emitir resíduos tóxicos.

Essa resolução estabelece as etapas necessárias para o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para o coprocessamento de resíduos. Nessa resolução, são descritas as seguintes fases:

- I - Estudo de Viabilidade de Queima - EVQ;
- II - Plano de Teste Preliminar;
- III - Relatório de Teste Preliminar;
- IV - Plano de Teste de Queima - PTQ;
- V - Relatório de Teste de Queima e;
- VI - Análise de Risco.

Essas etapas abrangem a verificação, monitoramento e controle necessários para garantir a adequação do processo de licenciamento, visando minimizar ao máximo os impactos ambientais. Um aspecto crucial desse processo é a seleção dos Principais Compostos Orgânicos Perigosos (PCOPs) a serem monitorados durante o teste de

queima nos fornos rotativos de clínquer. Essa seleção é baseada na dificuldade de destruição, toxicidade e concentração dos compostos no resíduo.

Durante o teste de queima, os PCOPs são analisados tanto no resíduo aprovado quanto nos gases efluentes, visando avaliar a eficiência de destruição, a qual deve ser de pelo menos 99,99%. Essa análise evidencia a eficiência global do processo, indicando se a destruição do resíduo será eficiente dentro das condições estabelecidas.

Antes de iniciar os testes, é fundamental verificar o correto funcionamento do sistema de intertravamento, que desempenha um papel crucial no coprocessamento. Esse sistema tem a função de interromper a alimentação de resíduos caso algum monitoramento contínuo detecte valores acima dos limites estabelecidos nos equipamentos, conforme a legislação vigente.

Os monitoramentos contínuos abrangem diversas variáveis críticas, incluindo os níveis de CO (monóxido de carbono), O₂ (oxigênio), temperatura e pressão do sistema de forno, além da taxa de alimentação de resíduos e parâmetros operacionais dos Equipamentos de Controle de Poluição (ECPs). Essas etapas garantem o cumprimento das normas ambientais e a eficácia do processo de licenciamento.

O sistema de intertravamento deve ser devidamente ajustado para interromper a alimentação de resíduos em situações específicas. Isso inclui eventos como emissões acima dos limites estabelecidos pela resolução, quedas anormais de temperatura, pressão positiva no forno, falta de energia elétrica ou queda abrupta de tensão, redução do teor de O₂ no sistema, mau funcionamento dos monitores e registradores de temperatura, O₂, CO ou THC (total de hidrocarbonetos), interrupção do funcionamento dos ECPs e temperatura de entrada do precipitador eletrostático superior a 200°C.

Essas medidas visam garantir a segurança e o adequado desempenho do processo de coprocessamento, assegurando que os resíduos sejam devidamente destruídos nos fornos de clínquer, em conformidade com os padrões ambientais estabelecidos pela resolução CONAMA nº 499/20. Além disso, monitoramentos contínuos são estabelecidos para acompanhar a efetividade e o desempenho ambiental.

No ano de 2022, foram promulgados novos instrumentos regulatórios de grande importância para o gerenciamento de resíduos sólidos no país. O Decreto Nº 11.043/2022 instituiu o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares, visando a redução da

disposição de resíduos em aterros por meio de estratégias como a promoção da reciclagem, recuperação energética e tratamento biológico, e o Decreto Nº 10.936/2022 instituído com o objetivo de modernizar e desburocratizar os procedimentos relativos à implementação efetiva da PNRS. Uma de suas principais novidades foi a criação do Programa Nacional de Logística Reversa, que será coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e que funcionará de modo integrado ao SINIR (Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos) e ao PLANARES (Plano Nacional de Resíduos Sólidos). Combinadas, essas medidas têm como meta alcançar uma taxa de 48,1% até 2040.

Entretanto, é importante considerar diversas limitações práticas, políticas, jurídicas e logísticas relacionadas a essas medidas. Por exemplo, as propriedades dos combustíveis alternativos no processo produtivo podem apresentar limitações práticas. Além disso, questões políticas e jurídicas podem afetar a substituição de combustíveis convencionais por alternativos. Também existem limitações logísticas para o transporte de objetos com grandes dimensões, como no caso das pás eólicas. Essas considerações são essenciais para o efetivo cumprimento e implementação dos regulamentos estabelecidos.

2.2.4.4. *Coprocessamento de fibras de pás eólicas*

Os resíduos gerados pelos parques eólicos são classificados como inertes, pertencendo à classe II-H de acordo com a norma ABNT NBR 10.004/2004. Apesar de serem passíveis de reciclagem, muitas vezes esses resíduos acabam sendo descartados em aterros sanitários devido à complexidade do processo de reciclagem, o que acaba contribuindo para o esgotamento desses recursos (Vieira e Lebrão, 2018). O material compósito é categorizado como resíduo industrial devido à sua origem, caracterizado como não perigoso e não inerte, devido às suas propriedades químicas que incluem reatividade e potencial de contaminação (Kersting, 2019).

Frente a este desafio, em 2016 foi firmado um compromisso para instaurar um sistema de logística reversa específico para os materiais compósitos empregados, conhecido como Programa Compolife (Gestão Inteligente da Destinação de Resíduos

Pós-Consumo). Esse programa surgiu como uma iniciativa conjunta da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná (SEMA-PR), do Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e da Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO). Como parte desse acordo, as empresas envolvidas devem conceber alternativas para o tratamento e disposição adequada dos resíduos, visando cumprir com os requisitos do sistema de logística reversa. Tendências globais, embasadas na Diretiva Europeia 2000/53/EC, a qual regulamenta o descarte de veículos no término de sua vida útil, também oferecem diretrizes essenciais para a formulação de novas estratégias voltadas à recuperação de materiais.

Com o grande número de pás chegando ao fim de vida útil, o coprocessamento se torna uma solução vantajosa, pois o material residual (fibra triturada) pode substituir as matérias-primas no processo de fabricação de cimento. Isso contribui para a incineração e reduz o uso de combustíveis fósseis, como carvão ou gás, no processo.

O coprocessamento de cimento é, atualmente, a alternativa mais econômica, escalável e comercialmente viável para a reciclagem de resíduos de pás eólicas. No entanto, essa opção ainda está abaixo na hierarquia de gerenciamento de resíduos devido ao *downcycling* da fibra reciclada, como ilustrado na Figura 18. Essa técnica teve origem na Alemanha e vem sendo desenvolvida por meio de parcerias com fabricantes e empresas de reciclagem, como GE, Veolia North America, Holcim, RiverCap, Fiberline Composites e Vestas. A tecnologia oferece uma rota robusta e escalável para o tratamento de resíduos compósitos, especialmente pás de turbinas eólicas em fim de vida útil. As pás podem ser quebradas e trituradas próximo ao local de desmontagem, o que facilita o transporte para a instalação de processamento (Suschem, 2018).

Na Alemanha, em 2009, foi promulgada uma disposição legal proibindo a deposição direta em aterros de resíduos com teor orgânico total superior a 5%. Essa regulamentação tem implicações significativas, especialmente para os resíduos gerados pela indústria eólica, como as pás dos aerogeradores, que contêm elementos orgânicos, como a resina que adere às fibras de vidro, tornando sua disposição em aterros inviável. Além da questão ambiental, essa proibição também acarreta um aumento nos custos associados ao tratamento e disposição desses resíduos. Por exemplo, uma fábrica de coprocessamento de cimento na Alemanha cobra aproximadamente 150 EUR por

tonelada para receber as pás dos aerogeradores. No entanto, de acordo com um levantamento realizado pela WindEurope, os custos da reciclagem mecânica dessas pás nos Países Baixos variam entre 500 e 1.000 EUR por tonelada, incluindo operações como pré-corte, transporte e processamento no local. É importante notar que os custos específicos da reciclagem mecânica podem oscilar entre 150 e 300 EUR por tonelada, e a capacidade atual de processamento é de 30.000 toneladas de resíduos compósitos por ano, de acordo com dados da WindEurope de 2020. Esses custos mais elevados e as complexidades associadas à reciclagem tornam os processos de tratamento e disposição dos resíduos das pás dos aerogeradores menos atrativos e representam desafios adicionais para a indústria eólica e para a gestão de resíduos como um todo.

Nos EUA, a solução é mais difundida com uma rede relatada de até 70 fornos de cimento capazes de receber compósitos resíduos de pás de turbinas eólicas, quando pré-processados para um determinado conjunto de condições (ou seja, tamanho, poder calorífico, teor de cloro e parâmetros semelhantes) (Beauson et al., 2022).

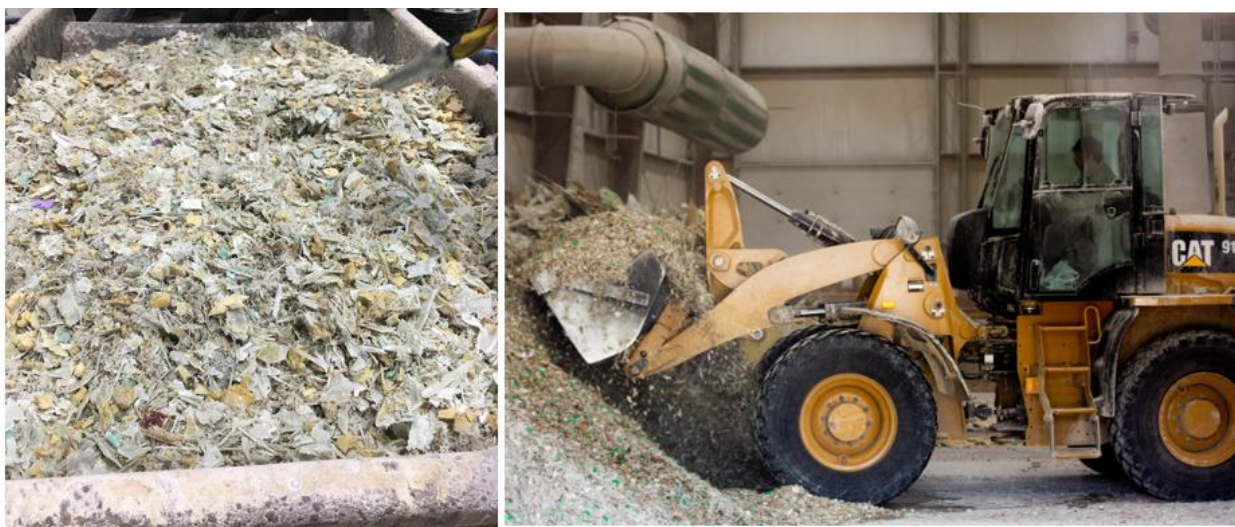
Figura 40 – Corte, trituração e transporte.



Fonte: Kosciulek e Nixdorf (2021)

Com as seções trituradas, o material é acrescentado a um tipo de combustível chamado de Combustível Sólido Recuperado (SRF), produzido por meio da trituração e desidratação de resíduos sólidos, como, por exemplo, resíduos de construções e demolições, além de resíduos comerciais e industriais. Esse é um tipo alternativo de combustível obtido de resíduos secos variados que são complicados de separar e, de outra forma, seriam encaminhados para aterros sanitários. O SRF é utilizado como uma alternativa de combustível fóssil nas indústrias de cimento e energia em toda a Europa (Nagle et al., 2020). Devido às suas propriedades, é necessário mantê-lo sob vigilância, isolado do meio ambiente, armazenado em tambores dentro de uma instalação de gestão de resíduos industriais, representando um custo fixo contínuo para quem o gera (Kersting, 2019).

Figura 41 – Resíduo de pá triturada e armazenamento de resíduos triturados provenientes de pás eólicas.



Fonte: GE News (2020) Farzan (2022)

Durante o coprocessamento, pás trituradas de turbinas eólicas são usadas como novos materiais na produção de cimento, parcialmente substituição de combustíveis fósseis e de matérias-primas. Especificamente, a fibra de vidro é reciclada como um

material componente do clínquer de cimento e a matriz polimérica é queimada como combustível para a produção de cimento. A rota do forno de cimento é considerada a forma ideal para reciclagem de resíduos das pás eólicas, proporcionando recuperação de material e energia; tem um fornecimento simples cadeia e é rentável e eficiente (Karavida; Peponi, 2023).

Figura 42 – Fábrica de cimento e produção de clínquer.



Fonte Kosciulek e Nixdorf (2021)

A energia fornecida pela resina e pelos componentes do núcleo da pá eólica reduz a quantidade de carvão necessária para o forno de cimento convencional. Além disso, as cinzas de fibra de vidro (sílica) contribuem para a fração de areia, enquanto o Óxido de Cálcio (CaO) presente na pá eólica desempenha um papel importante como agente de pega no cimento Portland, sendo uma alternativa menos intensiva em carbono do que a produção convencional de CaO (a produção convencional de CaO é intensiva em carbono). (Aliancys Europe, 2016) (Francis, 2019) (GE News, 2020).

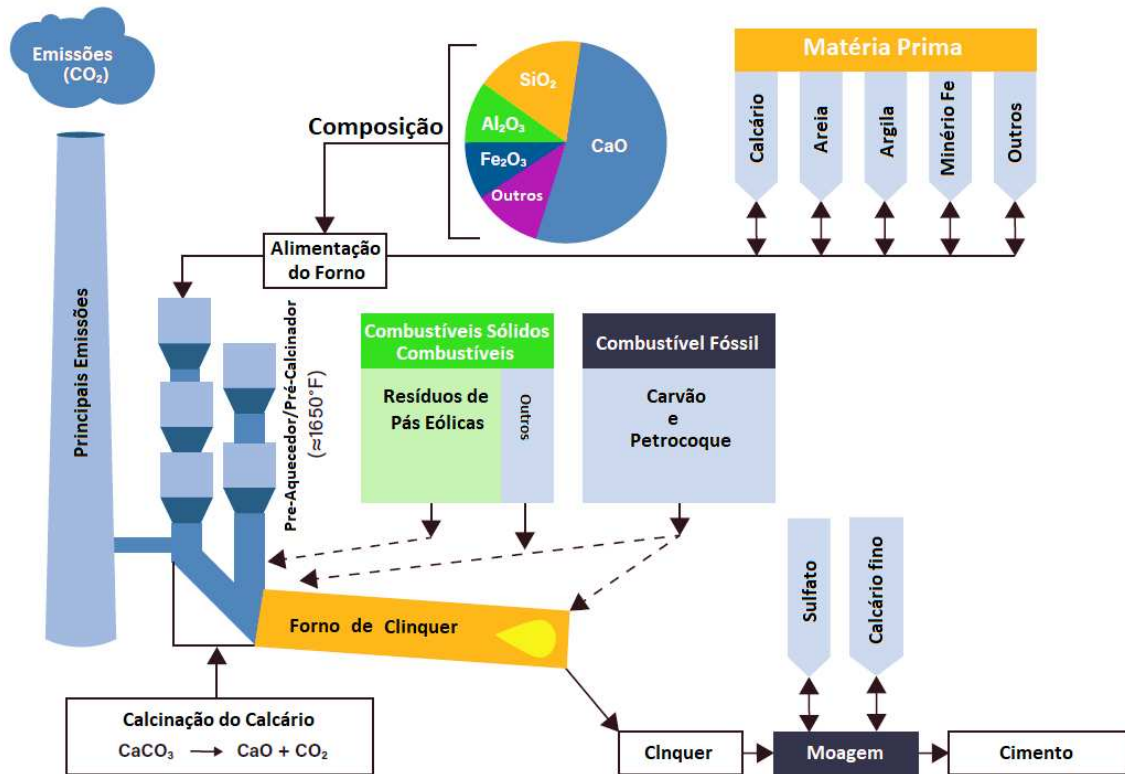
De acordo com Liu et al. (2019), ao reciclar 1 tonelada de resíduos de pás eólicas, pode-se substituir 600kg de carvão, além disso, o uso de material proveniente de pás eólicas em processos produtivos de cimento pode substituir uma quantidade de material bruto de clínquer (Hanes et al., 2021; Nagle et al., 2020).

Além disso, a Electric Power Research Institute (EPRI) sugere que uma tonelada de material de pá de turbina eólica pode substituir, 0,3 tonelada de sílica e 0,27 tonelada de calcário na fabricação de cimento. Segundo o estudo, essa substituição acarretaria a diminuição de cerca de 2% das emissões de dióxido de carbono decorrentes do processo do forno de cimento. Se o material da pá da turbina eólica fosse adotado para substituir

30% do carvão convencionalmente utilizado, os resultados seriam ainda mais notáveis, evitando aproximadamente 2% das emissões de CO₂ do forno de cimento. Adicionalmente, em relação aos compósitos constituídos de preenchimento e resinas oriundos de fontes biológicas (bioderivados), aproximadamente 14% das emissões de CO₂ geradas pela produção de cimento seriam transferidas de fontes fósseis para fontes biogênicas. Essas constatações destacam a relevância e o potencial do aproveitamento simultâneo de pás de turbinas eólicas como uma estratégia sustentável para a indústria cimenteira, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e fomentando a adoção de materiais mais ecologicamente amigáveis em sua manufatura.

Mais de 65% do peso da pá eólica substitui a areia, argila e outras matérias-primas que seriam adicionadas ao forno para criar o cimento, enquanto cerca de 28% do peso da pá substitui o carvão no processo de aquecimento. Uma análise realizada pela Quantis U.S. mostrou que isso pode ajudar os fabricantes de cimento a reduzir as emissões de CO₂ em 27% em comparação com o processo tradicional e a diminuir o consumo de água em 13%. (Karidis, 2021) (Veolia, 2020).

Figura 43 – Fluxo de coprocessamento com incremento de resíduo proveniente de pás eólicas.



Fonte: Adaptado de ACP (2023)

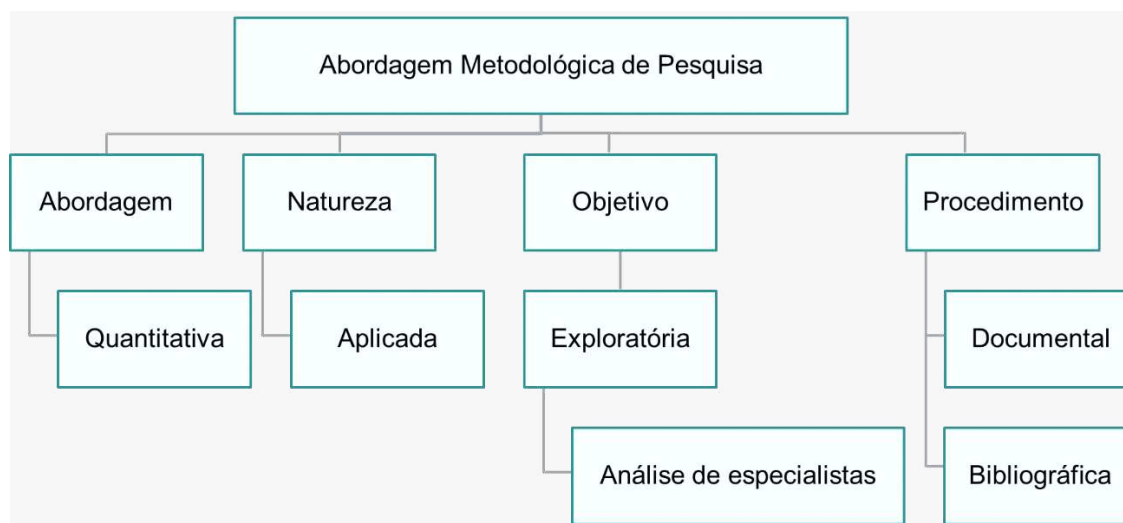
Um dos poucos desafios que pode ser encontrado com a substituição da matéria-prima por resíduos de pás eólicas, é a presença de boro nos compostos, o que pode retardar o tempo de cura do cimento (Pickering, 2006). A composição do material da pá também precisa ser conhecida de antemão, onde deve ser realizada uma classificação com base no tipo de resina usada (Beauson et al., 2022).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é descrita a metodologia de pesquisa adotada neste estudo, abordando as estruturas de pesquisa relacionadas aos temas investigados. O estudo foi fundamentado em três pilares de pesquisa. O primeiro consistiu em uma revisão bibliográfica da literatura, com o objetivo de ter fundamentações que auxiliasse na projeção da quantidade de pás eólicas em toneladas a serem descartadas, o potencial de resíduos provenientes destas, demonstrando os riscos e oportunidades inerentes ao descomissionamento desses ativos, além de levantar o quantitativo de unidades coprocessadoras no Brasil e capacidade de coprocessamento, validando oportunidades de utilização de materiais compósitos provenientes de pás eólicas em fim de vida útil como fonte energética para a produção de cimento no Brasil. O segundo pilar consistiu em realizar pesquisas documentais, de modo a complementar a pesquisa bibliográfica.

A partir do conjunto de informações, foi desenvolvido um questionário semiestruturado por meio de análise de conteúdo, sendo aplicado a especialistas envolvidos na gestão de resíduos de pás de turbinas eólicas e coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento.

Figura 44 – Ilustração da configuração metodológica da pesquisa.



Fonte: Autor

3.1. Pesquisa bibliográfica e documental

A pesquisa bibliográfica é um método utilizado para investigar um problema, empregando o conhecimento existente nas teorias publicadas em livros ou obras similares. Nessa abordagem, o investigador busca compreender ou elucidar o problema em questão, examinando e analisando as teorias disponíveis na área de estudo (Köche, 2011).

Por sua vez, a revisão de literatura é descrita como um processo sistemático de coleta e síntese das pesquisas existentes (Treanfield, Denyer & Smart, 2003). Em relação à revisão sistemática, este método é usado para identificar e avaliar de forma crítica as pesquisas relevantes, além de coletar e analisar os dados provenientes dessas pesquisas (Liberati et al., 2009). Seu principal objetivo é identificar todas as evidências empíricas que satisfaçam critérios específicos, com o intuito de responder às questões de pesquisa ou estabelecer hipóteses (Snyser, 2019).

Alguns autores argumentam que pesquisa documental e pesquisa bibliográfica são termos intercambiáveis. Ambas têm como foco o documento como objeto de estudo. Entretanto, o conceito de documento transcende textos escritos ou impressos. Documento, enquanto fonte de pesquisa, abrange tanto mídias escritas como não escritas, como filmes, vídeos, slides, fotografias ou pôsteres (Sá-Silva et al., 2009). Esses documentos desempenham o papel de fontes informativas, fornecendo referências e esclarecimentos que são utilizados para esclarecer questões específicas e atuar como evidências para outras, de acordo com os interesses e necessidades do pesquisador (Figueiredo, 2007).

Nesta direção, buscou-se dois parâmetros para o aprofundamento deste estudo:

- Estimar as quantidades de resíduos a serem produzidas pelos parques eólicos do Brasil até o ano de 2035, com base na distribuição das idades dos parques eólicos brasileiros, considerando as evoluções nas dimensões das turbinas eólicas ao longo do tempo e os pesos estimados das pás eólicas.

- Quantificar o número de instalações de produção de cimento no Brasil que estão capacitadas para receber os resíduos provenientes do descomissionamento de pás

eólicas, com o objetivo de explorar oportunidades para a utilização de materiais compósitos como fonte de energia na produção de cimento. Além disso, elaborar uma análise das restrições logísticas com base na legislação brasileira, uma vez que os parques eólicos estão geralmente localizados em áreas rurais remotas, frequentemente de difícil acesso.

A seguir estão representados os resultados da revisão bibliográfica e documental desenvolvida para este estudo.

3.1.1. Estimativa da quantidade de resíduos gerados pelo descomissionamento de pás eólicas

O Brasil é internacionalmente reconhecido por possuir um amplo potencial eólico, caracterizado por velocidades de vento que excedem 7m/s, especialmente na região Nordeste (Amarante et al., 2001). Essas condições favoráveis estabelecem o país como uma opção proeminente para o desenvolvimento da energia eólica, atraindo investimentos e projetos voltados para essa fonte renovável de energia. A vastidão territorial brasileira proporciona uma grande diversidade de locais adequados para a instalação de parques eólicos, contribuindo para a expansão dessa fonte limpa e sustentável de energia elétrica. Além disso, o potencial eólico do Brasil não se restringe apenas à região Nordeste, podendo ser explorado em diversas outras áreas do país, como o Sul e o Sudeste, onde também são registradas velocidades de vento significativas. A Tabela 2 fornece detalhes sobre o potencial elétrico estimado em todo o território brasileiro, destacando as oportunidades existentes para a expansão desse importante segmento da matriz energética do país.

Em 1992, o Brasil testemunhou um marco importante com a inauguração de seu primeiro gerador eólico pioneiro em Fernando de Noronha, que apresentava uma capacidade de geração de 75 kW (Pinto et al., 2017). Posteriormente, outra torre eólica foi instalada, embora, infelizmente, no momento atual, nenhuma delas esteja gerando energia. Em 2001, essas torres eólicas representavam 25% da energia gerada na ilha (WWF, 2021).

Tabela 2 - Potencial eólico-elétrico estimado do Brasil

Total Brasil estimado			
Vento (m/s)	Área (Cumulativa) [km ²]	Potência instalada (GW)	Energia residual (TWh/ano)
>6	667391	1334,78	1711,62
>6.5	231746	463,49	739,24
>7	71735	143,47	272,2
>7.5	21676	43,35	100,3
>8	6679	13,36	35,93
>8.5	1775	3,55	10,67

Fonte: Adaptado de Atlas do Potencial Eólico Brasileiro pelo Cresesb/Cepel (2001)

Apesar das instalações de torres eólicas no Nordeste terem iniciado em 1992, com a colocação de uma turbina no arquipélago de Fernando de Noronha, a atividade ganhou impulso e reconhecimento verdadeiros após o lançamento do primeiro Atlas do Potencial Eólico Brasileiro pelo Cresesb/Cepel. Esse atlas estimou o potencial nacional em impressionantes 143 GW e destacou a região Nordeste como a área com o maior potencial eólico no Brasil, estimado em 75,0 GW.

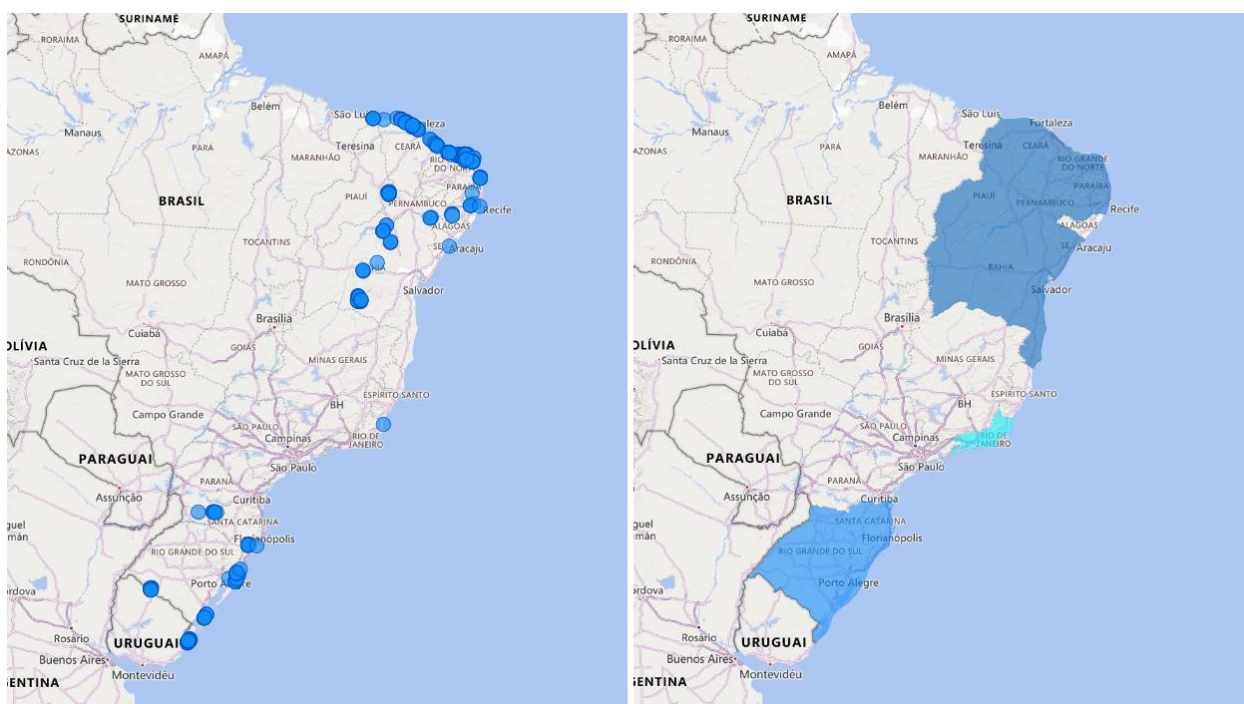
Dez anos após sua criação, o governo implementou o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) por meio da lei 10.438/2002. O principal objetivo desse programa era aumentar a participação da energia elétrica gerada por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, focados em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, no Sistema Elétrico Interligado Nacional. Através de leilões, o PROINFA contratou aproximadamente 1.420 MW em empreendimentos eólicos com contratos de 20 anos. O primeiro complexo eólico, localizado em Osório-RS, iniciou suas operações em 2006, com uma capacidade instalada de 50 MW.

Segundo dados de 2023, o Brasil já conta com a instalação de 890 parques eólicos distribuídos em 12 estados, somando uma capacidade instalada de 25,04 gigawatts (GW) em operação comercial, beneficiando aproximadamente 108,7 milhões de habitantes. A Região Nordeste abriga a maior parte desse número, com 85% dos parques eólicos concentrados na área. Projetando para o futuro, é estimado que até 2028, o país alcance uma capacidade instalada de energia eólica de 44,78 GW, o que representará 13,2% da

matriz energética nacional. Atualmente, a energia eólica já contribui com 20% da geração total de energia demandada pelo país (Agência Brasil, 2023).

As pás das turbinas eólicas que entrarão no fluxo de resíduos nos próximos 20 anos virão predominantemente de turbinas que já estão em operação. O banco de dados que detém informações sobre projetos e instalações de parques eólicos no Brasil (Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA) fornece uma lista abrangente de parques em operação em todo o país, com os respectivos Códigos Único de Empreendimentos de Geração (CEG). Em setembro de 2023, considerando que os leilões geralmente estabelecem contratos de 20 anos, período semelhante ao tempo estimado para projetos de turbinas eólicas, a ANEEL indica que pelo menos 305 empreendimentos vinculados ao PROINFA atingirão esse marco até 2035.

Figura 45 – Parques eólicos em operação entre os anos de 2002 e 2035.

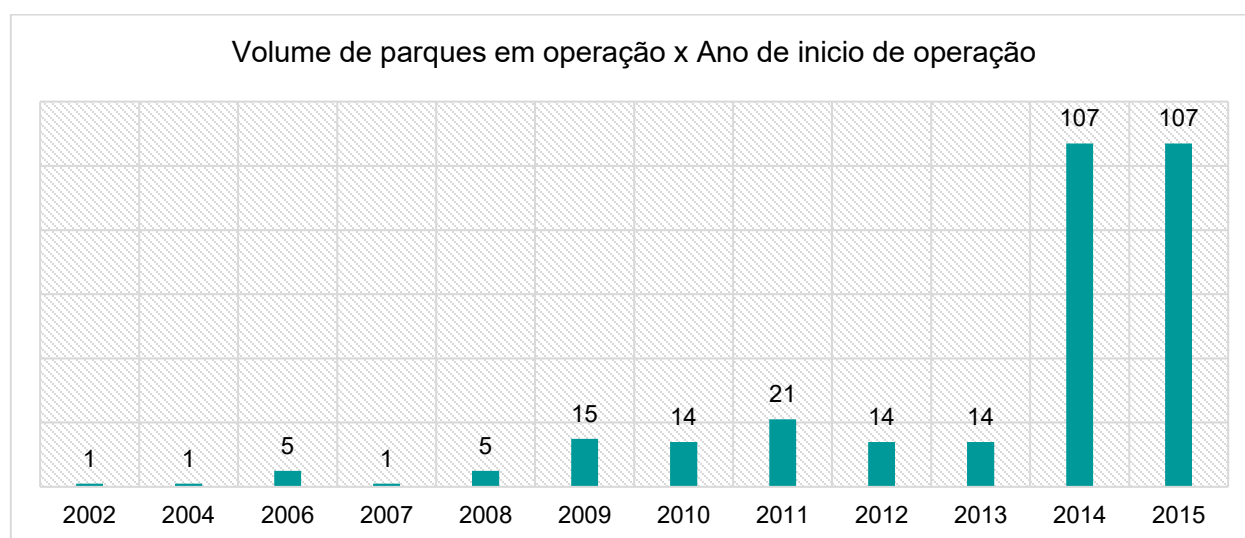


Fonte: Autor (Base de dados: Sistema de Informações de Geração ANEEL; Software: Power BI)

Atualmente, esses empreendimentos representam 29,14% da capacidade total instalada em operação no Brasil em 2023, o que equivale a 7.657.549,50 kW. O banco

de dados inclui localização, ano de instalação e capacidade de geração, não dando detalhes do diâmetro do rotor ou altura do cubo por modelo de turbina, informações poderiam direcionar a uma estimativa mais assertiva da quantidade de resíduos provenientes de pás eólicas, uma vez que a potência de geração está diretamente ligada ao tamanho e design das pás eólicas.

Figura 46 – Cenário de parques que entraram em operação entre os anos de 2002 e 2015.

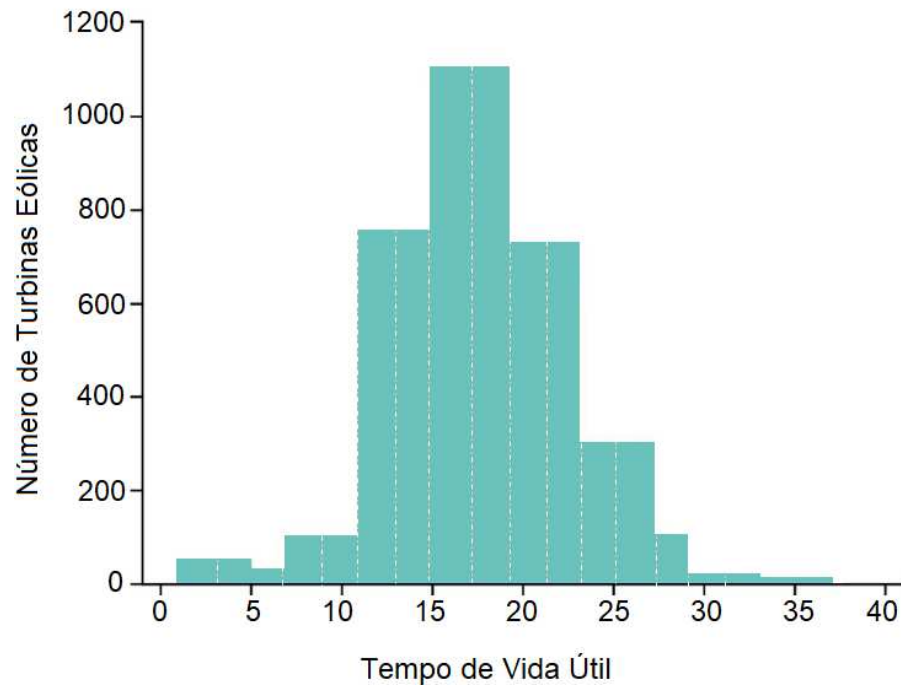


Fonte: Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA

Partindo da premissa de que a vida útil média das pás da turbina eólica é de 20 anos, conforme estabelecido pela IEC 61400, este estudo projeta-se até o ano de 2035. No entanto, é importante salientar que muitas turbinas ainda não alcançaram o término de sua vida útil, o que introduz incertezas sobre sua durabilidade real. Estudos econômicos sobre decisões de repotenciação sugerem que, para turbinas modernas, um período de 20-25 anos pode ser considerado adequado (Lantz et al., 2013). Contudo, é válido notar que a vida útil das pás pode ser encurtada devido a falhas decorrentes de defeitos de material e fabricação, ou mesmo por causas ambientais como raios, ou ainda podem ser substituídas durante processos de repotenciação antes de completarem 20 anos de serviço. Por esse motivo, considera-se como 20 anos para fins de estimativa da

quantidade de material compósito gerado para descarte. Como exemplo, a seguir é exposta uma distribuição da longevidade de turbinas eólicas (em anos) na Dinamarca.

Figura 47 - Distribuição histórica de fim de vida útil de turbinas eólicas



Fonte: Adaptado de Tazi *et al.*, 2019

As relações entre massa e capacidade das pás relatadas por Liu e Barlow (2017) são usadas para converter as capacidades de geração eólica presentes e futuras em quantidades materiais. A massa de material compósito da pá por megawatt de capacidade instalada é calculada para cada turbina com base em sua capacidade nominal, conforme detalhado na Tabela 3. Os valores de Liu e Barlow para outras fontes de resíduos de pás também são adotados: supõe-se que substituições de pás representam 3% da massa de pás instaladas, e que essas ocorrerão no sexto ano de operações, e presume-se que 5% das pás serão substituídas devido à repotenciação no décimo sexto ano de operação.

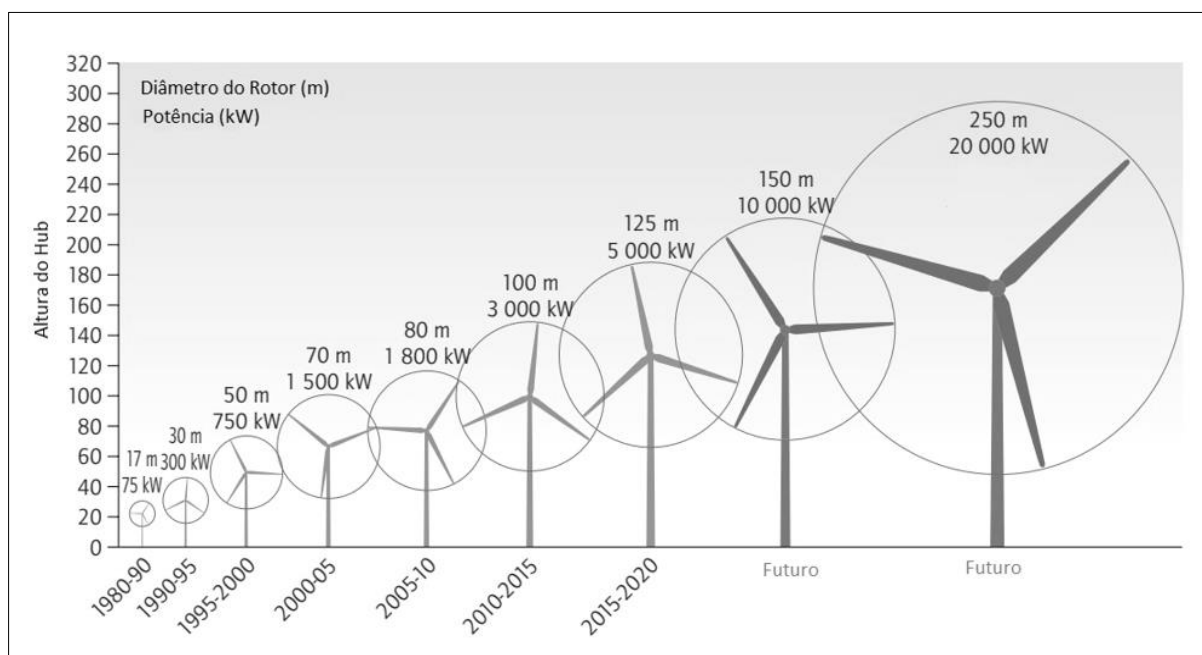
Tabela 3 – Massa da pá eólica em toneladas métricas por megawatt de capacidade nominal.

Capacidade Nominal da Turbina (MW)	Massa Total da Pá (kg/kW)
≤1	8.43
1–1.5	12.37
1.5–2	13.34
2–5	13.41
≥5	12.58

Fonte: Adaptado de Liu e Barlow (2017)

Para estimar a quantidade de materiais, foram realizadas estimativas do diâmetro do rotor com base nas evoluções de projetos, como representado na Figura 48. Para gerar esta estimativa, assumimos que cada turbina possui três pás com comprimento igual à metade do diâmetro do rotor.

Figura 48 – Evolução histórica de tamanho de turbinas eólicas.



Fonte: Adaptado de IEA (2013)

Ao longo dos anos, houve um aumento significativo no diâmetro do rotor das turbinas, que representa a amplitude do círculo percorrido pelas pás rotativas. Esse

incremento possibilita que as turbinas eólicas abranjam uma área maior, capturando mais vento e gerando mais eletricidade. Turbinas com pás mais longas têm uma capacidade superior de capturar o vento disponível, mesmo em regiões onde o vento é menos intenso. Isso amplia as oportunidades para o desenvolvimento da energia eólica em todo o país, ao permitir a captura de vento em velocidades mais baixas. Como resultado dessa tendência, a área percorrida pelo rotor aumentou aproximadamente 645% desde 1998-1999 (Hartman, 2022).

Com base na progressão de dimensões das turbinas eólicas ilustradas na Figura 48, adotou-se as referências demonstradas na Tabela 4 como base para o cálculo estimado da quantidade de resíduos gerados por pás eólicas descomissionadas.

Tabela 4 – Distribuição de diâmetro do rotor e capacidade nominal de turbinas por ano.

Ano	Diâmetro do Rotor (m)	Capacidade Nominal (kW)
1995-2000	50	750
2001-2005	70	1500
2006-2010	80	1800
2011-2015	125	3000

Fonte: Adaptado de IEA (2013)

A partir de características das dimensões dos rotores ao longo dos anos, capacidade nominal e correlação de potência e peso da pá, é possível realizar estimativas da quantidade de material compósito a descartar ao fim do período de operação desses ativos.

3.1.2. Quantificação de unidades de cimento no Brasil habilitadas a coprocessar resíduos em fornos de clínquer

A indústria cimenteira no país está continuamente inovando para lidar com os desafios dos resíduos, buscando soluções que tragam benefícios socioeconômicos e de saúde pública. Destacando-se como um exemplo notável de economia circular, essa indústria transforma resíduos em oportunidades, reintegrando-os em seu processo produtivo por meio do coprocessamento. Com aproximadamente 3 milhões de toneladas

de resíduos convertidas em recursos valiosos, a indústria cimenteira adota práticas sustentáveis, evitando o descarte em aterros ou locais inadequados e promovendo um ciclo mais eficiente e ambientalmente responsável.

Atualmente, o Brasil conta com 93 fábricas de cimento distribuídas pelas cinco regiões do país. Dentre essas, 54 são classificadas como fábricas integradas, equipadas com fornos de clínquer, enquanto as outras 39 são fábricas exclusivamente de moagem de cimento, dependendo do fornecimento logístico do clínquer pré-produzido de fábricas integradas (ABCP, 2022).

A abordagem metodológica adotada teve como objetivo primordial ressaltar a importância da economia circular como um modelo fundamental, onde os resíduos são convertidos em oportunidades através do coprocessamento, reintegrando-os ao ciclo produtivo da indústria. Para realizar a quantificação das instalações de produção de cimento no Brasil que possuem a infraestrutura necessária para o coprocessamento de resíduos, foram empregados dados do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR+). Esse conjunto de informações possibilitou uma análise mais detalhada, contemplando aspectos como a localização geográfica das fábricas, sua capacidade de coprocessamento, o potencial de recuperação energética oferecido por essas instalações e o alcance geográfico delas. Esses dados desempenharam um papel crucial ao orientar e fundamentar a pesquisa, permitindo uma análise abrangente e minuciosa do cenário atual das práticas de coprocessamento na indústria cimenteira brasileira e abrindo caminho para discutir a possibilidade de adaptação para o recebimento de resíduos provenientes de pás eólicas.

Através das coordenadas geográficas, também foi realizada a plotagem das unidades de coprocessamento em um mapa, como também dos parques eólicos. O objetivo foi avaliar a distância entre as unidades geradoras de resíduos (parques eólicos) e as unidades de processamento de resíduos (fábricas de cimento), de modo a obter informações sobre o atendimento ao decreto 72 e 30 da Lei nº 12.305 de 2010, qual definem que resíduos perigosos que exibem propriedades inflamáveis devem ser necessariamente encaminhados para o processo de recuperação de energia, desde que haja instalações licenciadas situadas num raio de até 150 quilômetros da fonte dos resíduos. Em caso de a distância ser excedida, não há obrigatoriedade, havendo apenas

uma recomendação para que os resíduos sejam encaminhados para recuperação energética.

3.2. Pesquisa exploratória

O objetivo da pesquisa exploratória é desenvolver compreensão sobre um tema ainda pouco examinado, concentrando-se nas particularidades de uma amostra específica (Gil, 2019). Nesse tipo de pesquisa, não se enfoca na análise da interdependência entre variáveis, mas sim na identificação e descrição da presença das variáveis, seja de forma quantitativa ou qualitativa (Köche, 2011), visando aumentar a compreensão de um fenômeno ainda pouco conhecido ou de um problema de pesquisa ainda não perfeitamente delineado. Esse tipo de pesquisa é considerado uma forma de pesquisa prospectiva (Appolinário, 2011), e as informações podem surgir de maneira mais espontânea, e as respostas não estão limitadas por um formato padronizado de opções (Manzini, 1990/1991).

O estudo adotou uma abordagem de pesquisa exploratória em um questionário semiestruturado, utilizando uma metodologia qualitativa para investigar os diversos aspectos relacionados às possíveis destinações das pás de turbinas eólicas quando chegam ao final de sua vida útil. Especificamente, o foco foi na avaliação da viabilidade de utilizar essas pás como fonte de energia nos processos de produção de cimento.

Um questionário semiestruturado se caracteriza por questionamentos fundamentais embasados em teorias e suposições que se relacionam ao assunto da pesquisa. Essas perguntas podem originar novas suposições a partir das respostas dos entrevistados (Triviños, 1987), e podem ser desenhadas através de cinco atributos distintos que englobam as características gerais do estudo, o método de coleta de dados empregado, o objeto de estudo em si, a interpretação dos resultados obtidos e, por fim, a questão da generalização dos achados. Esses elementos fundamentais delineiam a natureza e o processo da pesquisa qualitativa, destacando sua abordagem particular em relação à compreensão e análise dos fenômenos estudados (Günther, 2006).

3.2.1. Avaliação de tema por especialistas

A aplicação dos resíduos provenientes de pás eólicas como fonte de energia em instalações de coprocessamento ainda carece de exploração no contexto nacional, evidenciado pela escassez de estudos e da falta de iniciativas por parte de empresas tanto privadas quanto públicas, uma disparidade notável quando comparada à maior adoção observada em nações europeias e nos Estados Unidos.

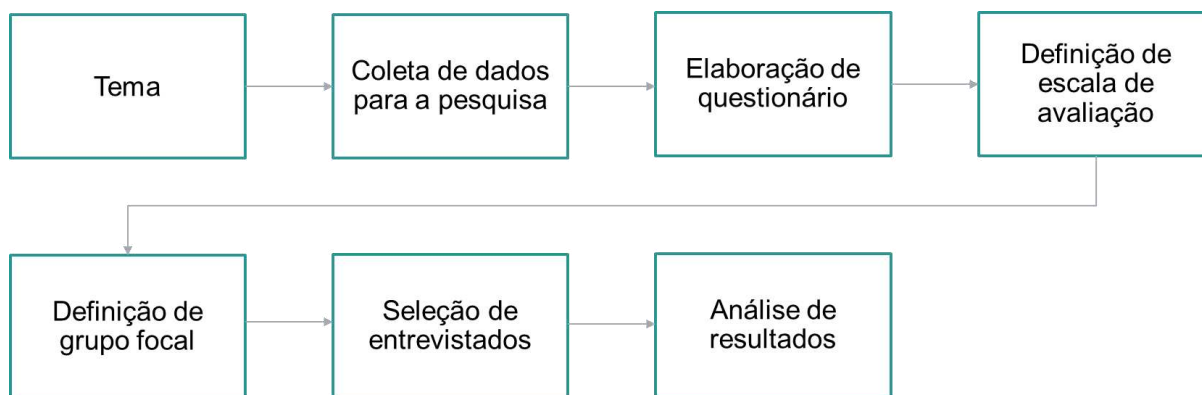
Diante disto, com base nos dados dos tópicos 3.1.1 e 3.1.2, elaborou-se um questionário contendo 20 afirmações sobre "Recuperação energética em fornos de cimento por meio de coprocessamento utilizando resíduos processados de pás eólicas descomissionadas", utilizando o Google Forms, com o objetivo de coletar opiniões de especialistas, explorar, identificar variáveis relevantes e formular hipóteses para pesquisas futuras mais específicas, vislumbrando aclarar potenciais benefícios e desafios associados à implementação dessa prática no país. Apesar da pesquisa utilizar um método objetivo, cada entrevistado pôde incluir comentários sobre o tema, sendo esta uma escolha facultativa. As afirmações foram divididas em cinco grupos, cada grupo contendo quatro afirmações, sendo eles:

- **Grupo A:** Aspectos gerais sobre energia eólica
 - Afirmações sobre a importância do uso de energias renováveis para a redução de emissões de gases nocivos a atmosfera;
 - Afirmações sobre a expansão de projetos eólicos no Brasil;
 - Afirmações sobre o volume substancial de parques eólicos com previsão de descomissionamento;
 - Afirmações sobre obstáculos para o descarte de pás eólica.
- **Grupo B:** Aspectos gerais sobre a atual disposição de pás eólicas em fim de vida útil no Brasil
 - Afirmações sobre descarte de pás eólicas em aterros sanitários;
 - Afirmações sobre os impactos ambientais e de espaço causados pelo descarte em aterros;
 - Afirmações sobre incineração de pás eólicas como meio de descarte;

- Afirmações sobre o impacto ambiental de emissões causados pela incineração de resíduos.
- **Grupo C:** Aspectos gerais sobre coprocessamento de resíduos
 - Afirmações sobre o contexto geral do coprocessamento de resíduos no país;
 - Afirmações sobre a aceitação e percepção do coprocessamento dentro do contexto brasileiro;
 - Afirmações sobre a disponibilidade de infraestrutura para o coprocessamento de resíduos no Brasil;
 - Afirmações sobre a conformidade com as normas ambientais e regulamentações governamentais.
- **Grupo D:** Viabilidade técnica do coprocessamento de resíduos provenientes de pás eólicas em fim de vida útil
 - Afirmações relacionadas à eficácia do processo de coprocessamento desse tipo de material;
 - Afirmações sobre o uso em recuperação energética;
 - Afirmações sobre o uso como componente do cimento;
 - Afirmações sobre
- **Grupo E:** Regulamentação e políticas públicas
 - Afirmações sobre regulamentações existentes;
 - Afirmações sobre regulamentações necessárias;
 - Afirmações sobre a responsabilidade de destinação de resíduos de pás eólicas;
 - Afirmações sobre a importância da governança para o sucesso do projeto.

O processo de elaboração do questionário seguiu o fluxo representado na Figura 49.

Figura 49 – Fluxo de coleta de dados através de entrevista com especialistas.



Fonte: Autor

O questionário foi enviado por e-mail a 15 especialistas atuantes em empresas multinacionais do setor de energia e cimento, provenientes do Brasil, Espanha e Canadá, todos integrantes do círculo de relacionamentos do autor e com experiência no mercado brasileiro. Para a seleção, foram considerados critérios como função na empresa, tempo de carreira profissional e formação acadêmica, garantindo uma representação equitativa das quatro áreas seguintes: a) Fabricantes de cimento, b) Fabricantes de pás eólicas, c) Fornecedores de componentes eólicos e d) Prestadores de serviços de manutenção para componentes eólicos. Além disso, foram abrangidas cinco subáreas: a) Gestão ambiental, b) Gestão e implementação de projetos e qualidade, c) Gestão de processos e d) Engenharia e Manutenção. A área de atuação, subárea e anos de experiência dos entrevistados são detalhados na Tabela 5. Os entrevistados foram identificados com a letra E, de entrevistado, e a numeração. A Tabela 5 detalha a área de atuação, subárea de atuação e anos de experiência.

Tabela 5 – Área de atuação, subárea de atuação e anos de experiência de entrevistados

Entrevistado	Área	Subárea
E1	Fabricação de Cimento	Gestão e implementação de projetos e qualidade
E2	Fabricação de Cimento	Gestão de Operações e Processos

E3	Fabricação de Cimento	Gestão Ambiental
E4	Fabricação de Cimento	Gestão de Operações e Processos
E5	Fabricação de Cimento	Gestão e implementação de projetos e qualidade
E6	Fornecedores de Componentes Eólicos	Gestão e implementação de projetos e qualidade
E7	Fornecedores de Componentes Eólicos	Engenharia e Manutenção
E8	Fornecedores de Componentes Eólicos	Engenharia e Manutenção
E9	Fornecedores de Componentes Eólicos	Gestão e implementação de projetos e qualidade
E10	Fornecedores de Componentes Eólicos	Gestão e implementação de projetos e qualidade
E11	Fabricante de Pá Eólica	Gestão e implementação de projetos e qualidade
E12	Fabricante de Pá Eólica	Gestão e implementação de projetos e qualidade
E13	Manutenção de Componentes Eólicos	Gestão de Operações e Processos
E14	Manutenção de Componentes Eólicos	Engenharia e Manutenção
E15	Manutenção de Componentes Eólicos	Engenharia e Manutenção

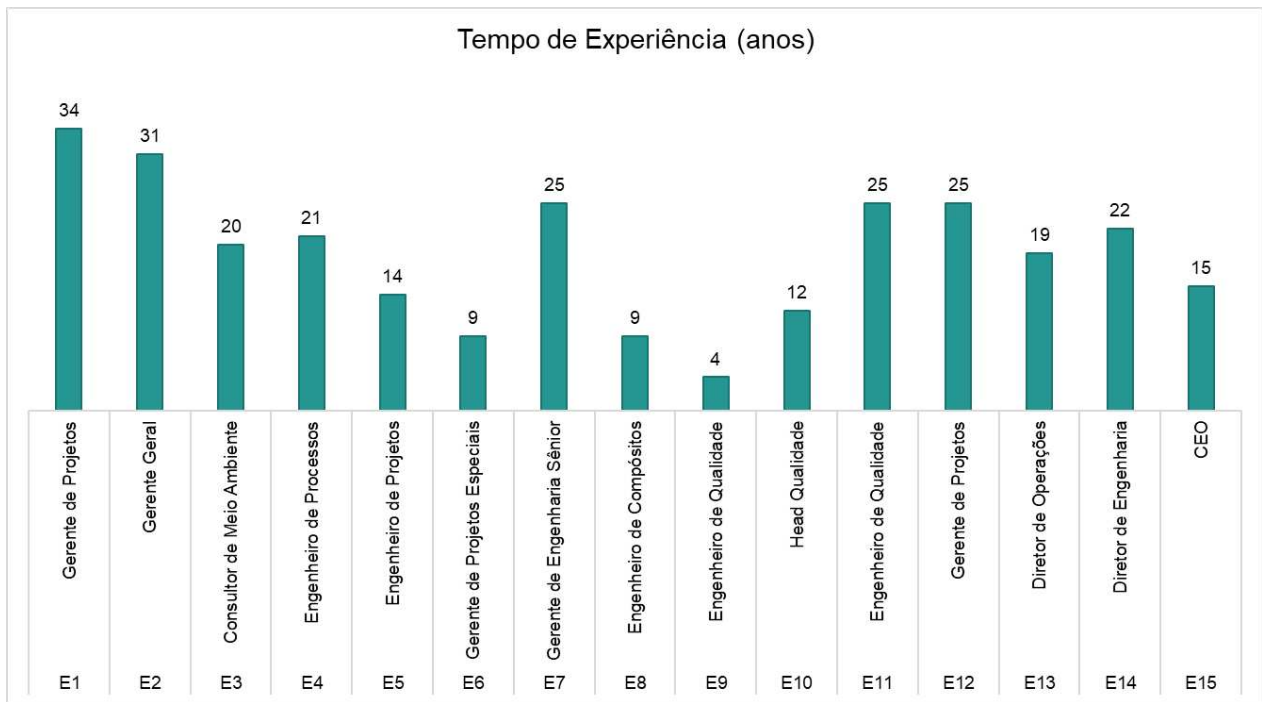
Fonte: Autor

Além disso, o tempo de experiência também desempenhou um papel crucial no processo de seleção dos entrevistados. A média de experiência profissional dos participantes foi de aproximadamente 19 anos. Essa consideração foi fundamental para garantir que os especialistas selecionados possuíssem um conhecimento substancial e uma compreensão sólida do setor, contribuindo assim de forma significativa para a qualidade e relevância das respostas obtidas durante a pesquisa.

Os entrevistados do setor cimenteiro trabalham em empresas multinacionais de grande porte localizados em todas as regiões do Brasil. Já os entrevistados que atuam em empresas de fornecimento de componentes eólicos atuam em multinacionais com sedes no Rio Grande do Norte, Ceará e Bahia.

As empresas de manutenção de componentes eólicos ficam localizadas em São Paulo e possuem juntas cerca de 5.000 funcionários.

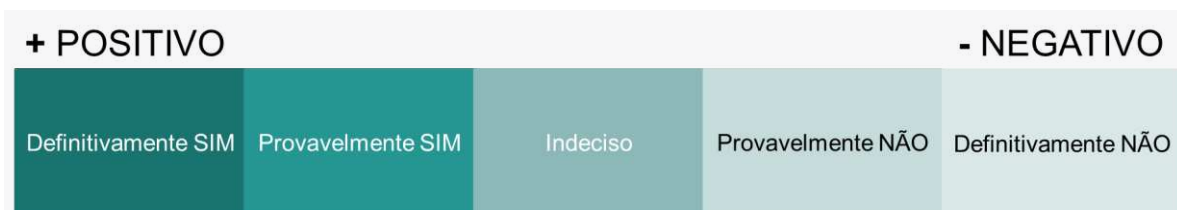
Figura 50 – Tempo de experiência em anos por função desempenhada.



Fonte: Autor

Para mensurar as opiniões e avaliações dos especialistas, optou-se pela utilização da escala Likert, uma metodologia consagrada que consiste em apresentar aos participantes uma série de afirmações relacionadas ao tópico em questão. Por meio dessa escala, os respondentes foram solicitados a expressar seu grau de concordância ou discordância com cada uma das afirmações, oferecendo uma avaliação detalhada e fundamentada sobre os aspectos abordados no questionário.

Figura 51 – Escala Likert aplicada ao questionário.



Fonte: Adaptado de Martins e Cornacchione (2021)

Vale ressaltar que a escala Likert é reconhecida internacionalmente tanto por pesquisadores quanto por profissionais do mercado, destacando-se pela sua eficácia na

obtenção de insights e na análise de dados em diversas áreas de estudo e aplicação (Sanches et al., 2011).

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos três pilares de pesquisa descritos na metodologia, apresentando a quantidade prevista de descarte de pás eólicas, como pode se dar a absorção desses resíduos em processos de recuperação de energia em fábricas de cimento através do coprocessamento de resíduos, além dos resultados das opiniões dos especialistas consultados sobre as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida.

4.1. Estimativa da quantidade de pás eólicas a serem descartadas

As interações entre a massa das pás e sua capacidade são utilizadas para converter as capacidades de geração eólica atuais e futuras em medidas físicas, onde o peso do material compósito presente em cada megawatt de capacidade instalada é determinado para cada turbina, considerando sua capacidade nominal (Liu e Barlow, 2017).

Tabela 6 – Distribuição de parques eólicos por ano e somatório de potência.

Dados Parques Eólicos		
Ano	Nº Parques Eólicos	P. instalada (kW)
2002	1	600
2004	1	4.800
2006	5	208.300
2007	1	10.200
2008	5	95.800
2009	15	264.830
2010	14	326.800
2011	21	596.350
2012	14	368.290
2013	14	350.557
2014	107	2.778.247
2015	107	2.652.775

P – Potência; Dr – Diâmetro do rotor

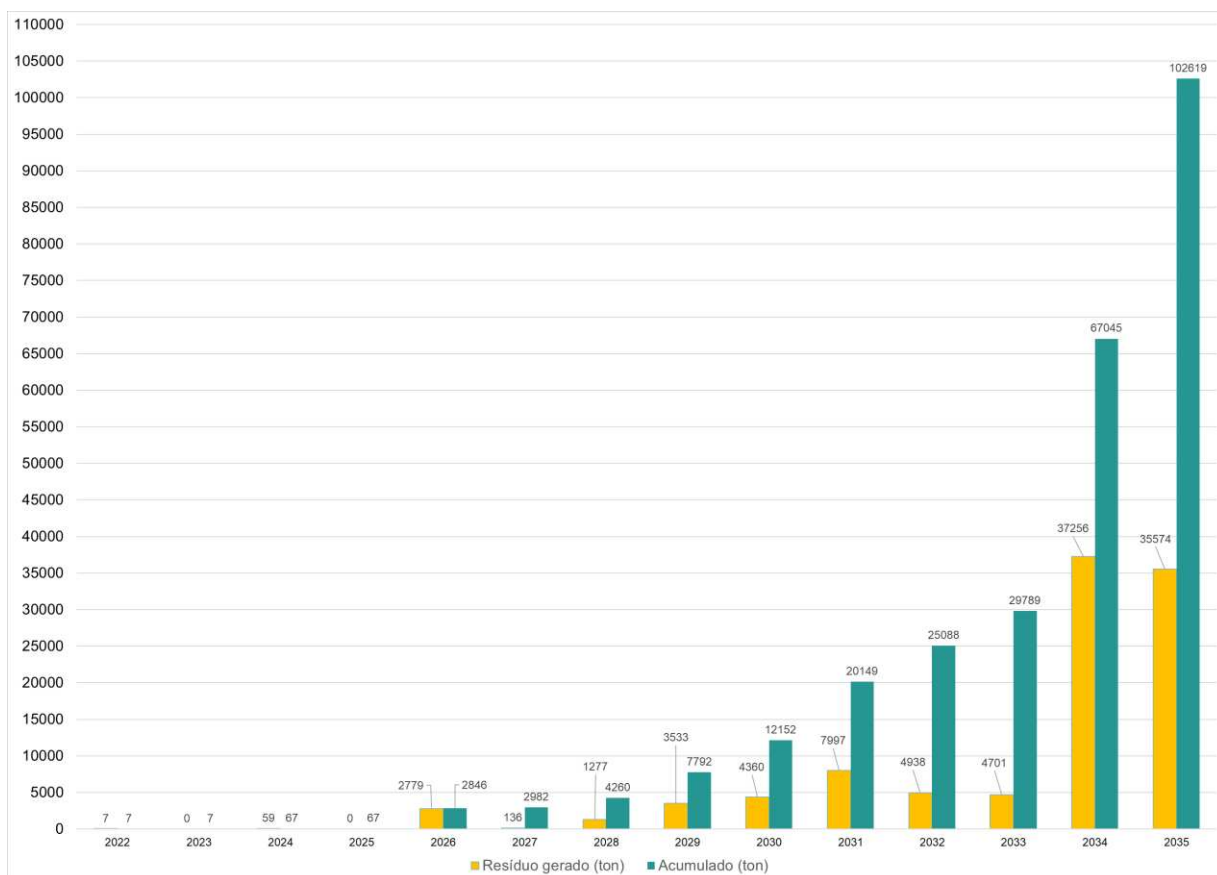
Fonte: Autor

A análise detalhada desses dados e a compreensão profunda da relação entre a massa das pás eólicas e sua capacidade desempenham um papel crucial no planejamento e no desenvolvimento de parques eólicos eficientes e sustentáveis. Utilizando informações das Tabelas 3 e 4 e da Figura 47, torna-se possível realizar estimativas precisas sobre a quantidade de resíduos provenientes das pás eólicas, como ilustrado de forma visual na Figura 52.

Essas estimativas não apenas fornecem insights valiosos para os planejadores e desenvolvedores de parques eólicos, mas também contribuem significativamente para a adoção de práticas mais responsáveis e sustentáveis na indústria de energia renovável.

À medida que o setor eólico amadurece e as primeiras gerações de turbinas atingem o final de suas vidas úteis, surge uma necessidade premente de descomissionar e substituir essas estruturas obsoletas. No entanto, o descomissionamento de turbinas eólicas não é um processo isento de desafios, e um dos desafios mais prementes é o gerenciamento adequado dos resíduos resultantes desse processo. Este aspecto do ciclo de vida das turbinas eólicas exige uma abordagem cuidadosa e estratégica para garantir que os resíduos sejam tratados de maneira responsável e sustentável, minimizando assim os impactos ambientais negativos. As projeções futuras indicam um aumento significativo na quantidade de resíduos provenientes do descomissionamento dos parques eólicos nas próximas décadas. Com base em dados atuais e tendências de mercado, estima-se que em 2026 aproximadamente 2.779 toneladas de resíduos serão geradas apenas nesse ano. No entanto, este número representa apenas o início de uma trajetória preocupante. À medida que mais turbinas atingem o final de suas vidas úteis e precisam ser substituídas, espera-se que a quantidade de resíduos aumente de forma exponencial. Este aumento projetado alcançará um pico notável em 2034, quando se espera que 37.256 toneladas de resíduos sejam geradas, colocando uma pressão adicional sobre os sistemas de gestão de resíduos existentes e destacando a urgência de soluções mais eficazes e sustentáveis.

Figura 52 – Estimativa da quantidade de resíduos (tons) provenientes de pás eólicas gerados pelo seu descomissionamento (Dados em toneladas).



Fonte: Autor

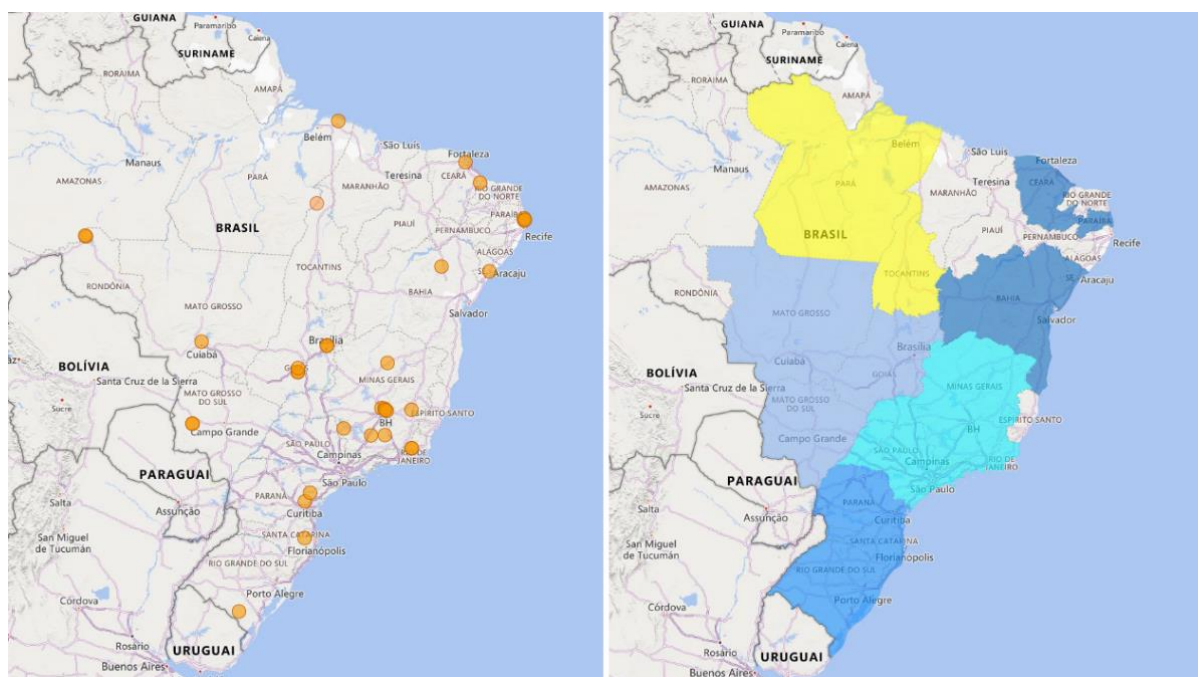
Segundo o apresentado pelas bibliografias consultadas, de acordo com a previsão geração de resíduos de 102.619 toneladas em 2035, de acordo com Liu et al. (2019), identificou-se uma oportunidade substancial de substituir até 61.570 toneladas de carvão por resíduos de pás eólicas em processos de fabricação de cimento. Esta substituição não apenas alinharia as práticas industriais com diretrizes mais sustentáveis, mas também poderia gerar impactos positivos na redução das emissões de carbono e na mitigação das mudanças climáticas. Por outro lado, as recomendações do EPRI (2020) sugerem que 30.785 toneladas de sílica poderiam ser substituídas. Esse movimento não só reduziria a dependência de materiais de alto impacto ambiental, mas também poderia catalisar a inovação em processos de produção mais eficientes e menos prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, estima-se que a substituição de aproximadamente 27.706

toneladas de calcário poderia ser viável, conforme indicado pelas projeções. Essa substituição não só contribuiria para a redução da extração de recursos naturais finitos, mas também poderia diminuir a degradação ambiental associada à mineração e ao transporte desses materiais.

4.2. Quantificação de unidades de coprocessamento

O portal SINIR+ é uma fonte valiosa de informações sobre a gestão de resíduos e a recuperação energética no Brasil. Entre os dados fornecidos, destaca-se a presença significativa de unidades de coprocessamento no país. Segundo informações disponíveis no portal, há um total de 42 dessas unidades aptas a operar, no entanto, apenas 34 realizam esse tipo de operação, que compreende todas as cinco regiões do Brasil.

Figura 53 – Mapeamento de plantas de coprocessamento de resíduos no Brasil.



Fonte: Autor (Base de dados: Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos; Software: Power BI)

A existência de 34 unidades de coprocessamento, com potencial de coprocessamento registrado no portal SINIR+, reflete a amplitude e diversidade dessa prática em todo o território nacional. Estas unidades desempenham um papel crucial na gestão de resíduos, possibilitando que diferentes setores, como o industrial e o agrícola, eliminem seus resíduos de maneira responsável, transformando-os em recursos energéticos úteis. Este potencial de recuperação energética é estimado em 1.016 MW, com uma capacidade de coprocessamento de 5.341 toneladas por dia ou 1.949.541 toneladas por ano, valores estes que seguem padrões de acordo com a capacidade instalada, sendo está controlada pelos fabricantes de cimento.

De acordo com as projeções de resíduos gerados pelo descarte de pás eólicas, apresentados na Figura 52, que acumula um total de 102.621 toneladas até 2035 e as progressões anuais previstas, é possível verificar que as unidades de coprocessamento possuem capacidade de absorção deste material ao longo do período analisado.

As unidades de fabricação de cimento que utilizam sistemas de coprocessamento de resíduos são detalhadas na Tabela 6. Nela, são apresentadas as regiões onde as unidades estão localizadas, os fabricantes, o potencial de coprocessamento diário em toneladas, além da capacidade de recuperação energética em MW. Além disso, o SINIR+ especifica a área de abrangência dessas unidades, considerando resíduos classe I (com diferentes características de periculosidade), sendo esta restrita a um raio de 150 quilômetros para resíduos, em conformidade com o estabelecido no Artigo 72, seguindo a hierarquia de prioridades delineada na Lei nº 12.305 de 2010 e no Artigo 30 deste Decreto.

Conforme as disposições legais mencionadas, os resíduos perigosos com propriedades inflamáveis devem ser preferencialmente encaminhados para o processo de recuperação de energia, desde que existam instalações licenciadas situadas num raio de até 150 quilômetros da fonte desses resíduos. No entanto, caso a distância exceda os 150 quilômetros, os resíduos podem ser encaminhados preferencialmente para processos de recuperação, embora não seja obrigatório. Além disso, é importante ressaltar que, conforme estabelecido pelo Decreto Nº 10.936/2022, se houver uma avaliação pelo órgão ambiental competente indicando que o transporte dos resíduos para as instalações de recuperação energética é inviável, as disposições desse decreto não

se aplicam. Isso significa que, mesmo que haja uma preferência por encaminhar esses resíduos para processos de recuperação energética, essa medida pode ser flexibilizada caso seja demonstrada a inviabilidade logística ou ambiental do transporte.

Ademais, é relevante destacar que os resíduos sólidos provenientes das pás eólicas são categorizados como classe II não inertes e não perigosos, e essa classificação implica que não há uma obrigatoriedade legal específica para sua destinação exclusiva à recuperação energética. A legislação não impõe essa destinação como obrigatória, permitindo certa flexibilidade na gestão e disposição desses materiais, desde que cumpridos os requisitos legais e ambientais pertinentes.

Diante do contexto mencionado e da quantidade significativa de resíduos provenientes das pás eólicas que serão retiradas de operação, é fundamental empreender não apenas um esforço adicional para desenvolver e implementar soluções eficazes que direcionem esses resíduos para a recuperação energética, mas também é crucial revisar a legislação vigente. Esta revisão se faz necessária para evitar que esses resíduos sejam inadvertidamente direcionados para aterros sanitários, o que poderia representar uma perda de recursos valiosos e um impacto negativo significativo no meio ambiente. Essa revisão legislativa é essencial para estabelecer diretrizes claras e incentivos adequados que favoreçam a recuperação energética como destino prioritário para os resíduos das pás eólicas desativadas. Isso não apenas asseguraria a utilização eficiente desses materiais como fonte de energia renovável, mas também contribuiria para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar os impactos ambientais associados à disposição inadequada dos resíduos.

Além disso, ao promover a recuperação energética dos resíduos das pás eólicas, o Brasil poderia capitalizar sobre as tecnologias disponíveis no país e consolidar sua posição como líder na adoção de práticas sustentáveis no setor de energia eólica e cimentício. Isso não apenas fortaleceria a segurança energética e a resiliência do país, mas também geraria oportunidades econômicas significativas, incluindo a criação de empregos e o estímulo à inovação tecnológica.

Tabela 7 – Potencial de coprocessamento.

Detalhamento de Unidade Coprocessadoras Registradas no SINIR+					
Região	Estado	Fábrica	CNPJ	Potencial de Coprocessamento (ton/dia)	Potencial Energético (MW)
Nordeste	Sergipe	Votorantim Cimentos S.A	10.656.452/0088-30	309,5	58,92
Nordeste	Paraíba	Elizabeth Cimentos S.A	12.186.380/0001-80	98,63	18,77
Nordeste	Paraíba	Companhia de Cimento da Paraíba – Brennand	12.616.864/0002-00	178,08	33,89
Nordeste	Paraíba	LafargeHolcim Brasil S.A	10.917.819/0004-14	161,64	30,76
Nordeste	Ceará	Companhia Industrial de Cimento Apodi	10.260.249/0003-51	109,58	20,86
Nordeste	Ceará	Votorantim Cimentos S.A	10.656.452/0051-49	81,19	15,64
Nordeste	Bahia	Intercement Brasil S.A	62.258.884/0145-10	79,45	15,12
Norte	Pará	Votorantim Cimentos S.A	10.656.452/0081-64	82,19	15,64
Norte	Tocantins	Votorantim Cimentos S.A	10.656.452/0068-97	95,89	18,25
Sudeste	Minas Gerais	LafargeHolcim Brasil S.A	60.869.336/0232-49	90,41	17,21
Sudeste	Minas Gerais	Companhia de Cimento da Paraíba – Brennand	07.957.149/0002-93	186,3	35,45
Sudeste	Minas Gerais	CRH Sudeste Industria de Cimento S.A	21.109.697/0002-94	79,45	15,12
Sudeste	Minas Gerais	LafargeHolcim Brasil S.A	60.869.336/0003-89	142,46	27,11
Sudeste	Minas Gerais	Empresa de Cimentos Liz S.A	33.920.299/0001-51	320,54	61,00
Sudeste	Minas Gerais	CRH Sudeste Industria de Cimento S.A	21.109.697/0007-07	43,83	8,34
Sudeste	Minas Gerais	Votorantim Cimentos S.A	01.637.895/0088-93	156,16	29,72
Sudeste	Minas Gerais	Intercement Brasil S.A	62.258.884/0024-22	249,32	47,45
Sudeste	Minas Gerais	Intercement Brasil S.A	60.869.336/0204-95	178,08	33,89
Sudeste	Rio de Janeiro	LafargeHolcim Brasil S.A	60.869.336/0126-38	76,71	14,60
Sudeste	Rio de Janeiro	CRH Sudeste Industria de Cimento S.A	20.927.816/0001-72	71,23	13,56
Sudeste	São Paulo	Votorantim Cimentos S.A	01.637.895/0175-31	306,84	58,40
Sudeste	São Paulo	Intercement Brasil S.A	62.258.884/0002-17	131,5	25,03
Sudeste	São Paulo	Intercement Brasil S.A	62.258.884/0095-16	95,89	18,25
Centro-Oeste	Distrito Federal	CIPLAN Cimento Planalto S.A	00.057.240/0001-22	410,95	78,21
Centro-Oeste	Distrito Federal	Votorantim Cimentos S.A	01.637.895/0075-79	178,08	33,89
Centro-Oeste	Goiás	Intercement Brasil S.A	62.258.884/0134-67	115,08	21,90
Centro-Oeste	Goiás	Votorantim Cimentos S.A	01.637.895/0192-32	178,02	33,89
Centro-Oeste	Mato Grosso	Votorantim Cimentos S.A	10.656.452/0057-34	82,19	15,64
Centro-Oeste	Mato Grosso	Votorantim Cimentos S.A	01.637.895/0184-22	109,58	20,86
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul	Intercement Brasil S.A	62.258.884/0018-84	60,27	11,47
Sul	Paraná	Supremo Cecil	05.798.883/0001-40	82,19	15,64
Sul	Paraná	Votorantim Cimentos S.A	01.637.895/0106-00	616,43	117,31
Sul	Santa Catarina	Votorantim Cimentos S.A	96.824.594/0059-40	117,80	22,42
Sul	Rio Grande do Sul	Votorantim Cimentos S.A	62.258.884/0122-23	65,75	12,51

Fonte: SINIR+

A inviabilidade logística ou ambiental do transporte, bem como a não obrigatoriedade de direcionamento para unidades de recuperação energética, são fatores determinantes que podem influenciar as decisões dos geradores de resíduos. A complexidade logística envolvida no transporte desses componentes constitui um desafio significativo, dadas suas dimensões extraordinárias e características singulares. Fatores como altura, peso e raio de curvatura das peças demandam um método de transporte especializado, o que resulta em opções de rotas limitadas para assegurar o transporte adequado das pás até os centros de tratamento e, subsequentemente, sua destinação para unidades de recuperação energética.

Figura 54 – Pá eólica cortada para transporte para unidade de tratamento.



Fonte: Farzan (2022)

Na Região Nordeste, destaca-se a maior concentração de parques eólicos em operação no período de 2002 a 2015, com significativos números registrados nos estados. O Rio Grande do Norte lidera com 85 parques, seguido pelo Ceará com 41, Bahia com 47, Pernambuco com 20, Piauí com 18, Paraíba com 12, e com apenas um parque em Sergipe. Além disso, a região conta com sete unidades de fabricação de cimento equipadas com sistemas de coprocessamento, localizadas em Sergipe, Bahia, Ceará e Paraíba, totalizando uma capacidade combinada de coprocessamento de 1.018 toneladas por dia. No estado do Ceará, duas unidades de coprocessamento, em Sobral

e Quixeré, possuem juntas um potencial de coprocessamento de 190,77 toneladas por dia e uma recuperação energética potencial de 36,5 MW. Essas unidades se distanciam em até, no máximo, 160 quilômetros dos 41 parques eólicos em operação entre os anos de 2002 e 2015, e não representam uma barreira logística para o direcionamento dos resíduos.

Figura 55 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado do Ceará.

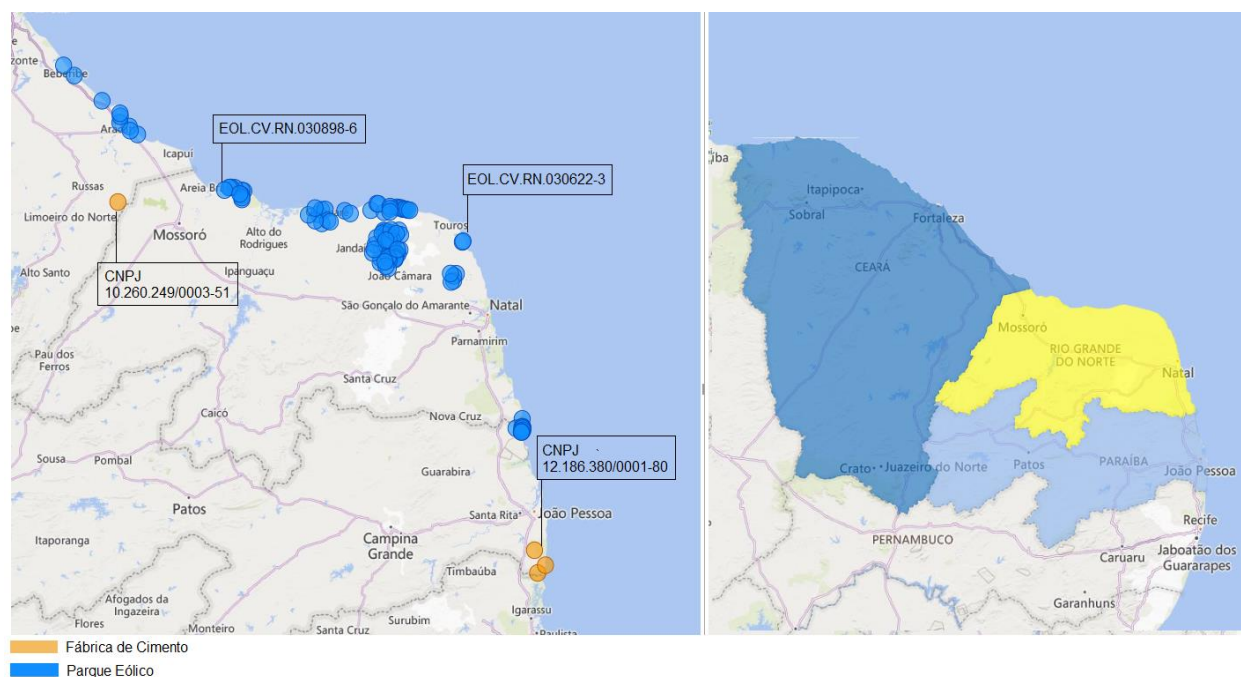


Fonte: Autor

O Rio Grande do Norte não possui fábricas de cimento aptas a coprocessar. Os parques eólicos desse estado estão localizados a uma distância máxima de 361 quilômetros da fábrica de cimento situada em Quixeré, no estado do Ceará (CEG Parque Eólico: EOL.CV.RN.030622-3; CNPJ Fábrica de Cimento: 10.260.249/0003-51), via BR-406. Além disso, os parques eólicos do Rio Grande do Norte estão a uma distância máxima de 488 quilômetros da fábrica de cimento localizada na PB-028, no estado da Paraíba (CEG Parque Eólico: EOL.CV.RN.030898-6; CNPJ Fábrica de Cimento: 12.186.380/0001-80). Essas distâncias consideráveis implicam em desafios logísticos substanciais para o transporte de resíduos das pás eólicas até as instalações de

recuperação energética, aumentando os custos e complexidades operacionais envolvidos no processo.

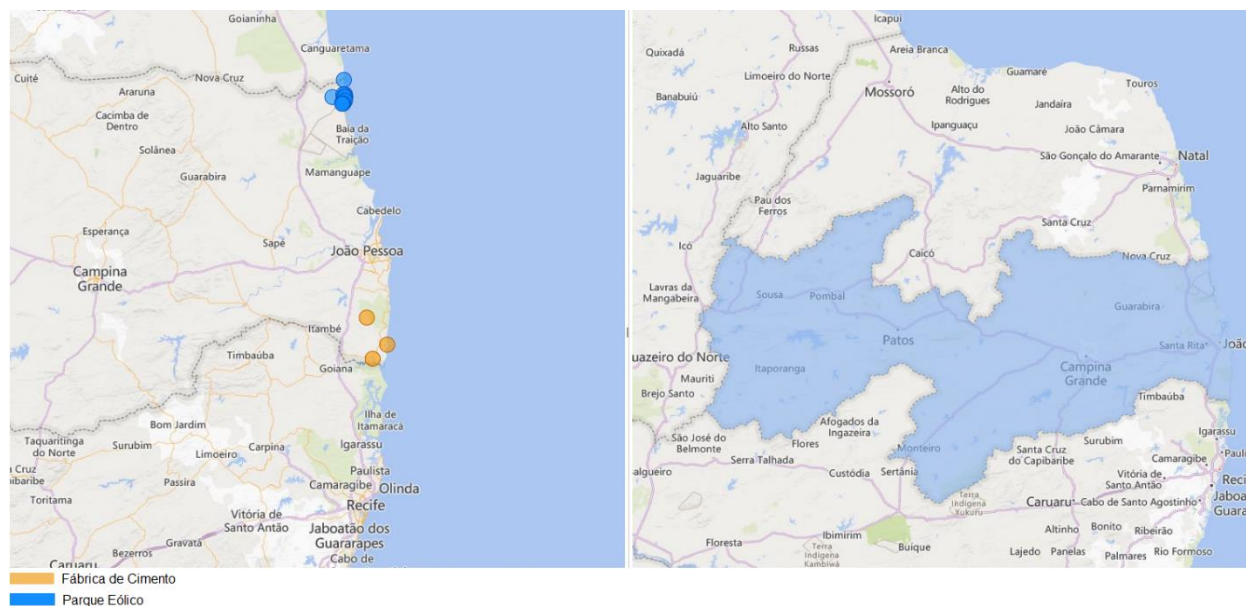
Figura 56 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: Autor

Na Paraíba, as três fábricas de cimento que têm capacidade para coprocessar resíduos estão localizadas a uma distância máxima de 30 quilômetros uma da outra. Juntas, essas fábricas possuem uma capacidade de coprocessamento de 438 toneladas por dia, o que equivale a um potencial de recuperação energética de 83 MW. Quanto aos parques eólicos, eles estão situados a uma distância máxima de aproximadamente 141 quilômetros das fábricas de cimento e compartilham a mesma rota, a BR-101. Esta proximidade das fábricas de cimento e dos parques eólicos pode facilitar a logística de transporte dos resíduos das pás eólicas para as instalações de recuperação energética, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos no estado.

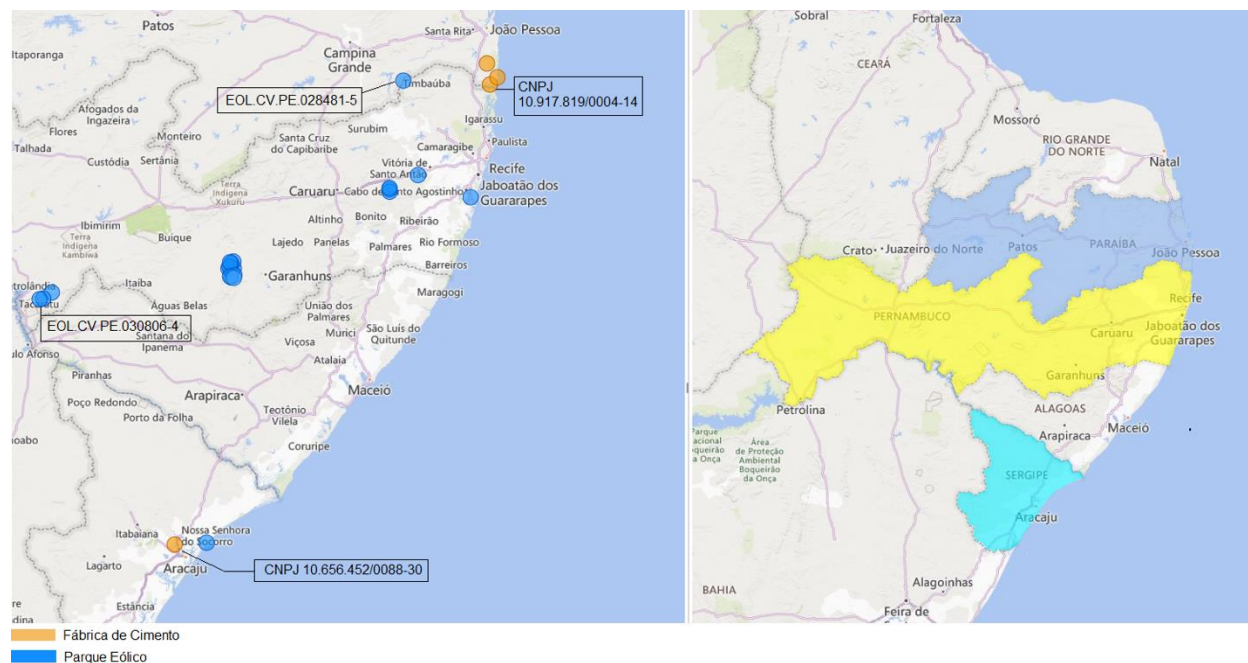
Figura 57 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado da Paraíba.



Fonte: Autor

Assim como o Rio Grande do Norte, o estado de Pernambuco, com 20 parques eólicos em operação entre os anos de 2002 e 2015, não possui unidade de fabricação de cimento aptas a coprocessar, e por esse motivo, há uma dependência de unidade de fabricação de cimento de outros estados para que seja possível descartar os resíduos provenientes de pás eólicas em fornos de clínquer para recuperação energética. O estado da Paraíba possui unidades que estão a uma distância máxima de 507 do parque eólico localizado no município de Tacacatu (CEG Parque Eólico: EOL.CV.PE.030806-4; CNPJ Fábrica de Cimento: 10.917.819/0004-14) via BR-232, e o estado de Sergipe possui uma unidade de coprocessamento que está a uma distância máxima de 553 do parque eólico localizado no município de Pirauá (CEG Parque Eólico: EOL.CV.PE.028481-5; CNPJ Fábrica de Cimento: 10.656.452/0088-30) via BR-101.

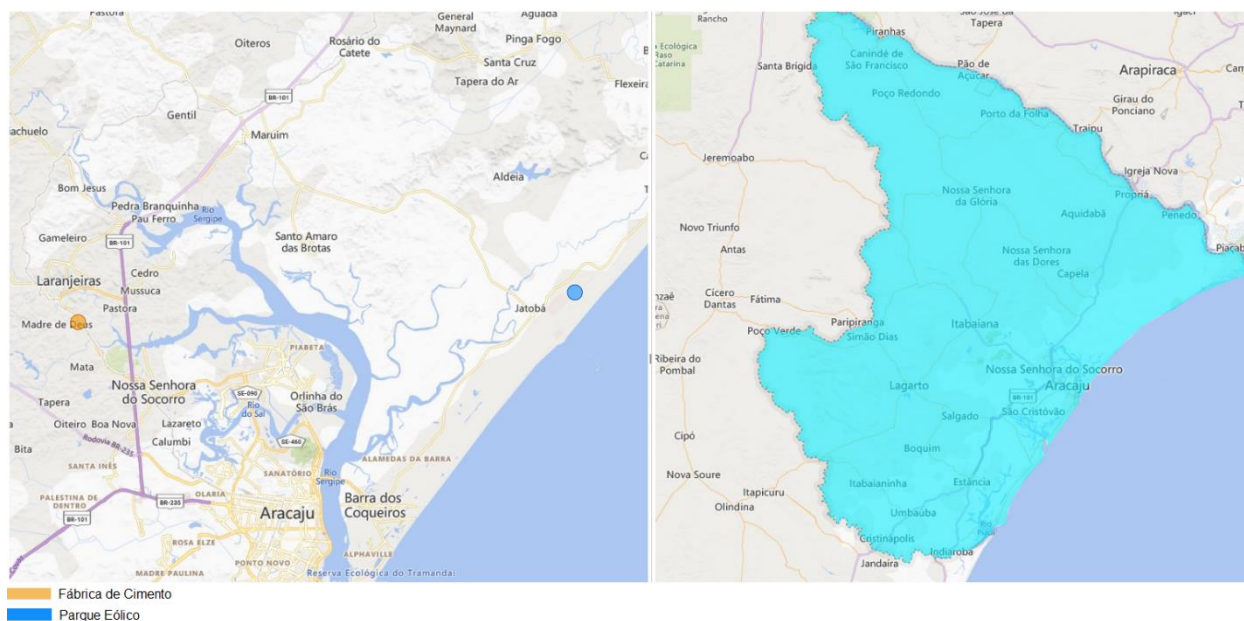
Figura 58 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado de Pernambuco.



Fonte: Autor

Em Sergipe, onde apenas um parque eólico está situado no município de Barras do Coqueiros, destaca-se a presença de uma notável unidade de coprocessamento de resíduos em Laranjeiras. Esta instalação não apenas atende às necessidades do parque eólico mencionado, mas também se destaca como uma das cinco maiores do Brasil em termos de capacidade potencial de coprocessamento. Estima-se que essa unidade possa processar aproximadamente 310 toneladas de resíduos por dia, demonstrando seu papel crucial na gestão eficaz desses materiais na região. Via rodovia estadual SE-100, o parque eólico está localizado no município de Barras do Coqueiros, a 44 quilômetros da fábrica de cimento, localizada no município de Laranjeiras.

Figura 59 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado de Sergipe.



Fonte: Autor

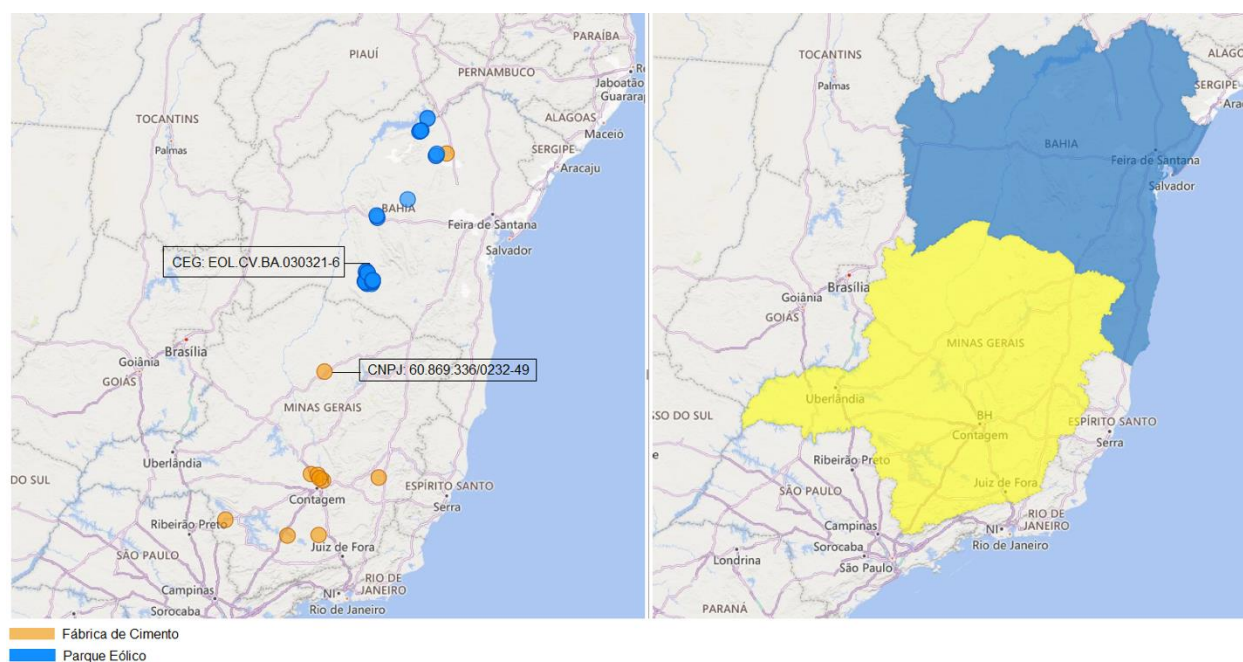
O estado da Bahia, quinto maior estado do Brasil em extensão territorial, tem se destacado como um dos líderes em implementações de parques eólicos nos últimos anos. Dos atuais 314 parques em operação, 47 foram colocados em operação entre os anos de 2002 e 2015, localizados em diversas regiões do estado, incluindo a região central. Norte e Sul.

Na via contrária a expansão eólica, conforme dados dos SINIR+, o estado conta com apenas uma unidade de fabricação de cimento com capacidade para coprocessar resíduos localizada no município de Campo Formoso.

Para contextualizar a logística envolvida no transporte dos resíduos das pás eólicas até essa unidade de coprocessamento, podemos observar que para os seis parques eólicos localizados ao norte do estado, a distância máxima até a unidade de coprocessamento é de 195 quilômetros, via BR-407. Já para os três parques eólicos localizados na região central do estado, a unidade de coprocessamento está a 450 quilômetros de distância, via BA-046. E para os parques eólicos localizados ao sul do estado, a unidade de coprocessamento está a uma distância de 710 quilômetros, via rodovia estadual BA-122.

Os parques eólicos localizados na região sul, exatamente 33, podem representar o maior desafio logístico para a destinação dos resíduos provenientes de pás eólicas para recuperação energética. No entanto, unidades de coprocessamento localizadas no estado de Minas Gerais, podem atender a essa demanda, uma vez que a fábrica de cimento mais próxima, localizada em Montes Claros (CNPJ: 60.869.336/0232-49) está a 447 quilômetros do parque eólico de Igaporã (CEG: EOL.CV.BA.030321-6).

Figura 60 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação aos parques eólicos no estado da Bahia.



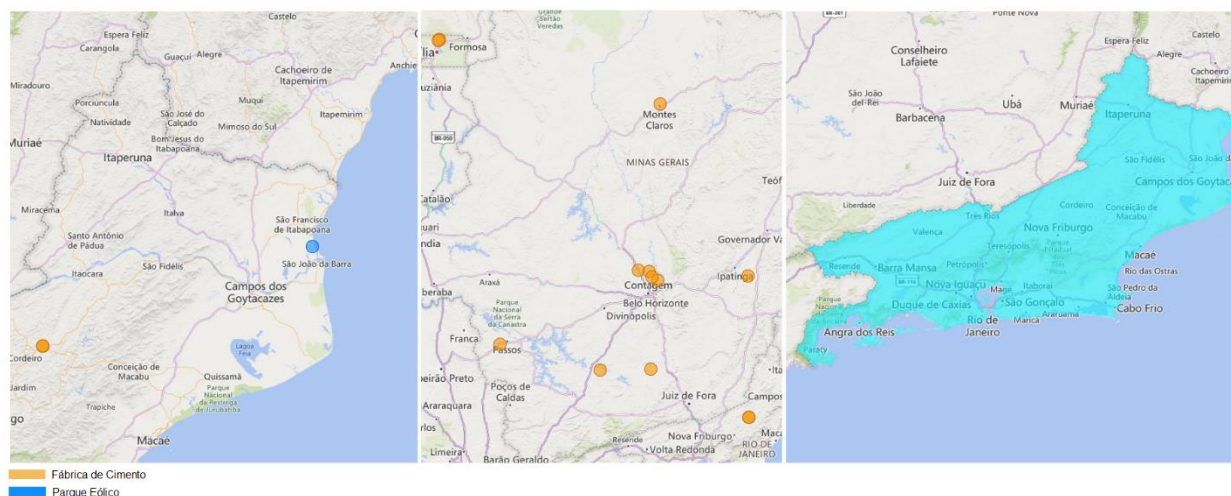
Fonte: Autor

Com apenas um parque eólico, com capacidade de geração outorgada de 28.050 kW, localizado em São Francisco de Itabapoana, o Rio de Janeiro possui duas unidades de coprocessamento com potencial de 145 toneladas por dia e recuperação energética de 28 MW. As unidades de coprocessamento estão localizadas a poucos quilômetros entre si e a 188 quilômetros do parque eólico, via BR-492 e RJ-158.

Além disso, a região Sudeste possui um conglomerado de unidades coprocessadoras, sendo 9 em Minas Gerais, 3 em São Paulo e 2 no Rio de Janeiro, com um potencial de coprocessamento de 2.128 toneladas por dia e uma potência de

recuperação energética de 405MW. Apesar disso, muitas dessas unidades estão dispersas em regiões distantes do único

Figura 61 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação ao parque eólico do Rio de Janeiro.

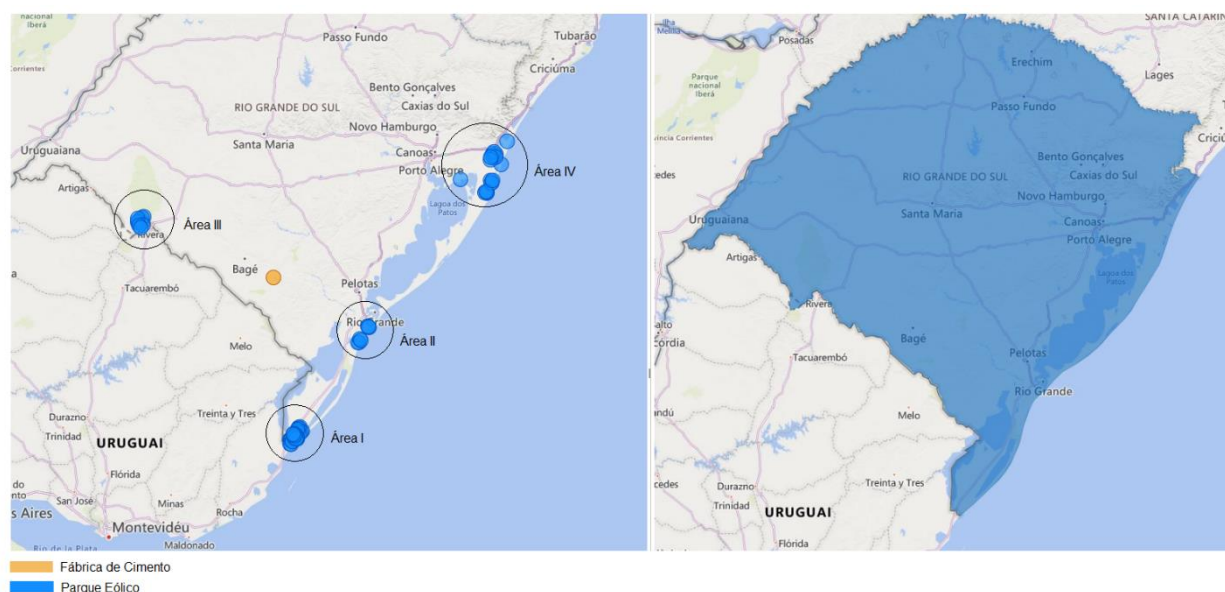


Fonte: Autor

Na Região Sul, com 80 parques eólicos em operação nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul entre 2002 e 2015, há 4 unidades de coprocessamento, sendo duas no Paraná, uma em Santa Catarina e outra no Rio Grande do Sul, totalizando um potencial de coprocessamento de 882 toneladas por dia e uma potência de recuperação energética de 168MW.

O Rio Grande do Sul possui 65 parques em operação registrados entre os anos de 2002 e 2015, em conglomerados qual o autor separou por quatro áreas, conforme Figura 62. Em relação a unidade de coprocessamento localizada no município de Candiota (CNPJ: 62.258.884/0122-23), qual possui um potencial de coprocessamento diário de 65,75 toneladas, o parque mais distante da Área I está a 406 quilômetros, via BR-293, localizado no município de Chuí. Em relação a Área 2, o parque mais distante da Área II está a 206 quilômetros, via BR-293 e BR-392, localizado no município de Rio Grande. O parque mais distante da Área III está a 220 quilômetros, via BR-293, localizado no município de Santana do Livramento. O parque mais distante da Área IV está a 522 quilômetros, via BR-116, localizado no município de Xangri-lá.

Figura 62 – Distribuição de fábricas de cimento com unidades de coprocessamento em relação ao parque eólico do Rio Grande do Sul.



Fonte: Autor

Em Santa Catarina, estado que conta com 15 parques eólicos em operação registrados entre os anos de 2022 e 2015, destaca-se uma fábrica de cimento (CNPJ: 96.824.594/0059-40) com capacidade para coprocessar diariamente até 117,80 toneladas de resíduos, localizada no município de Salseiros. Este empreendimento representa uma oportunidade significativa para a gestão sustentável dos resíduos gerados pelos parques eólicos da região.

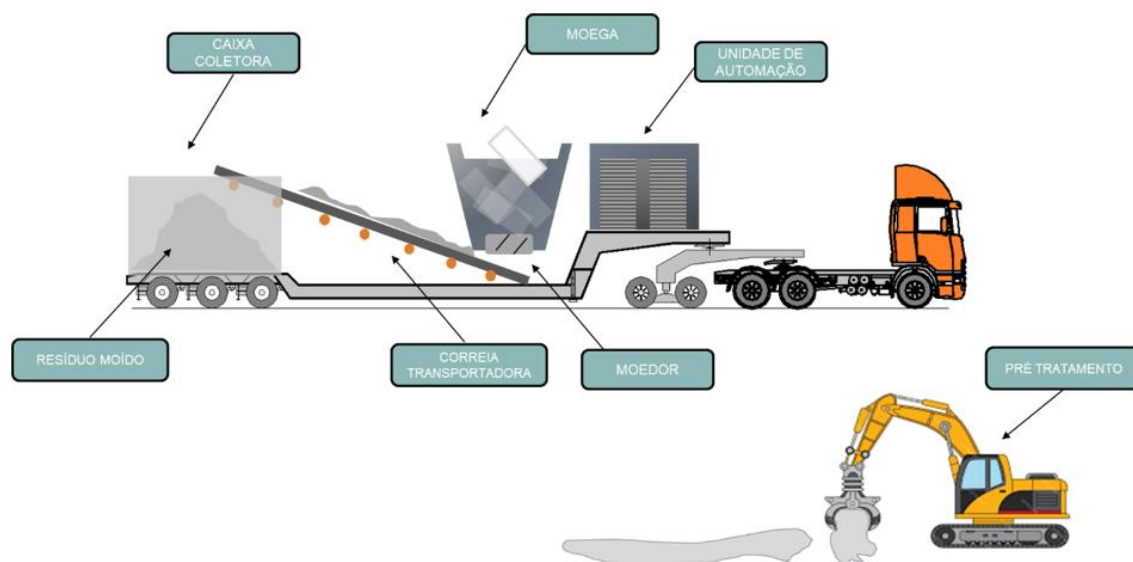
O principal desafio logístico para os empreendimentos do estado está relacionado ao transporte dos resíduos dos parques eólicos localizados a Oeste do estado, num total de 9 parques, situados no município de Água Doce (Área I, Figura 63). A distância entre a fábrica de cimento e esses parques eólicos é de 394 quilômetros via BR-470. Além desses parques eólicos a Oeste, há outros empreendimentos eólicos distribuídos em diferentes regiões do estado. Ao sul, encontram-se parques eólicos a 309 quilômetros via BR-101 e SC-390, bem como a 220 quilômetros via BR-101.

Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias de transporte é fundamental. Investir em tecnologias especializadas para o transporte de cargas volumosas e pesadas, como pás eólicas, pode tornar o processo mais eficiente e seguro. Isso envolve o desenvolvimento de veículos adaptados, equipamentos de içamento avançados e métodos inovadores de embalagem e armazenamento.

A colaboração entre o setor público e o privado também pode desempenhar um papel importante na superação desses desafios. Parcerias estratégicas podem ajudar a otimizar as rotas de transporte, compartilhar recursos e reduzir os custos operacionais. Isso pode envolver empresas de transporte, fabricantes de equipamentos, autoridades governamentais e organizações de pesquisa.

Uma abordagem promissora para superar essa necessidade de transportes especiais é a implementação estratégica de unidades de trituração, inclusive dentro dos próprios parques eólicos. Recentemente, soluções inovadoras têm surgido para atender a essa demanda, como a proposta pela empresa americana *SSI Shredding System* em 2023 (Figura 64). Nesse contexto, um sistema móvel se destaca como um facilitador crucial no processo inicial de processamento dos materiais compósitos provenientes de pás eólicas descomissionadas (SSI Shreding Systems, 2024).

Figura 64 – Sistema móvel de trituração de pás eólicas.



Fonte: Autor

O sistema é composto por uma unidade de trituração automatizada, meticulosamente projetada para fragmentar as seções das pás que já foram pré-cortadas. As seções são então transportadas para a instalação de reprocessamento onde são cortados em seções ainda menores que são alimentados em um britador que reduz o tamanho para 50 cm (Nagle et al., 2020). Após o processo de trituração, os resíduos são transportados de maneira eficiente por meio de uma correia transportadora até uma área de armazenagem designada. Essa abordagem não apenas simplifica a logística de transporte, mas também integra a fase de trituração diretamente nas instalações dos parques eólicos, reduzindo a dependência de transportes especializados e ampliando as opções de rotas viáveis para a gestão eficaz dos resíduos das pás para recuperação energética em fornos de cimento. Iniciativas como essa evitam que as geradoras de resíduos optem pelo caminho mais fácil, porém, mais prejudicial ao meio ambiente, o descarte em aterros sanitários.

Em conjunto, essas medidas podem contribuir para superar os desafios logísticos e ambientais associados ao transporte de resíduos de parques eólicos para unidades de coprocessamento de fábricas de cimento, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos gerados pela indústria de energia eólica no Brasil.

4.3. Avaliação de tema por especialistas

Nesta seção, serão exibidos os resultados das opiniões dos especialistas pesquisados sobre as opções de destinação das pás de turbinas eólicas ao fim de sua vida útil. Após cada conjunto de perguntas apresentadas aos especialistas, serão abordadas as discussões pertinentes aos resultados obtidos. As análises em relação ao presente estudo foram pautadas conforme um conjunto de conceitos e informações contidos em cada uma de suas perspectivas, sendo ele: Grupo A) Aspectos gerais sobre energia eólica; Grupo B) Aspectos gerais sobre a atual disposição de pás eólicas em fim

de vida útil no Brasil; Grupo C) Aspectos gerais sobre coprocessamento de resíduos; Grupo D) Viabilidade técnica do coprocessamento de resíduos provenientes de pás eólicas em fim de vida útil; Grupo E) Regulamentação e políticas públicas.

Para cada grupo, foram elaboradas quatro afirmações, estruturadas de forma sequencial, de modo que cada afirmação subsequente complementasse a anterior. Essa abordagem foi adotada com o intuito de garantir a consistência e fluidez da pesquisa, permitindo uma análise mais completa e aprofundada das opiniões dos especialistas. Ao seguir essa sequência, os participantes puderam fornecer insights progressivos e contextualizados, enriquecendo assim os resultados obtidos.

Das 20 afirmativas apresentadas, os respondentes forneceram um total de 41 comentários, resultando em uma média de aproximadamente dois comentários por afirmação. Esse número considerável de comentários reflete o interesse e a participação ativa dos especialistas no processo de avaliação e discussão das questões relacionadas ao coprocessamento de resíduos de pás eólicas. Os comentários adicionais fornecem insights valiosos e perspectivas adicionais sobre os desafios, oportunidades e considerações relevantes para esse campo específico, enriquecendo assim a compreensão global do tema. Esse engajamento demonstra a importância e a complexidade do tópico em questão

4.3.1. Grupo A: Aspectos gerais sobre energia eólica

Neste grupo foram oferecidas quatro afirmativas ligadas ao tópico. Cada uma delas foi meticulosamente elaborada para tratar de variados aspectos pertinentes do domínio da energia eólica, fornecendo uma base sólida para a discussão e análise das visões dos especialistas. Essa organização buscou trazer uma compreensão abrangente das perspectivas dos participantes sobre aspectos essenciais no cenário da energia eólica.

Afirmação 1: O aumento da taxa de implementação de parques eólicos em escala global é inegável. Nos próximos anos, espera-se um crescimento exponencial dessas instalações.

Com base nos resultados da primeira afirmação, observou-se que dez especialistas concordaram plenamente com a previsão de um aumento exponencial na taxa de implantação de parques eólicos nos próximos anos, enquanto cinco afirmaram que esse crescimento será provavelmente exponencial. Esses resultados sugerem uma tendência de crescimento significativo no setor de energia eólica, impulsionada pelo crescente apelo por fontes de energia renovável e pela pressão social por práticas mais sustentáveis.

Além disso, os especialistas projetaram um aumento expressivo na construção de novos parques eólicos nos próximos dois anos, alinhando-se com as expectativas de crescimento exponencial. As previsões da Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica), que indicam uma capacidade de aproximadamente 45GW até 2028, corroboram essa perspectiva de expansão contínua do setor.

No entanto, alguns especialistas alertaram para possíveis obstáculos, como incertezas políticas e a redução nos valores da tarifa de energia, que podem resultar em uma estabilização temporária do crescimento do setor nos anos de 2024 e 2025. No entanto, há uma visão otimista de que o setor retomará seu crescimento exponencial com a introdução de novas tecnologias, como turbinas mais potentes e pás maiores.

Embora haja um forte apelo por fontes mais limpas de geração de energia, alguns especialistas também apontaram que os custos relativamente baixos de geração de energia podem retardar o desenvolvimento de novos parques em determinadas regiões nos próximos anos. Essa complexidade na dinâmica de mercado ressalta a importância de considerar diversos fatores ao projetar o futuro do setor de energia eólica.

Afirmação 2: O Brasil tem acompanhado um notável crescimento de projetos eólicos com uma quantidade expressiva de usinas e uma potência instalada considerável.

Doze especialistas concordam integralmente que o Brasil segue a tendência global de expansão da energia eólica, enquanto três afirmam que é provável que o país tenha avançado consideravelmente em projetos eólicos. Segundo opiniões coletadas, ainda há uma necessidade de diversificação da matriz energética brasileira, buscando reduzir a dependência de fontes tradicionais, como hidrelétricas, e incorporando mais fontes renováveis, como a energia eólica. Isso não apenas pode contribuir para a

segurança energética, mas também para a mitigação dos impactos ambientais associados à geração de energia. Apesar do progresso no setor eólico, os especialistas afirmam que devido ao tamanho do país e à sua cultura energética estabelecida, ainda é esperado que o Brasil continue investindo significativamente em usinas hidrelétricas. Essa observação destaca a complexidade da transição energética e a necessidade de um planejamento cuidadoso para garantir uma matriz energética sustentável e resiliente no longo.

Afirmção 3: O tempo de vida-útil de um sistema eólico é de 20 anos. Com a crescente instalação de parques eólicos, há uma previsão substancial de descomissionamento de pás eólicas nos próximos anos.

Foi abordado sistemas de geração eólica é estimado em 20 anos, e que haverá um descomissionamento em escala nos próximos anos. Diante disto, observou-se que cinco dos quinze respondentes concordaram plenamente com essa afirmação, enquanto oito afirmaram provavelmente "sim", e um se mostrou indeciso, enquanto outro afirmou provavelmente "não".

Os especialistas ressaltaram que se espera uma demanda crescente de parques em processo de desinstalação nos próximos 10 anos. Além disso, é relevante considerar que, de acordo com a norma IEC 61400-1, 20 anos é o tempo mínimo de vida útil de um aerogerador. No entanto, enfatizaram que há alternativas, como *retrofit*, modernização e repotencialização parcial ou total, que podem ser avaliadas para estender essa vida útil e reduzir o volume de descomissionamento.

Houve a observação por parte dos especialistas de que, com o avanço da tecnologia e a possibilidade de contratos de extensão de vida útil, a indústria de reparos para manter os ativos operantes deve crescer significativamente. No entanto, alertaram para a necessidade de observar a implementação de estudos para prolongar a vida útil desses equipamentos, visando reduzir custos.

Os especialistas também destacaram que nem todos os parques que alcançarem os 20 anos serão descontinuados, e que algumas ações de extensão de vida útil podem retardar o descomissionamento, acumulando potencial para os próximos anos. Esses aspectos ressaltam a complexidade e os desafios envolvidos na gestão de parques eólicos ao longo de seu ciclo de vida.

Afirmção 4: Diferentemente da torre fabricada de concreto ou metal, devido as suas dimensões e materiais (fibra de vidro e resina) de fabricação, as pás são os componentes de uma turbina eólica que apresentam os maiores obstáculos para sua disposição ao término de sua vida útil.

Doze especialistas concordam integralmente que as pás eólicas representam o maior desafio em relação à disposição ao fim da vida útil. Dois afirmaram que provavelmente "sim", e um se mostrou indeciso.

Os comentários dos especialistas sugerem que as pás possuem um processo de reciclagem mais complexo devido às suas dimensões e à quantidade de materiais diferentes em sua construção. Além disso, a dificuldade de separação desses materiais torna as pás um dos componentes mais complexos de serem descartados ao fim de sua vida útil.

Um dos especialistas menciona que, havendo um poder calorífico inferior atrativo, esse material pode ser analisado em termos químicos, definindo a viabilidade em recuperações energéticas em fornos de cimento. Essa observação destaca a necessidade de explorar alternativas inovadoras para lidar com o descarte das pás eólicas, considerando tanto aspectos técnicos quanto ambientais.

4.3.2. Grupo B: Aspectos gerais sobre a atual disposição de pás eólicas em fim de vida útil no Brasil

Neste grupo foram oferecidas quatro afirmativas sobre o cenário brasileiro de disposição final de pás eólicas em fim de vida útil, e alternativas presentes. Esse componente é composto por materiais como fibras de vidro e resinas, muitas vezes são destinadas a aterros sanitários, levantando preocupações ambientais e de ocupação de espaço.

Afirmção 1: Devido a ausência de iniciativas ou obrigatoriedade do correto direcionamento ambiental, o descarte de pás eólicas em aterros sanitários é uma prática comum no Brasil, gerando preocupações ambientais e de ocupação de espaço.

Nove especialistas estão completamente de acordo que atualmente existe uma lacuna considerável que precisa ser preenchida para tornar os processos ambientais de destinação de resíduos provenientes de pás eólicas mais rigorosos e obrigatórios, com o intuito de evitar destinações que possam resultar em passivos ambientais no futuro. Além disso, cinco especialistas expressaram a opinião de que provavelmente são necessárias novas iniciativas nesse sentido, enquanto um se mostrou indeciso.

Um dos especialistas destacou que, apesar de considerar que o mercado ainda é "jovem" e que, até o momento, não houve a criação de um problema significativo em relação à gestão de resíduos, ele ressalta a possibilidade muito provável de que tal problema venha a ocorrer no futuro. Essa perspectiva sublinha a importância de se antecipar a questão e abordá-la de forma proativa para evitar possíveis consequências adversas.

Afirmção 2: O descarte em aterros sanitários representa um desafio ambiental significativo devido aos materiais compósitos das pás eólicas, como fibras de vidro e resinas, no entanto é a alternativa mais praticada no mercado brasileiro.

Quatorze entrevistados expressaram uma visão positiva em relação à questão, com dez deles concordando totalmente e quatro afirmando "provavelmente sim". Entre esses, um dos entrevistados indicou que provavelmente os materiais compósitos não representam um desafio significativo para a destinação em aterros.

Um dos entrevistados observou que a falta de iniciativa tecnológica para o desenvolvimento de soluções de reaproveitamento desses resíduos resulta em impactos ambientais consideráveis a longo prazo associados à energia eólica. Isso destaca a necessidade premente de investir em pesquisa e desenvolvimento para abordar essa lacuna.

Por outro lado, um segundo entrevistado mencionou que a indústria cimenteira pode absorver esses resíduos, mas ressaltou a necessidade de uma avaliação mais profunda. Ele enfatizou que a granulometria do material deve ser estritamente padronizada, evitando problemas de processamento, e que a atividade de trituração pode ter um custo elevado que podem inviabilizar o processo de destinação. Esses

comentários destacam a complexidade da questão e a importância de considerar vários fatores ao avaliar soluções para a destinação de resíduos de pás eólicas.

Afirmativa 3: Uma alternativa imediata é a incineração, no entanto ela não apresenta retorno financeiro direto, reduzindo a possibilidade de iniciativas nessa direção.

A afirmação suscitou opiniões divergentes entre os entrevistados. Três dos respondentes afirmaram categoricamente que a incineração definitivamente pode oferecer retorno financeiro e é uma alternativa imediata viável. Outros sete respondentes concordaram que é provável que a incineração apresente retorno financeiro e seja uma alternativa imediata. Dois entrevistados se mostraram indecisos, enquanto três dos respondentes expressaram a opinião de que a incineração provavelmente não é uma alternativa imediata e talvez não gere retorno financeiro.

Além das afirmações objetivas, um dos entrevistados comentou sobre os impactos ambientais negativos da incineração na atmosfera, observando que esse método vai contra o propósito da geração de energia renovável, que é o princípio subjacente à fabricação de pás eólicas. Em contrapartida, outro entrevistado argumentou que a incineração em fornos siderúrgicos já conta com sistemas de controle ambiental estabelecidos, que promovem a redução de gases. Ele enfatizou que esses sistemas são amplamente utilizados na indústria siderúrgica e que o principal desafio é analisar a viabilidade desses materiais no processo siderúrgico. Esses comentários refletem a complexidade da questão, considerando não apenas os aspectos econômicos, mas também os ambientais, ao avaliar a incineração como uma opção para a destinação de resíduos de pás eólicas.

Afirmação 4: A incineração enfrenta limitações devido aos gases emitidos durante a queima e aos resíduos sólidos resultantes, conhecidos como cinzas.

Assim como a Afirmação 3, esta afirmação também gerou opiniões divergentes entre os entrevistados, evidenciando que o processo de incineração de resíduos ainda não é amplamente aceito e levanta dúvidas quanto à sua eficácia e segurança ambiental.

Quatro respondentes afirmaram que a incineração definitivamente enfrenta limitações, enquanto outros cinco afirmaram que provavelmente esse processo enfrenta

limitações. Três entrevistados se mostraram indecisos, e os três restantes afirmaram que o processo não enfrenta limitações.

Um dos respondentes destacou que já existem soluções aplicadas aos resíduos sólidos do processo de incineração e que esse não deve ser um motivo de preocupação. Essa perspectiva sugere que, embora existam desafios associados à incineração, há tecnologias disponíveis para lidar com as limitações decorrentes desse processo.

4.3.3. Grupo C: Aspectos gerais sobre coprocessamento de resíduos

Neste grupo foram oferecidas quatro afirmativas sobre aspectos da atividade de coprocessamento de resíduos sólidos no cenário brasileiro em termos de maturidade, aceitação e normas ambientais.

Afirmção 1: O cenário do coprocessamento de resíduos no Brasil está em constante evolução, trazendo oportunidades promissoras para a gestão ambiental e a sustentabilidade.

As respostas obtidas refletiram uma visão predominantemente favorável ao cenário de crescimento do coprocessamento de resíduos. Nove dos respondentes afirmaram que essa atividade definitivamente está em constante evolução e representa um setor promissor para a gestão ambiental. Quatro especialistas adicionais afirmaram que provavelmente o coprocessamento está em crescimento e é uma área que impulsionará a gestão e sustentabilidade de resíduos. Um dos entrevistados se mostrou indeciso, enquanto o último afirmou que provavelmente o coprocessamento não está em evolução, não sendo uma alternativa promissora para a gestão ambiental de resíduos.

Além das respostas objetivas, esta afirmação suscitou dois comentários de especialistas. Um deles destacou que o coprocessamento traz benefícios significativos para a redução de impactos ambientais, ressaltando a importância dessa prática na mitigação dos efeitos negativos da disposição inadequada de resíduos sólidos.

O segundo comentário abordou o cenário brasileiro, observando que, embora haja uma evolução aparente, ainda não atingiu um nível significativo, se comparado ao volume de produção de cimento do país. Isso sugere uma grande oportunidade de ampliação da capacidade de recuperação energética, queima de resíduos e redução de

passivos ambientais a partir do setor cimenteiro brasileiro, destacando a necessidade de investimentos e políticas que incentivem o crescimento do coprocessamento de resíduos.

Afirmção 2: Há uma crescente conscientização sobre os benefícios ambientais do coprocessamento, contribuindo para uma visão mais positiva dessa prática em diversos setores da sociedade brasileira.

As respostas obtidas demonstraram uma forte concordância com a afirmação, com seis respondentes afirmando "definitivamente sim" e sete respondendo "provavelmente sim". Isso evidencia que há um conhecimento sobre a crescente conscientização sobre os benefícios ambientais do coprocessamento de resíduos na sociedade brasileira, impulsionada pela preocupação com as mudanças climáticas, a busca por soluções sustentáveis para a gestão de resíduos e a pressão por práticas industriais mais responsáveis. Dois entrevistados se mostraram indecisos em relação à questão.

Um dos entrevistados destacou em seu comentário que a indústria de bebidas serve como um bom benchmarking para a economia circular e o uso de resíduos no ecossistema de produção, distribuição e consumo. Isso sugere que outras indústrias podem se beneficiar ao observar e aprender com as práticas sustentáveis adotadas por setores mais avançados em termos de gestão de resíduos e economia circular.

Afirmção 3: O contínuo desenvolvimento da infraestrutura para o coprocessamento de resíduos no Brasil reflete o compromisso crescente com soluções inovadoras e sustentáveis para o gerenciamento de resíduos, no entanto ainda há desafios logísticos a serem enfrentados entre fonte geradora e coprocessadora.

Quatorze dos respondentes se mostraram positivos em relação a afirmação, sendo que dez definitivamente concordam com a afirmação e quatro, acreditam que possivelmente a desafios que ainda impedem um amadurecimento mais acelerado. Um dos entrevistados afirmou que provavelmente não há desafios logísticos entre a fonte geradora e coprocessadora, não sendo uma barreira para a progressão do processo.

Além das afirmações objetivas, os entrevistados comentaram que a logística das pás é extremamente cara, sendo necessário o uso de guindaste e transportes especiais,

podendo ser um dos influenciadores direto do alto custo dessas operações, o que pode tendenciar os donos de parques eólicos a manter o componente nos próprios parques. As barreiras tributárias e geográficas tendem a inviabilizar projetos de economia circular por uma ausência de uma engenharia tributária interestadual, sendo um grande desafio para o Brasil. Um outro entrevistado cita que há exemplos muito positivos na Europa, onde o conhecimento intelectual pode ser transmitido para que esse tipo de operação seja mais assertivo, se dado início.

Afirmção 4: O cumprimento rigoroso das normas ambientais e regulamentações governamentais fortalece a credibilidade e a eficácia do coprocessamento de resíduos, impulsionando sua adoção e contribuindo para um futuro mais sustentável.

Cinco especialistas expressaram concordância integral de que o cumprimento de normas ambientais e regulamentações é fundamental para fornecer credibilidade à atividade de coprocessamento. Sete especialistas afirmaram "provavelmente sim", enquanto três indicaram "provavelmente não". Em um dos comentários, foi destacado que a viabilidade financeira do coprocessamento é um obstáculo significativo para impulsionar sua adoção.

Um segundo entrevistado observou que, embora a existência de leis possa fortalecer a credibilidade do coprocessamento, melhorias nas malhas viárias e flexibilização de tributações são essenciais para promover o transporte dos resíduos. Sem essas medidas, investir em tecnologias para coprocessamento pode ser em vão. Esses comentários ressaltam a importância não apenas do cumprimento das normas ambientais, mas também da infraestrutura e políticas adequadas para garantir o sucesso e a eficácia do coprocessamento de resíduos.

4.3.4. Grupo D: Viabilidade técnica do coprocessamento de resíduos provenientes de pás eólicas em fim de vida útil

Neste grupo foram oferecidas quatro afirmativas sobre aspectos da capacidade técnica de substituição de combustível em fornos de cimento, por resíduos de pás eólicos, bem como substituição de materiais primas, baseado nos últimos estudos

publicados por Liu et al. (2019), Hanes et al. (2021), Nagle et al. (2020), (Pickering, 2006) (Beauson et al., 2022) e EPRI.

Afirmção 1: No Brasil, o uso de resíduos de pás eólicas em recuperação energética por meio do coprocessamento pode ser uma solução viável e eficiente.

Doze dos entrevistados apresentaram uma postura positiva para a afirmação, sendo que cinco concordam em sua totalidade e sete afirmam que provavelmente o uso de pás eólicos em fim de vida útil pode ser uma fonte energética para fornos de cimento via coprocessamento de resíduos. Dois dos especialistas se mostraram indecisos e um afirmou que provavelmente essa iniciativa não venha a ter sucesso no Brasil.

Além das afirmações objetivas, houve quatro comentários, onde todos se alinham em relação a viabilidade. Os comentários abordam que o desenvolvimento e incentivo a indústria de coprocessamento pode ser uma solução futura para o passivo, no entanto faz-se necessário avaliar a composição do resíduo, realizar um teste de queima, e definir a absorção e aproveitamento calorífico desse material nos fornos de cimento.

Afirmção 2: O uso de pás eólicas para recuperação energética pode promover a redução de uso de combustíveis fósseis e redução do custo de fabricação do cimento, se tornando uma alternativa promissora para a gestão sustentável desses materiais.

Doze dos entrevistados apresentaram uma postura positiva para a afirmação, sendo que quatro concordam em sua totalidade e oito afirmam que provavelmente o uso de pás eólicos em fim de vida útil pode promover uma redução no consumo de combustíveis fósseis e reduzir o custo de fábricas de cimento. Um dos especialistas se mostrou indeciso e dois afirmara que provavelmente não essa não será uma alternativa promissora para a redução de consumo de combustíveis, tornando a operação de cimento menos onerosa.

Um dos entrevistados observa que, além dos desafios logísticos, os diferentes tipos e modelos de pá, quanto a composição, pode tornar o processo oneroso.

Afirmção 3: A caracterização detalhada dos resíduos de pás eólicas, incluindo sua composição química e física, é essencial para determinar sua adequação ao processo de coprocessamento.

Oito respondentes concordaram totalmente com a frase afirmando que faz-e necessário um maior entendimento sobre as características dos materiais a serem coprocessados provenientes de pás eólicas, necessitando de uma caracterização química e física. cinco respondentes concordaram parcialmente, e outros dois se mostraram indecisos.

Afirmção 4: A colaboração entre empresas do setor eólico, fabricantes de cimento e instituições de pesquisa é fundamental para impulsionar a inovação e desenvolvimento de melhores práticas no coprocessamento de resíduos de pás eólicas.

Todos os quinze respondentes demonstraram uma postura positiva em relação a essa afirmação, enfatizando a importância da colaboração entre diferentes setores para impulsionar a inovação e o desenvolvimento de melhores práticas no coprocessamento de resíduos de pás eólicas. A ênfase na cooperação entre empresas do setor eólico, fabricantes de cimento e instituições de pesquisa reflete o reconhecimento de que a solução para os desafios associados ao coprocessamento de resíduos requer uma abordagem multifacetada e colaborativa. Os especialistas concordam que a troca de conhecimento, experiências e recursos entre esses atores pode acelerar o progresso na identificação de soluções eficazes e sustentáveis para a gestão dos resíduos das pás eólicas, contribuindo assim para a promoção da economia circular e para a redução do impacto ambiental da indústria. Essa postura unânime reforça a necessidade de uma abordagem integrada e cooperativa para enfrentar os desafios complexos relacionados ao coprocessamento de resíduos de pás eólicas, destacando a importância do trabalho conjunto entre os diferentes atores envolvidos nesse processo.

4.3.5. Grupo E: Regulamentação e políticas públicas

Por fim, esse grupo se concentra na busca pela análise, aos olhos de especialistas, das regulamentações, obrigatoriedades e desafios relacionados à destinação dos resíduos provenientes de pás eólicas para recuperação energética em fornos de cimento. Este grupo busca que os especialistas examinem o cenário atual, identificando obstáculos e oportunidades para sua implementação.

Afirmção 1: As regulamentações referentes ao descarte de resíduos de pás eólicas, classificados como Classe II (Não perigosos e não inerte), desempenham um papel crucial na gestão ambiental e na promoção da sustentabilidade. No contexto das políticas públicas, é fundamental que haja uma estrutura regulatória clara e abrangente para orientar as práticas de descarte de resíduos de pás eólicas. Isso inclui a definição de padrões de manejo, transporte e disposição final desses resíduos, bem como a implementação de medidas de controle e fiscalização para garantir o cumprimento das normas estabelecidas.

Todos os quinze respondentes demonstraram uma postura positiva em relação à importância das regulamentações e políticas públicas no contexto da gestão ambiental e da promoção da sustentabilidade. Entre eles, oito especialistas enfatizaram que as regulamentações desempenham um papel crucial nesse sentido, destacando a necessidade de uma estrutura regulatória clara e abrangente para orientar as práticas de descarte de resíduos de pás eólicas. Esses especialistas reconhecem que regulamentações bem definidas são fundamentais para garantir a segurança ambiental e promover a adoção de práticas sustentáveis na indústria. Os demais respondentes também expressaram concordância, indicando que provavelmente as regulamentações desempenham um papel significativo nesse contexto. Esse consenso reflete a compreensão generalizada entre os especialistas de que políticas públicas e regulamentações eficazes são essenciais para impulsionar a gestão ambientalmente responsável dos resíduos de pás eólicas, bem como para promover a transição para uma economia mais sustentável.

Afirmção 2: Novas regulamentações são necessárias para orientar e regular o descarte e o reaproveitamento de resíduos de pás eólicas, garantindo práticas ambientalmente sustentáveis.

Quatorze dos respondentes enfatizaram a necessidade de novas regulamentações para regular e estabelecer regras claras sobre responsabilidades e práticas sustentáveis relacionadas aos resíduos de pás eólicas. Entre eles, nove afirmaram definitivamente que novas regulamentações são necessárias, enquanto

quatro indicaram que provavelmente sim. Esses especialistas reconhecem a importância de diretrizes claras e específicas para orientar as práticas de descarte e gestão desses resíduos, garantindo uma abordagem ambientalmente responsável e promovendo a sustentabilidade na indústria. No entanto, um dos entrevistados sugeriu que o Brasil possivelmente já possui regulamentações que orientam e regulam os geradores de resíduos dessa natureza.

Afirmção 3: A responsabilidade pela destinação adequada de resíduos de pás eólicas deve ser compartilhada entre fabricantes, operadores de parques eólicos e autoridades reguladoras.

Nove especialistas enfatizaram que a responsabilidade pela gestão dos resíduos de pás eólicas deve ser definitivamente compartilhada entre todos os envolvidos no ciclo de interesse da energia eólica. Esses especialistas reconhecem a importância da colaboração e cooperação entre diferentes partes interessadas para garantir uma abordagem abrangente e eficaz na gestão dos resíduos gerados pela indústria eólica. Três especialistas indicaram que provavelmente deveria haver um acordo de responsabilidade compartilhada, refletindo a complexidade e os desafios associados à definição clara das responsabilidades em um contexto multifacetado como esse. Um especialista se mostrou indeciso quanto a essa questão.

Por outro lado, dois especialistas afirmaram que a responsabilidade não deve ser compartilhada, assinalando "Provavelmente Não". Suas observações complementares sugerem que eles acreditam que a responsabilidade deve ser atribuída a grupos específicos de forma mais direta. Um deles argumentou que os proprietários dos parques eólicos devem ser os principais responsáveis, pois são eles que promovem e operam os projetos ao longo de sua vida útil. Enquanto isso, o outro especialista enfatizou que os fabricantes das turbinas eólicas têm a responsabilidade de fornecer soluções e documentação necessárias para que os proprietários possam gerir adequadamente os resíduos gerados. Esses comentários destacam diferentes perspectivas sobre a distribuição da responsabilidade e ressaltam a complexidade da questão envolvida na gestão de resíduos de pás eólicas.

Afirmção 4: A governança eficaz é crucial para o sucesso de projetos relacionados ao coprocessamento de resíduos de pás eólicas, exigindo coordenação entre diferentes partes interessadas e níveis de governo.

A totalidade dos quinze participantes expressou uma perspectiva favorável quanto à significância da governança eficiente para o sucesso de empreendimentos associados ao coprocessamento de resíduos provenientes de pás eólicas. Foi reconhecido por eles que tal governança desempenha um papel essencial na asseguuração da coordenação entre uma ampla gama de partes interessadas e instâncias governamentais envolvidas nessas iniciativas. Esta coordenação engloba desde empresas atuantes no setor eólico e fabricantes de cimento até instituições de pesquisa e autoridades governamentais em esferas local e nacional. A colaboração entre esses agentes é primordial para estabelecer políticas transparentes, alocar recursos de maneira apropriada, implementar práticas sustentáveis e assegurar a conformidade com os dispositivos regulatórios.

4.4. Discussões dos resultados

Estima-se que em 2026 cerca de 2.779 toneladas de resíduos serão produzidas apenas neste ano, marcando o início de uma trajetória preocupante. À medida que mais turbinas alcançam o fim de suas vidas úteis, espera-se um aumento exponencial na geração de resíduos, prevendo-se um pico notável em 2034, quando se espera a produção de 37.256 toneladas de resíduos. Isso coloca pressão adicional sobre os sistemas de gestão de resíduos, destacando a urgência de soluções mais eficazes e sustentáveis.

Os especialistas entrevistados ressaltaram uma demanda crescente por parques em processo de desmontagem nos próximos 10 anos, enquanto também enfatizaram a necessidade de considerar alternativas, como *retrofit*, modernização e repotenciação, para estender a vida útil das turbinas eólicas e reduzir o volume de resíduos. Além disso, observaram que avanços tecnológicos e contratos de extensão de vida útil podem

impulsionar a indústria de reparos, mas alertaram para a necessidade de estudos para reduzir custos.

No contexto brasileiro, embora ainda não haja um problema significativo em relação à gestão de resíduos de turbinas eólicas, espera-se que isso se torne uma preocupação futura. A previsão de geração de resíduos em 2035 oferece uma oportunidade substancial para substituir materiais de alto impacto ambiental na fabricação de cimento, alinhando-se a práticas mais sustentáveis e contribuindo para a redução das emissões de carbono.

Os especialistas também mencionaram a indústria de coprocessamento como uma solução futura, ressaltando a importância de avaliar a composição dos resíduos e seu potencial energético. A existência de unidades de coprocessamento em todo o país reflete o papel crucial dessas instalações na gestão de resíduos, oferecendo oportunidades significativas de recuperação energética e também para a substituição de materiais base da fabricação de cimento.

Apesar do progresso no coprocessamento de resíduos, ainda há espaço para expansão, especialmente quando comparado ao volume de produção de cimento no Brasil. Isso destaca a necessidade de investimentos e políticas que incentivem o crescimento dessa prática.

A inviabilidade logística e a falta de obrigatoriedade de direcionamento para unidades de recuperação energética são fatores que influenciam as decisões dos geradores de resíduos. A logística complexa e os custos associados ao transporte de pás eólicas são desafios adicionais que podem dificultar a adoção de práticas sustentáveis.

A colaboração entre o setor público e privado é fundamental para superar esses desafios, otimizando rotas de transporte e reduzindo custos operacionais. Melhorias na infraestrutura viária e flexibilização tributária também são essenciais para promover o transporte de resíduos.

Novas tecnologias devem ser avaliadas, como trituradores de resíduos móveis. Esses equipamentos poderão facilitar o transporte e mobilidade, e representarão uma barreira a menos para viabilizar a queima dos resíduos em fornos de cimento.

A atribuição da responsabilidade sobre os resíduos gerados é outro ponto de discussão, com diferentes perspectivas sobre quem deve assumir essa responsabilidade. Isso destaca a complexidade da gestão de resíduos de turbinas eólicas e a necessidade de uma abordagem colaborativa e abrangente.

5 CONCLUSÃO

Este estudo se propôs a realizar uma análise aprofundada dos impactos decorrentes do descarte inadequado de resíduos provenientes das pás eólicas, resultantes do processo de desativação dos parques eólicos no contexto brasileiro. O objetivo central desta pesquisa foi avaliar a viabilidade de utilizar esses resíduos como fonte de energia térmica em fábricas de cimento, com o intuito de reduzir os impactos ambientais associados a essa prática e, ao mesmo tempo, promover um ciclo econômico sustentável, objetivo que foi plenamente atingido.

Para embasar essa análise, realizou-se uma revisão ampla do estado da arte, abordando a literatura disponível sobre o tema no Brasil. No entanto, constatou-se uma lacuna significativa nesse aspecto, com poucos estudos dedicados ao volume projetado para o descarte de pás eólicas e sua possível utilização como fonte de recuperação energética por meio do coprocessamento de resíduos. Como alternativa, recorreu-se a estudos de outros países como referência para estabelecer um percentual aceitável de resíduos que podem ser incorporados no processo de fabricação de cimento. Tanto a literatura especializada quanto os resultados de questionários aplicados a especialistas do setor destacam a crescente preocupação com os efeitos ambientais associados a esse processo.

Os resultados obtidos indicam que esta pesquisa cumpriu seu objetivo ao apresentar uma alternativa tecnológica viável e prontamente disponível no mercado brasileiro para o descarte apropriado das pás de turbinas eólicas após o término de sua vida útil.

Para projetar o cenário futuro até 2035, com base na idade dos parques eólicos brasileiros, foram realizadas projeções da quantidade de pás eólicas a serem descartadas, bem como do potencial de resíduos provenientes delas. Essas projeções evidenciaram os desafios e oportunidades associados ao descomissionamento desses ativos. Observou-se que, embora a quantidade gerada até 2033 seja modesto, é esperado que atinja seu pico em 2034, com uma geração prevista de resíduos considerável, resultante do volume de parques comissionados a partir de 2014.

Diante da extensão territorial do Brasil, foram apresentados os desafios logísticos para que o material descartado saia dos centros geradores de resíduos, parques eólicos, para unidades coprocessadoras, ficando claro que há necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento primário dos resíduos (corte e trituração) ainda nos parques eólicos, evitando que transportes especiais sejam contratados para o transporte das pás ainda em seu padrão de projeto, o que pode representar um alto custo de movimentação devido as dimensões e peso desses componentes.

As respostas e comentários dos especialistas consultados enfatizaram a necessidade de uma avaliação minuciosa das características específicas dos materiais envolvidos, bem como do impacto direto que sua utilização na fabricação de cimento pode ter, tanto em termos de processo quanto de custo. Eles ressaltaram a importância crucial de estudos logísticos detalhados, que não apenas facilitem o transporte desses materiais entre o ponto de geração e o de destino, mas também otimizem essa movimentação, levando em conta as dimensões e o peso desses componentes.

Além disso, os especialistas convergiram na urgência de se estabelecerem incentivos e/ou regulamentações mais claras e abrangentes, que definam adequadamente os responsáveis pela destinação adequada desses resíduos. Tais medidas seriam fundamentais não apenas para garantir a conformidade legal, mas também para promover uma mudança efetiva de comportamento por parte das empresas, incentivando-as a adotar práticas mais sustentáveis. Diante dessas considerações especializadas, torna-se evidente que as empresas tendem a adotar uma postura cautelosa, aguardando a definição de diretrizes por parte de órgãos oficiais ou a implementação de incentivos financeiros que compensem os custos associados a uma tomada de decisão em prol da sustentabilidade. Essa atitude reflete a necessidade premente de se obter um retorno financeiro líquido positivo para investimentos em medidas que visem mitigar os impactos ambientais. Enquanto essas questões não são plenamente resolvidas, a prática de descarte em aterros sanitários continua sendo, lamentavelmente, a norma predominante.

A contribuição desta pesquisa para a ciência é significativa, pois consolida a alternativa de coprocessamento dos resíduos provenientes das pás eólicas utilizadas no descomissionamento de parques eólicos. Esta abordagem está sendo reconhecida e

explorada em artigos internacionais, publicados em periódicos renomados, que são considerados fontes confiáveis e importantes de pesquisa acadêmica.

Para as empresas que atuam na geração de energia eólica, a pesquisa esclarece que, embora a energia gerada seja renovável, ela não pode ser automaticamente considerada sustentável. Isso ressalta a necessidade urgente de desenvolver soluções ambientalmente aceitáveis para os resíduos gerados ao longo da cadeia de produção.

Além disso, a pesquisa destacou o potencial dos sistemas de coprocessamento de resíduos como uma maneira eficaz de lidar com grandes volumes de resíduos e, assim, facilitar a redução do passivo ambiental. Isso direciona ainda mais a indústria de fabricação de cimento a buscar reduções significativas nas emissões de CO₂ por tonelada de cimento, uma meta amplamente divulgada em vários canais de comunicação.

Para a sociedade em geral, este trabalho não apenas oferece insights valiosos sobre a visão da academia em relação ao tema do coprocessamento de resíduos de pás eólicas, mas também alerta de forma contundente as partes interessadas sobre as consequências potencialmente danosas de uma gestão inadequada de resíduos. Ele ressalta que, se não forem tomadas medidas adequadas, essa gestão deficiente pode se tornar uma fonte significativa de poluição na próxima década.

É crucial destacar que, diante do aumento contínuo da utilização de energia eólica como uma fonte de energia renovável, é imperativo adotar uma abordagem proativa para mitigar os impactos ambientais associados. Isso significa não apenas lidar de forma eficaz com os resíduos gerados durante o ciclo de vida das turbinas eólicas, mas também promover práticas sustentáveis em todas as etapas da cadeia de produção e consumo de energia eólica.

Portanto, este trabalho não apenas informa sobre os desafios e oportunidades relacionados ao coprocessamento de resíduos de pás eólicas, mas também destaca a necessidade urgente de ações coordenadas e abrangentes para garantir que a transição para uma economia de energia mais sustentável seja verdadeiramente benéfica para o meio ambiente e para as gerações futuras.

5.1. Proposições para trabalhos futuros

- Desenvolvimento de um plano de negócios para avaliação da viabilidade e rentabilidade no mercado brasileiro, considerando os custos operacionais e logísticos desde a geração de resíduos até o processamento e a venda do produto final, que é o cimento.
- Elaboração de estudos voltados para o aumento da vida útil desses componentes, uma vez que não foram encontradas referências sobre a prolongação da longevidade dos ativos.

REFERÊNCIAS

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias – Boletim Anual, 2021. 19p. Disponível em: <www.abeeolica.org.br>. Acesso em 11 jan 2023.

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias – Boletim Anual, 2022. 19p. Disponível em: <www.abeeolica.org.br>. Acesso em 20 nov 2023.

ACP Wind Blade Working Group. January 2023. Decommissioned Wind Turbine Blade Management Strategies. Disponível em: https://cleanpower.org/wp-content/uploads/2023/01/ACP_BladeRecycling_WhitePaper_230130.pdf. Acesso em: 13 de dezembro de 2023.

AGÊNCIA BRASIL. Capacidade de geração de energia eólica deve bater recorde neste ano. Publicado em 04/04/2023 - 06:20 Por Alana Gandra - Repórter da Agência Brasil - Rio de Janeiro. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/>. Acesso em julho 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>. Acesso em: 02 maio 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 03 maio 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). SIGA: Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Data de referência de dados: 02 de janeiro de 2024). Acesso em: 08 de novembro de 2023.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Portaria nº 27, de 06 de fevereiro de 2006. Brasília, DF: ANP, 2006.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução ANP nº 17, de 18 de março de 2015. [Diário Oficial da União (DOU), 20 de março de 2015]. Retificada no DOU de 23 de abril de 2015.

AKBAR, A.; LIEW, K. M. Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 274, p. 123001, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123001.

ALIANCYS. Let's Talk Recycling – Renewable Value from Composites. 2016. Disponível em: https://www.ilecsysrail.co.uk/sites/default/files/inline-files/Aliancys%20Brochure%20Recycling%20%28November%202016%29_0.pdf. Acesso em: 22 de dezembro de 2023.

ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; KISSING, W. Classification of Composite Materials. In: *Mechanics of Composite Structural Elements*. 2nd ed. Springer, 2018. p. 3-18. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8935-0_1.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M; ZACK, J.; DE SÁ, A. L. Atlas do potencial eólico brasileiro, Brasília-DF: MME – Ministério das Minas e Energia / ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras, 2001.

APPOLINÁRIO, F. Dicionário de Metodologia Científica. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2011. 295p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Panorama do Coprocessamento 2023 (Ano base 2022). São Paulo, 2023. 20p.

BEAUSON, A., LAURENT, D. P., RUDOLPH, J., & PAGH JENSEN. The complex end-

of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 155, 2022, p. 111847. ISSN 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111847.

BEAUSON, J.; MADSEN, B.; TONCELLI, C.; BRØNDSTED, P.; BECH, J. I. Recycling of Shredded Composites from Wind Turbine Blades in New Thermoset Polymer Composites. *Composites: Part A*, Roskilde, Dinamarca, v. 90, p. 390-399. Julho 2016. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.07.009.

BELATO, Mariana Natale. Análise da geração de poluentes na produção de Cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais. Itajubá, (MG): [s.n.], 2013. 171 p. il. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Orientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva.

BERNARDO, A. C. S. M. Otimização estocástica multi-objetivos na produção de cimento Portland com coprocessamento de resíduos e adição de mineralizadores. Tese (Doutorado), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

BOMGARDNER, M. M.; SCOTT, A. 2018. Recycling renewables. Can we close the loop on old batteries, wind turbines, and solar panels to keep valuable materials out of the trash? *Chemical & Engineering News* 96: 15, CEN [online]. Disponível em: <https://cen.acs.org/energy/renewables/Recycling-renewables/96/i15>. Acesso em: 23 de agosto de 2023.

BRAHMS, T.; KÜHNE, U.; ALBERS, H.; GREINER, S. Feasibility Study for the Recycling of Composite Material (MaVeFa). *DEWEK Proceedings*, 2007.

BRASIL. Decreto Nº 10.936, de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2022.

BRASIL. Decreto Nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Institui o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece seu diagnóstico e sua avaliação, define sua realidade, seus objetivos, suas diretrizes, suas estratégias, seus programas, suas normas e sua destinação para a coleta de resíduos. Brasília, DF, 2022.

BRASIL. Decreto Nº 11.044, de 13 de abril de 2022. Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem - Recicla+. Brasília, DF, 2022.

BRASIL. Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017. Estabelece normas para assegurar a isonomia na fiscalização e no cumprimento das obrigações imputadas aos fabricantes, aos importadores, aos distribuidores e aos comerciantes de produtos, seus resíduos e suas embalagens sujeitos à logística reversa obrigatória. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 out. 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Decreto/D9177.htm. Acesso em: 24 de setembro de 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 18 de agosto de 2023.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 18 de agosto de 2023.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as diretrizes sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 fev. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm. Acesso em: 22 de agosto de 2023.

BRASIL. Lei nº 9.966, de 28 de abril de 2000. Dispõe sobre as diretrizes sobre a

prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 abr. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9966.htm. Acesso em: 18 de agosto de 2023.

BRASIL. Lei nº 9.974, de 6 de junho de 2000. Dispõe sobre as diretrizes sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 jun. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9974.htm. Acesso em: 18 de agosto de 2023.

BRØNDSTED, Povl; LILHOLT, Hans; LYSTRUP, Aage. Composite Materials for Wind Power Turbine Blades. Annu. Rev. Mater. Res., v. 35, p. 505–538, 2005. DOI: 10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada. 4a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7ª edição. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CAMPBELL, F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. Elsevier Science & Technology, 2004.

CHERRINGTON, R. et al. Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. Energy Policy, v. 47, p. 13-21, 2012. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.03.076.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Norma CNEN NN 9.01: Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas. Resolução CNEN nº 133, de novembro

de 2012.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Norma CNEN NN 9.02: Gestão dos Recursos Financeiros Destinados ao Descomissionamento de Usinas Nucleoelétricas. Resolução CNEN nº 204, de outubro de 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução Nº 499, de 06 de outubro de 2020. Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Brasília, DF, 2020.

CONSORTIUM DECOMBLADES. Consórcio DecomBlades recebe financiamento para um grande projeto de reciclagem de pás de turbinas eólicas de amplo alcance. Publicado em 25 de janeiro de 2021. Disponível em: <https://www.vestas.com/pt/media/blog/sustainability/decomblades-consortium-awarded-funding>. Acesso em: Junho de 2023.

CORBUCCI NETO, Mario. Política Nacional de Resíduos Sólidos e a Responsabilidade Compartilhada. Revista Meio Ambient Industrial, São Paulo, 12 de abril de 2012.

DEVOLVA. Sistema Devolva. Disponível em: <http://www.devolva.com.br/a-devolva/historia/>. Acesso em: 03 de outubro de 2023.

Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council. Disponível em: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2008/98/contents>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

Diretiva 2000/53/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, datada de 18 de setembro de 2000, aborda veículos em fim de vida e inclui declarações da Comissão.

DORIGATO, A. Recycling of Thermosetting Composites for Wind Blade Application. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, v. 4, p. 116-132, 2021. DOI:

10.1016/j.aiepr.2021.02.002.

EHRIG, R.J. *Plastics recycling*. Nova Iorque: Hnser Publishers, 1992.

Electric Power Research Institute (EPRI). *Co-Processing of Decommissioned Wind Turbine Blades in Cement Production: Literature Review and Evaluation of Wind Turbine Blade Sample Tests*. Report No. 3002022690. 2022. Disponível em: epri.com. Acesso em: 29 de novembro de 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. “Atlas de eficiência energética do Brasil 2020”. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf. Acesso em: 05 de Jul. de 2023.

EPE – Empresa de pesquisa energética. *Empreendimentos eólicos ao fim da vida útil*. No. EPE-DEE-NT-012/2021-r0, 2021.

FAITLI, Jozsef. *Matrix Model Simulation of a Vertical Roller Mill with High-Efficiency Slat Classifier*. Chemical Engineering & Technology, May 2014. DOI: 10.1002/ceat.201300665.

FARZAN, Shahla. *How to recycle a 150-foot wind turbine blade? Haul it to Louisiana, MO*. Health, Science, Environment. St. Louis Public Radio. Published May 27, 2022 at 5:00 AM CDT. Disponível em: <https://news.stlpublicradio.org/health-science-environment/2022-05-27/how-to-recycle-a-150-foot-wind-turbine-blade-haul-it-to-louisiana-mo>. Acesso em: 21 jul. 2023.

FERNANDES, A. P. *Potencial de Utilização de Resíduos de Filmes Poliméricos e de Fibras de Vidro Provenientes do Processo de Fabricação de Pás Eólicas*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2019.

FERREIRA, H. T. Energia Eólica: Barreiras a Sua Participação no Setor Elétrico Brasileiro. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Fiberline Composites. Recycling. 2019. Disponível em: <https://fiberline.com/recycling>. Acesso em: 17 de outubro de 2023.

FIGUEIREDO, N.M.A. Método e metodologia na pesquisa científica. 2a ed. São Caetano do Sul, São Paulo, Yendis Editora, 2007.

FLSMIDTH. Disponível em: <https://www.flsmidth.com/>. Acesso em: 28 de novembro de 2023.

FONTE, R., & XYDIS, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. Journal of Environmental Management, junho 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112269.

FRANCIS, Scott. Decommissioned wind turbine blades used for cement co-processing | CompositesWorld. CompositesWorld, [S.l.], [s.n.], 18 jul. 2019. Disponível em: <https://www.compositesworld.com/articles/recycled-composites-from-wind-turbine-blades-used-for-cement-co-processing>. Acesso em: 21 julho de 2023.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). Fabricação de cimento e controles ambientais do processo: módulo I; Coprocessamento de resíduos industriais: módulo II. 2008. 60 p.

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. Composite Materials: Design and Applications. CRC Press, 2002.

GE NEWS. Concrete Benefits: Recycling Old Wind Turbine Blades Could Help Cement Industry Cut CO2 Emissions. [S.l.], [s.n.], 09 dez. 2020. Disponível em:

<https://www.ge.com/news/reports/concrete-benefits-recycling-old-wind-turbine-blades-could-help-cement-industry-cut-co2>. Acesso em: 21 jul. 2023.

GENTRY, T.R., AL-HADDAD, T., BANK, L.C., ARIAS, F.R., NAGLE, A., & LEAHY, P. (2020). Structural Analysis of a Roof Extracted from a Wind Turbine Blade. *Journal of Architectural Engineering*, 26, 04020040. DOI: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000440.

GIGNAC, J. Wind Turbine Blades Don't Have To End Up In Landfills. Union of Concerned Scientists (blog). Disponível em: <https://blog.ucsusa.org/jamesgignac/wind-turbine-blades-recycling>. Acesso em: Dezembro de 2023.

GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GRUNWALD, A. Technology Assessment: Concepts and Methods. *Philosophy of Technology and Engineering Sciences*. p. 1103–1146, 2009.

GINDER, R.S., & OZCAN, S. (2019). Recycling of commercial E-glass reinforced thermoset composites via two temperature step pyrolysis to improve recovered fiber tensile strength and failure strain. *Recycling*, 4. DOI: 10.3390/recycling4020024.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind Report: 2022. Organização: Global Wind Energy Council. Autor: LEE, Joyce; ZHAO, Feng. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>.

GLOSSER, D.; RUSSELL, L.; STRIBY, P. Glass Fiber Waste from Wind Turbines: Its Chemistry, Properties, and End-of-life Uses. *IntechOpen*, 2022. Submetido em: 24 out. 2022. Revisado em: 2 nov. 2022. Publicado em: 21 nov. 2022. DOI: 10.5772/intechopen.108855.

GLOSSER, Deborah; SANTYKUL, Eli; FAGAN, Eric; SURANENI, Prannoy. A thermodynamic perspective on wind turbine glass fiber waste as a supplementary

cementitious material. *Cement*, v. 9, 2022, p. 100039. DOI: 10.1016/j.cement.2022.100039.

GOPALRAJ, Sankar Karuppannan; KÄRKI, Timo. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Applied Sciences*, 2020, 2:433. DOI: 10.1007/s42452-020-2195-4.

GREWAL, O. D. S. An analysis of the challenges and opportunities of End-Of-Life management of wind turbine blades in Denmark. 2020. 63 f. University of Southern Denmark.

GÜNTHER, H. (2006). Pesquisa Qualitativa Versus Pesquisa Quantitativa: Esta É a Questão? *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, 22(2), 201-210.

GURIT. Structural Core Materials. Disponível em: <https://www.gurit.com/structural-core-materials/>. Acesso em: 23 de novembro de 2023.

HANES, R., GHOSH, T., KEY, A., & EBERLE, A. (2021). The Circular Economy Lifecycle Assessment and Visualization Framework: A Case Study of Wind Blade Circularity in Texas. *Frontiers in Sustainability*, 2. DOI: 10.3389/frsus.2021.671979.

HARTMAN, Liz. Wind Turbines: The Bigger, the Better. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. August 16, 2022. U.S. Department of Energy. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2024.

HARTMAN, Liz. Wind Turbines: The Bigger, the Better. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. August 16, 2022. U.S. Department of Energy. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>. Acesso em: Julho de 2023.

IEA (2013) Technology roadmap: Wind energy. Technical report, IEA. Tech. Rep. International Energy Agency. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/259e726a-348b-4a3c-9580-286eb365c098/Wind_2013_Roadmap.pdf. Acesso em : 12 de fevereiro de 2024.

IERIDES, M., FERNANDEZ, V., VERBENKOV, M., BAX, L., DEVIC, A.-C. Polymer Composites Circularity, vol. 2018. SusChem Materials Working Group, 2018.

ILYAS, M. et al. Plastic waste as a significant threat to environment - a systematic literature review. Rev Environ Health, v. 33, p. 383-406, 2018. DOI: 10.1515/reveh-2017-0035 Institute for Energy Research. The Cost of Decommissioning Wind Turbines is Huge. 2019. Disponível em: <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/wind/the-cost-of-decommissioning-wind-turbines-is-huge/>. Acesso em: 19 de julho de 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-1:2019 - Turbinas eólicas – Parte 1: Requisitos de projeto. Genebra, 2019.

ISO 14040:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.

JENSEN, J. P.; SKELTON, K. Wind Turbine Blade Recycling: experiences, challenges and possibilities in a circular economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Aalborg, Dinamarca, v. 97, p. 165-176. Agosto, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.041.

JENSEN, J. P.; SKELTON, K. Wind Turbine Blade Recycling: experiences, challenges and possibilities in a circular economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Aalborg, Dinamarca, v. 97, p. 165-176. Agosto, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.041.

JOB, S. Recycling Glass Fibre Reinforced Composites – history and progress. Reinforced Plastics. V. 57, n. 5, p. 19-23. 2013. DOI:10.1016/S0034-3617(13)70151-6.

KARAVIDA, S.; NÖMMEK, R. Waste Management of End-of-Service Wind Turbines, Aalborg University, 2015. Disponível online: <https://projekter.aau.dk/projekter/files/213319772>. Acesso em: 27 de novembro de 2023.

KARAVIDA, S.; PEPONI, A. A. Wind Turbine Blade Waste Circularity Coupled with Urban Regeneration: A Conceptual Framework. *Energies* 2023, 16, 1464. DOI: 10.3390/en16031464.

KARIDIS, Arlene. Veolia and GE Renewable Energy Recycle Wind Turbine Blades. *Waste360.com*, [S.l.], [s.n.], 17 fev. 2021. Disponível em: <https://www.waste360.com/energy/veolia-and-ge-renewable-energy-recycle-wind-turbine-blades-cement-industry-applications>. Acesso em: 21 julho de 2023.

KAW, A. K. *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press, 1997.

KERSTING, D. F. K. *Reciclagem de aparas de pás eólicas para produção de elementos filtrantes para tratamento de água*. São Paulo, 2019. 122 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

KNUTSON, K. 2019. Wind farm repowering and decommissioning is big business. *Energy Central*. Disponível em: <https://energycentral.com/c/cp/wind-farm-repowering-and-decommissioning-big-business>. Acesso em: Novembro de 2023.

KÖCHE, José Carlos. *Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa*. Petrópolis, RJ: Vozes, 2011.

KOSCIULEK, A.; NIXDORF, K. Como uma empresa mantém as pás de turbinas eólicas fora dos aterros sanitários. *Business Insider*, 10 dez. 2021. Disponível em: <https://www.businessinsider.com/wind-turbine-blades-landfill-recycle-world-wide-waste-2021-12>. Acesso em: 16 fevereiro 2024.

KRÄMER, Sebastian; LEÓN, Fernando; LEWKE, Bastian. Experimental Setup for Lightning Current Measurement and Impact Localization Based on Fiber Optic Current Sensors. In: International Conference on Lightning and Static Electricity, 2007, Paris, France, 28-31 August.

LA MANTIA, F.P. (ed.) Handbook of plastics recycling. Shawbury: Rapra Technology, 2002.

LAHUERTA, F.; KOORN, N.; SMISSAERT, D. Wind turbine blade trailing edge failure assessment with sub-component test on static and fatigue load conditions. Composite Structures, Elsevier, v. 204, p. 755–766, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.112

LANTZ, E., Leventhal, M., & Baring-Gould, I. (2013). Wind Power Project Repowering: Financial Feasibility, Decision Drivers, and Supply Chain Effects (NREL/TP--6A20-60535). DOI:10.2172/1117058.

LARSEN, K. Recycling Wind Turbine Blades. Renewable Energy Focus. v. 9, n. 7, p. 70-73. 2009. DOI:10.1016/S1755-0084(09)70045-6

LEE, H.; NEVILE, K. Handbook of epoxy resins. McGraw Hill, 1968.

Lei Nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica.

LIBERATI, A.; ALTMAN, D. G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GATZSCHE, P. C.; IOANNIDIS, J. P. A.; MOHER, D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and Elaboration. Annals of Internal Medicine. v. 151, 2009. DOI: 10.1136/bmj.b2700.

LIU, P., MENG, F., BARLOW, C.Y. Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. *Journal of Cleaner Production*, Volume 212, 1 March 2019, Pages 1268-1281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.043.

LIU, P.; BARLOW, Y. Wind Turbine Blade Waste in 2050. *Waste Management*, Cambridge, Reino Unido Grã-Bretanha, v. 62, p. 229-240, Fevereiro 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.

MA, S.; WEBSTER, D. C. Degradable thermosets based on labile bonds or linkages: a review. *Prog Polym Sci*, v. 76, p. 65-110, 2018. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2017.07.008

MACHUCA, M. N. Análise ambiental, técnica e econômica da pós operação de parques eólicos. Trabalho de conclusão de curso em engenharia sanitária e ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

MALLIC, P. K. *Fiber-Reinforced Composite: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press, 2007. DOI: 10.1201/9781420005981.

MALLICK P.K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, Third Edition (Dekker Mechanical Engineering), CRC Press, 2007.

MANO, E.B.; PACHECO, E.B.A.V. e BONELLI, C.M.C. *Meio ambiente, poluição e reciclagem*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MANRICH, S.; FRATTINI, G. e ROSALINI, A.C. *Identificação de plásticos: uma ferramenta para a reciclagem*. São Carlos: Ed. da UFSCar, 1997.

MANZINI, E. J. A entrevista na pesquisa social. *Didática*, São Paulo, v. 26/27, p. 149-158, 1990/1991.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de Metodologia Científica. 7ª ed. São Paulo, Atlas, 2010.

MARSH, G. What's to be done with 'Spent' Wind Turbine Blades? Renewable Energy Focus. v.22, p. 20-23. Dezembro, 2017. DOI: 10.1016/j.ref.2017.10.002>.

MARTÍNEZ, E.; LATORRE-BIEL, J.I.; JIMÉNEZ, E.; SANZ, F.; BLANCO, J. 2018. Life cycle assessment of a wind farm repowering process. Renewable and Sustainable Energy Reviews 93 (2018) 260–271. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.044.

MARTINS, G., & CORNACCHIONE, E. (2021). Revista Contabilidade Vista & Revista, ISSN 0103-734X, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, v. 32, n. 1, p. 1-5, jan./abr.

MASTEMBERG, D. B. Simulation and testing of resin infusion manufacturing processes for large composite structures. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Montana State University, 2004.

MATTHEW F. L. et al. Finite element modeling of composite materials and structures. CRC Press, 2000.

MAY, C. A. Epoxy resins. 2a edição. New York: Marcel Dekker, Inc., 1988. 1242 p.

MICHAEL, C. Y. N. Airframe structural design: Practical design information and data on aircraft structure. Los Angeles: Conmilit Press Ltd., 1988.

MILANESE, A. C. Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de sisal e de vidro. 2008. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

MISHNAEVSKY Jr., L. Recycling of wind turbine blades: Recent developments. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 39, p. 100746, 2023. DOI: 10.1016/j.cogsc.2022.100746.

MISHNAEVSKY JR., L., BRANNER, K., PETERSEN, H. N., BEAUSON, J., MCGUGAN, M., & SØRENSEN, B. F. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10, 1285. DOI: 10.3390/ma10111285. 2017.

Nações Unidas Brasil. População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU. 17 junho 2019. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83427-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-deve-chegar-97-bilh%C3%B5es-de-pessoas-em-2050-diz-relat%C3%B3rio-da-onu>. Acesso em: Junho de 2023.

NAGLE, Angela J.; DELANEY, Emma L.; BANK, Lawrence C.; LEAHY, Paul G. A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*, Volume 277, 20 December 2020, p. 123321. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123321.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Technology Readiness Level. Disponível em: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level. Acesso em: 28 de novembro de 2023.

NASSEH, J. Processo de infusão a vácuo em Composites/Jorge Nsseh – Rio de Janeiro – 2020 – 376 páginas. ISBN: 978-65-0015756-7.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology. Washington, DC: The National Academies Press, 1991. DOI: 10.17226/1824.

NBR 11578: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

NILSEN, A. R. Combustion of large solid fuels in cement kilns. 2012. 868 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química e Bioquímica, Technical University of Denmark, Lyngby, 2012.

NOGUEIRA, C. L. Obtenção e caracterização de compósitos termoplásticos avançados à base de matrizes de poli(propileno) reforçadas com fibra de carbono. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

NOVAIS, R. M.; CARVALHEIRAS, J.; SEABRA, M. P.; PULLAR, R. C.; LABRINCHA, J. A. Effective Mechanical Reinforcement of Inorganic Polymers Using Glass Fibre Waste. *Journal of Cleaner Production*. Aveiro, Portugal, v. 166, p. 343-349, Julho, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.242.

OLIVEIRA, Gabriel Augusto Rodrigues Nunes. Critérios de projeto para moinhos de cimento Portland. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012. 107 p. (Projeto Final de Curso) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2012. Orientador: Abraham Zakon.

OLIVEUX, Géraldine; DANDY, Luke O.; LEEKE, Gary A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, vol. 72, 2015, p. 61–99. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.

ORTEGON, K.; NIES, L. F.; SUTHERLAND, J. W. Preparing for End of Service Life of Wind Turbines. *Journal of Cleaner Production*, West Lafayette, IN, USA, v. 39, p. 191-199, agosto de 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.08.022.

OVERCASH, M.; TWOMEY, J.; ASMATULU, E.; VOZZOLA, E.; GRIFFING, E. Thermoset composite recycling—Driving forces, development, and evolution of new opportunities. *J. Compos. Mater.* 2017, 52, 1033–1043. DOI: 10.1177/0021998317720.

PAULA, L. G. Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Coprocessamento de Misturas de Resíduos. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Itajubá, MG. Fevereiro de 2009.

PAULSEN, E. B.; ENEVOLDSEN, P. A Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades. *Energies*, v. 14, 2021, p. 4247. DOI: 10.3390/en14144247.

PICKERING, S.J. Recycling technologies for thermoset composite materials-current status. *Composites Part A Appl Sci Manuf*, 2006, 37:1206–15. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.05.030.

PICKERING, S.J., KELLY, R.M., KENNERLEY, J.R., RUDD, C.D., FENWICK, N.J. A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites. *Composites Science and Technology*, Volume 60, Issue 4, 1 March 2000, Pages 509-523. DOI: 10.1016/S0266-3538(99)00154-2.

PIMENTA, S.; PINHO, S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. *Waste Manag*, v. 31, p. 378-392, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.

PINTO, Lucía Iracema Chipponelli; MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 10 out. 2017. DOI: 10.4136/ambi-agua.2064.

PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 274, de 30 de abril de 2019. Regulamenta a recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos.

POST, Wouter; SUSA, Arijana; BLAAUW, Rolf; MOLENVELD, Karin; KNOOP, Rutger J.

I. A review on the potential and limitations of recyclable thermosets for structural applications. *Polymer Reviews*, vol. 60, no. 2, 2020, p. 359-388. DOI: 10.1080/15583724.2019.1673406.

RADER, C.P; BALDWIN, S.L.; SADLER, G.D. e STOCKEL, R.F. (Ed.) *Plastics, Rubber and Paper Recycling: A Pragmatic Approach*. American Chemical Society, Washington, 1995.

RAMIREZ-TEJEDA, K.; TURCOTTE, D. A.; PIKE, S. Unsustainable Wind Turbine Blade Disposal Practices in the United States. *New solutions: a journal of environmental and occupational health policy*, v. 26, n. 4, p. 581–598, 2017. DOI: 10.1177/1048291116676098.

RAMOS, Márcio Dimas. *Estudo da Formação e Emissão de Poluentes na Atmosfera Originários do Coprocessamento de Resíduos em Fábricas de Cimento*. 2015. 125 f. Tese (Doutorado) -Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

REGES, Jonas Platini et al. Thermographic Image Processing Application in Solar Followers. *IEEE Latin America Transactions*, v. 13, n. 10, p. outubro de 2015. DOI: 10.1109/TLA.2015.7387242.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; ESPÍRITO SANTO, B. C. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. *Eng Sanit Ambient*. Belo Horizonte, v. 16, n. 1, p. 1-10, jan./mar. 2011. DOI: 10.1590/S1413-41522011000100003.

SÁ-SILVA, J. R.; ALMEIDA, C. D.; GUINDANI, J. F. (2009). Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. *Revista Brasileira de História & Ciências Sociais*, Ano I, Número I, Julho.

SAKELLARIOU, N. Current and potential decommissioning scenarios for end-of-life

composite wind blades. *Energy Syst*, 2018, 9, 981–1023. DOI: 10.1007/s12667-017-0245-9.

SANCHES, C., MEIRELES, M., & SORDI, J. O. de (2011, agosto). Análise qualitativa por meio da lógica paraconsciente: método de interpretação e síntese de informação obtida por escalas likert. *Anais do Encontro de Ensino e Pesquisa em Administração e Contabilidade*, João Pessoa, PB, Brasil, 3.

SANJAY, K. M. *Composites Manufacturing: Materials, Product and Engineering*. CRC Press, 2002.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ FILHO, A. O. Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento; casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações. In: *II Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – ANPPAS*, Campinas, 2004.

SATO, M. Avaliação do potencial eólico em microescala de Cascavel e região. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2015.

SCINOCCA, M. Cemitério de pás eólicas preocupa no Distrito Industrial de Sorocaba, 13 de setembro de 2018. Disponível em: <https://www.jornalcruzeiro.com.br/sorocaba/cemiterio-de-pas-eolicas-preocupa-no-distrito-industrial-de-sorocaba/#>. Acesso em: 18 dezembro 2023.

SHACKELFORD, J. F. *Introduction to Materials Science for Engineers*. 7ª edição. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 878 p.

SHACKELFORD, J. F. *Introduction to Materials Science for Engineers*. 7ª edição. Pearson Prentice Hall, 2008.

SHUBHAM, U. et al. Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites – Driving force, challenges and methods. *Department of Polymer and Surface*

Engineering, Institute of Chemical Technology, Mumbai, India, 2021. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108596.

SILVA, R. J. Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SILVA, R. J.; BELATO, M. N.; LOPES, A. O. Coprocessamento de pneus usados e resíduos de rerrefino de óleos lubrificantes usados em fornos de clínquer. DOI: 10.5151/CHEMENG-COBEQ2014-0356-25871-169364. Fevereiro 2015, vol. 1, num. 2, XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química.

SILVA, Zilda Conceição da. Coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer: uma revisão sistemática de literatura. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como pré-requisito para a conclusão do curso de Licenciatura em Química. Sorocaba - SP, 2021.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Press Kit 2011. [S.l.]: SNIC, 2011. Disponível em: <http://www.snic.org.br/>. Acesso em: 25 de junho de 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Relatório Anual / Annual Report. 2021. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>.

SNYDER, H. Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines. Journal of Business Research, Oslo, Noruega, v. 104, p. 333-339, Agosto, 2019. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

SSI Shredding Systems. Disponível em: <https://www.ssiworld.com/en/products>. Acesso em: janeiro de 2024.

STRIPLING, W. Wind Energy's Dirty Word: Decommissioning. Blog Post, 2016. Texas Law Review. Disponível em: <http://www.texasrev.com/wpcontent/uploads/2016/12/Stripling95.pdf>. Acesso: 04 de junho de 2023.

SULTAN, A. A. M.; MATIVENGA, P. T.; LOU, E. Managing supply chain complexity: Foresight for wind turbine composite waste. *Procedia CIRP*, v. 69, p. 938-943, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.027.

SUSCHEM. 2018. Polymer Composites Circularity. Disponível em: <http://www.suschem.org/publications>. Acesso em: 15 de julho de 2023.

SYDRIÃO, Lucas Silva. Coprocessamento na indústria de cimento do Ceará: avaliação do potencial de uso de pneus inservíveis e resíduos de biomassa. 2018. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação).

TAZI, N.; KIM, J.; BOUZIDI, Y.; CHATELET, E.; LIU, G. Waste and Material Flow Analysis in the End-of-Life Wind Energy System. *Resources, Conservation & Recycling*. Troyes, France, v. 145, p. 199-207, Março, 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.039. Tecnologia. São Carlos: Editora da UFSCar, 2004.

TOCCHETTO, Marta Regina Lopes. Gerenciamento de resíduos sólidos industriais. Curso de Química Industrial. Universidade Federal de Santa Maria. Departamento de Química - CCNE, 2005. Disponível em: <<http://marta.tocchetto.com/site/?q=system/files/Gest%C3%A3o+Ambiental+-+Parte+1.pdf>>. Acesso em 12 junho de 2023.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, v. 14, p. 207-222. 2003. DOI: 10.1111/1467-8551.00375.

TRIVIÑOS, A. N. S. Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987.

UNEP – United Nations Environment Programme. Revised technical guidelines on environmentally sound management of used tyres and waste pneumatic tyres. Secretariat of the Basel Convention. UNEP, 2010b. Geneva, Switzerland, 14 de maio de 2010. 59 p. Disponível em: <http://www.basel.int/techmatters/index.html>. Acesso em: 28 de maio de 2023.

VALERY, V. V.; EVGENY, V. M. Mechanics and Analysis of Composite Materials. Elsevier Science Ltd., 2001.

VEOLIA. GE Renewable Energy Announces US Blade Recycling Contract with Veolia. Veolia North America, Schenectady, NY, and Boston, MA, 8 dez. 2020. Disponível em: <https://www.veolianorthamerica.com/media/press-releases/ge-renewable-energy-announces-us-blade-recycling-contract-veolia>. Acesso em: 21 jul. 2023.

VEOLIA. United States: Veolia makes cement and gives a second life to GE Renewable Energy's wind turbine blades. 10 dez. 2020. Disponível em: <https://www.veolia.com/en/news/united-states-veolia-makes-cement-and-gives-second-life-ge-renewable-energys-wind-turbine>. Acesso em: fevereiro de 2024.

VERMA, A. S., JIANG, Z., VEDVIK, N. P., GAO, Z., & REN, Z. (2019). Impact assessment of a wind turbine blade root during an offshore mating process. Engineering Structures, 180, 205-222. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.012.

VESTAS; STENA RECYCLING. Vestas and Stena Recycling in partnership on circular solution for recycling of epoxy-based turbine blades. 2023-02-08. Disponível em: <https://www.stenarecycling.com/news-insights/newsroom/2023/vestas-and-stena-recycling-in-partnership-on-circular-solution-for-recycling-of-epoxy-based-turbine-blades/>. Acesso em Janeiro de 2024.

VIDAL JUNIOR, J. V. Estudo da influência do desalinhamento das fibras de reforço nas propriedades mecânicas das pás de aerogeradores. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis, Campus Maracanaú, 2022.

VIEIRA, W. Z.; LEBRÃO, G. W. Caracterização dos Subprodutos da Reciclagem de Resina Poliéster com Fibra de Vidro. 2018.

VIGOLO, Tamara. Descarte de pás dos aerogeradores: uma análise comunicacional. Relatório da Dissertação Final Submetida à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Setembro de 2022.

VOLKAN Ş. E. An integrated review and analysis of multi-energy transition from fossil fuels to renewables. Kadir Has University, Center for Energy and Sustainable Development (CESD), Cibali, Istanbul, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.073.

WIEBECK, H.; PIVA, A. M. Reciclagem do Plástico. Art Líber, 2005.

WINDEUROPE. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. Publicado em Maio de 2020. Disponível em: <https://windeurope.org/>. Acesso em: Julho de 2023.

World Wildlife Fund (WWF). Geração de energia em Fernando de Noronha: Alternativas para a diminuição de emissões de CO₂ no transporte e eletricidade. Brasil, 2021. Disponível em: https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/geracao_de_energia_fernando_de_noronha_versao_web_1_1.pdf. Acesso em: 04 de janeiro de 2024.

YANG, Y., BOOM, R., IRION, B., VAN HEERDEN, D.J., KUIPER, P., DE WIT, H. Recycling of composite materials. Chem. Eng. Process. Process Intensif. 51, 53–68, 2012. DOI: 10.1016/j.cep.2011.09.007.

YAZDANBAKHSH, A.; BANK, L. C.; RIEDER, K. A.; TIAN, Y.; CHEN, C. Concrete with Discrete Slender Elements from Mechanically Recycled Wind Turbine Blades. *Resources, Conservation & Recycling*, New York, USA, v. 128, p. 11-21, setembro de 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.005.

ZANIN, M. & MANCINI, S.D. Resíduos Plásticos e Reciclagem: Aspectos Gerais e
ZHANG, C., ZHANG, Q., ZHANG, G., & XIE, B. (2016). *Energy Revolution: From a Fossil Era to a New Era*. Natural Gas Industry, Beijing, China, 3, 1-11. DOI: 10.1016/j.ngib.2016.02.001.

ZIMMERMANN, T. & GÖBLING-REISEMANN, S. 2012. Influence of site specific parameters on environmental performance of wind energy converters. *Energy Procedia* 20: 402 – 413. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.03.039.

ANEXOS

ANEXO I – Região Nordeste: Parques eólicos em operação no estado da Bahia (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Alvorada	EOL.CV.BA.030320-8	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	8.000,00	100% para Centrais Eólicas Alvorada LTDA (PIE)	
Ametista	EOL.CV.BA.030779-3	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/03/2015	2015	28.560,00	100% para Centrais Eólicas Ametista S.A (PIE)	
Baraúnas I	EOL.CV.BA.031335-1	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	20/11/2015	2015	32.900,00	100% para Baraúnas I Energética S.A (PIE)	
Caetitê 1	EOL.CV.BA.030976-1	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	03/10/2014	2014	30.000,00	100% para CAETITÊ 1 ENERGIA RENOVÁVEL S/A (PIE)	
Caetitê 2	EOL.CV.BA.030437-9	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/10/2014	2014	30.000,00	100% para CAETITÊ 2 ENERGIA RENOVÁVEL S/A (PIE)	
Caetitê 3	EOL.CV.BA.030448-4	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/10/2014	2014	30.000,00	100% para CAETITÊ 3 ENERGIA RENOVÁVEL S/A. (PIE)	
Caetitê A	EOL.CV.BA.031344-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/09/2015	2015	23.800,00	100% para Eólica Caetitê A S.A (PIE)	
Caetitê B	EOL.CV.BA.031342-4	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/09/2015	2015	22.100,00	100% para Eólica Caetitê B S.A (PIE)	
Caetitê C	EOL.CV.BA.031523-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/09/2015	2015	8.500,00	100% para Eólica Caetitê C S.A (PIE)	
Candiba	EOL.CV.BA.030316-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	9.600,00	100% para Centrais Eólicas Candiba LTDA. (PIE)	
Da Prata	EOL.CV.BA.030490-5	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/10/2014	2014	21.840,00	100% para Centrais Eólicas da Prata S.A (PIE)	
Dois Riachos	EOL.CV.BA.031121-9	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/11/2015	2015	30.000,00	100% para Enel Green Power Dois Riachos Eólica S.A. (PIE)	
Dos Araçás	EOL.CV.BA.030495-6	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/10/2014	2014	31.860,00	100% para Centrais Eólicas dos Araçás S.A (PIE)	
Dourados	EOL.CV.BA.030778-5	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/03/2015	2015	28.560,00	100% para CENTRAIS EÓLICAS DOURADOS S.A (PIE)	
Emiliana	EOL.CV.BA.030807-2	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/10/2014	2014	28.200,00	100% para Enel Green Power Emiliana Eólica S.A (PIE)	
Guanambi	EOL.CV.BA.030328-3	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	20.800,00	100% para Centrais Eólicas Guanambi LTDA. (PIE)	
Guirapá	EOL.CV.BA.030342-9	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	28.800,00	100% para Centrais Eólicas Guirapá LTDA. (PIE)	
Igaporã	EOL.CV.BA.030321-6	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	30.400,00	100% para Centrais Eólicas Igaporã LTDA. (PIE)	
Ilhéus	EOL.CV.BA.030315-1	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	11.200,00	100% para Centrais Eólicas Ilhéus LTDA. (PIE)	
Joana	EOL.CV.BA.030801-3	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/09/2014	2014	28.200,00	100% para Enel Green Power Joana Eólica S.A (PIE)	
Licínio de Almeida	EOL.CV.BA.030317-8	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	24.000,00	100% para Centrais Eólicas Licínio de Almeida LTDA. (PIE)	
Macaúbas	EOL.CV.BA.030283-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/07/2012	2012	35.070,00	100% para MACAÚBAS ENERGÉTICA S.A. (PIE)	
Maron	EOL.CV.BA.030768-8	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/03/2015	2015	30.240,00	100% para Centrais Eólicas Maron S.A (PIE)	
Morrão	EOL.CV.BA.030506-5	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/10/2014	2014	30.240,00	100% para Centrais Eólicas Morrão S.A (PIE)	
Morro Branco I	EOL.CV.BA.031336-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/11/2015	2015	32.900,00	100% para Morro Branco I Energética S.A (PIE)	
Mussambê	EOL.CV.BA.031352-1	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/10/2015	2015	32.900,00	100% para Mussambê Energética S.A (PIE)	
Nossa Senhora da Conceição	EOL.CV.BA.030318-6	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	28.800,00	100% para CENTRAIS EÓLICAS NOSSA SENHORA DA CONCEIÇÃO LTDA. (PIE)	
Novo Horizonte	EOL.CV.BA.030305-4	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/07/2012	2012	30.060,00	100% para Novo Horizonte Energética S.A (PIE)	
Pajeú do Vento	EOL.CV.BA.030319-4	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	25.600,00	100% para Centrais Eólicas Pajeú do Vento S.A (PIE)	
Pedra Branca	EOL.CV.BA.030443-3	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	02/03/2013	2013	30.000,00	100% para Pedra Branca S.A. (PIE)	
Pedra do Reino	EOL.CV.BA.030288-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/02/2013	2013	30.000,00	100% para Eólica Pedra do Reino S.A. (PIE)	
Pedra do Reino III	EOL.CV.BA.030608-8	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	07/06/2013	2013	18.000,00	100% para Gestamp Eolicatex Sobradinho S.A (PIE)	
Pilões	EOL.CV.BA.030776-9	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/03/2015	2015	30.240,00	100% para Centrais Eólicas Pilões S.A (PIE)	
Pindaí	EOL.CV.BA.030324-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	24.000,00	100% para Centrais Eólicas Pindaí S.A (PIE)	
Planaltina	EOL.CV.BA.030322-4	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	27.200,00	100% para Centrais Eólicas Planaltina S.A (PIE)	
Porto Seguro	EOL.CV.BA.030323-2	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	6.400,00	100% para CENTRAIS EÓLICAS PORTO SEGURO LTDA. (PIE)	
Rio Verde	EOL.CV.BA.030341-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	30.400,00	100% para CENTRAIS EÓLICAS RIO VERDE LTDA. (PIE)	
São Pedro do Lago	EOL.CV.BA.030456-5	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	02/03/2013	2013	31.465,00	100% para São Pedro do Lago S.A (PIE)	
Seabra	EOL.CV.BA.030306-2	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/07/2012	2012	30.060,00	100% para Seabra Energética S.A (PIE)	
Seralma	EOL.CV.BA.030546-4	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/10/2014	2014	30.240,00	100% para Centrais Eólicas Seralma S.A (PIE)	
Serra do Salto	EOL.CV.BA.030314-3	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/07/2014	2014	19.200,00	100% para CENTRAIS EÓLICAS SERRA DO SALTO LTDA. (PIE)	
Sete Gameleiras	EOL.CV.BA.030455-7	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/03/2013	2013	30.000,00	100% para SETE GAMELEIRAS S/A (PIE)	
Tanque	EOL.CV.BA.030544-8	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/10/2014	2014	30.000,00	100% para Centrais Eólicas Tanque S.A (PIE)	
Ventos da Andorinha	EOL.CV.BA.030944-3	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/11/2015	2015	30.000,00	100% para ANDORINHA ENERGIAS RENOVAVEIS S.A. (PIE)	
Ventos de Campo Formoso II	EOL.CV.BA.031010-7	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/12/2015	2015	30.000,00	100% para Campo Formoso II Energias Renováveis S.A (PIE)	
Ventos de Morrinhos	EOL.CV.BA.030945-1	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/11/2015	2015	30.000,00	100% para MORRINHOS ENERGIAS RENOVAVEIS S.A. (PIE)	
Ventos do Nordeste	EOL.CV.BA.030476-0	BA	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/10/2014	2014	23.520,00	100% para Centrais Eólicas Ventos do Nordeste S.A (PIE)	

ANEXO II – Região Nordeste: Parques eólicos em operação no estado do Ceará (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Parque Eólico de Beberibe	EOL.CV.CE.028174-3	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/09/2008	2008	25.600,00	100% para EÓLICA BEBERIBE S.A. (PIE)	
Praia do Morgado	EOL.CV.CE.028440-8	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/05/2010	2010	28.800,00	100% para Central Eólica Praia do Morgado S.A (PIE)	
Volta do Rio	EOL.CV.CE.028441-6	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	03/09/2010	2010	42.000,00	100% para CENTRAL EÓLICA VOLTA DO RIO S/A (PIE)	
Foz do Rio Choró	EOL.CV.CE.028630-3	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	31/01/2009	2009	25.200,00	100% para SIIF Cinco Geração e Comercialização de Energia S.A. (PIE)	
Praia Formosa	EOL.CV.CE.028631-1	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/08/2009	2009	105.000,00	100% para CPFL ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	
Canoa Quebrada	EOL.CV.CE.028649-4	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/12/2008	2008	10.500,00	100% para Rosa dos Ventos Geração e Comercialização de Energia S.A. (PIE)	
Lagoa do Mato	EOL.CV.CE.028652-4	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/01/2009	2009	3.230,00	100% para Rosa dos Ventos Geração e Comercialização de Energia S.A. (PIE)	
Icaralzinho	EOL.CV.CE.028699-0	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/10/2009	2009	54.600,00	100% para CPFL ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	
Paracuru	EOL.CV.CE.028706-7	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/11/2008	2008	25.200,00	100% para Eólica Paracuru Geração e Comercialização de Energia S.A. (PIE)	
Praias de Parajuru	EOL.CV.CE.028724-5	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/08/2009	2009	28.800,00	100% para Central Eólica Praia de Parajuru S.A (PIE)	
Enacel	EOL.CV.CE.028770-9	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/03/2010	2010	31.500,00	100% para CPFL ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	
Canoa Quebrada	EOL.CV.CE.028788-1	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/01/2010	2010	57.000,00	100% para CPFL ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	
Taíba Águia	EOL.CV.CE.028857-8	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/06/2014	2014	23.100,00	100% para CENTRAL GERADORA EOLICA TAIBA AGUIA S.A. (PIE)	
Taíba Albatroz	EOL.CV.CE.028858-6	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/11/2008	2008	16.500,00	100% para CPFL ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	
Bons Ventos	EOL.CV.CE.028887-0	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/02/2010	2010	50.000,00	100% para CPFL ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	
Buriti	EOL.CV.CE.030279-1	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	03/04/2014	2014	30.000,00	100% para Nova Eólica Buriti S.A. (PIE)	
Coqueiros	EOL.CV.CE.030282-1	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	07/11/2014	2014	27.000,00	100% para Nova Eólica Coqueiro S.A. (PIE)	
Icarai	EOL.CV.CE.030289-9	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/06/2013	2013	16.800,00	100% para Eólica Icarai Geração e Comercialização de Energia S.A (PIE)	
Cajucoco	EOL.CV.CE.030294-5	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	21/03/2014	2014	30.000,00	100% para Nova Eólica Cajucoco S.A (PIE)	
Colônia	EOL.CV.CE.030295-3	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/06/2014	2014	18.900,00	100% para CENTRAL GERADORA EOLICA COLONIA S.A. (PIE)	
Dunas de Paracuru	EOL.CV.CE.030299-6	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/12/2012	2012	42.000,00	100% para VENTOS BRASIL GERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA S.A. (PIE)	
Faís V	EOL.CV.CE.030309-7	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/10/2014	2014	29.400,00	100% para EÓLICA FAÍSA V - GERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA S.A. (PIE)	
Faís IV	EOL.CV.CE.030329-1	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	25.200,00	100% para EÓLICA FAÍSA IV - GERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA S.A. (PIE)	
Faís II	EOL.CV.CE.030331-3	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	31/07/2014	2014	27.300,00	100% para EÓLICA FAÍSA II - GERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA S.A. (PIE)	
Faís III	EOL.CV.CE.030332-1	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	25.200,00	100% para EÓLICA FAÍSA III - GERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA S.A. (PIE)	
Embuaca	EOL.CV.CE.030336-4	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	27.300,00	100% para Embuaca Geração e Comercialização de Energia S.A (PIE)	
Faís I	EOL.CV.CE.030352-6	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	29.400,00	100% para EÓLICA FAÍSA I - GERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA S.A. (PIE)	
Icarai II	EOL.CV.CE.030356-9	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	28/03/2014	2014	37.800,00	100% para CENTRAL GERADORA EOLICA ICARAI II S.A. (PIE)	
Quixaba	EOL.CV.CE.030369-0	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/10/2012	2012	25.500,00	100% para Central Eólica Quixaba S.A (PIE)	
Icarai I	EOL.CV.CE.030372-0	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	27.300,00	100% para CENTRAL GERADORA EOLICA ICARAI I S.A. (PIE)	
Taíba Andorinha	EOL.CV.CE.030373-9	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/06/2014	2014	14.700,00	100% para CENTRAL GERADORA EOLICA TAIBA ANDORINHA S.A. (PIE)	
Mundaú	EOL.CV.CE.030656-8	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/04/2014	2014	30.004,00	100% para Central Eólica Mundaú S.A (PIE)	
Trairi	EOL.CV.CE.030662-2	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/11/2013	2013	25.388,00	100% para Central Eólica Trairi S.A (PIE)	
Guajirú	EOL.CV.CE.030663-0	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/11/2013	2013	30.004,00	100% para Central Eólica Guajirú S.A (PIE)	
Fleixeiros I	EOL.CV.CE.030670-3	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	28/01/2014	2014	30.004,00	100% para Central Eólica Fleixeiros I S.A (PIE)	
Ilha Grande	EOL.CV.CE.030691-6	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	20/08/2014	2014	29.700,00	100% para Central Geradora Eolica Ilha Grande S.A. (PIE)	
Ribeirão	EOL.CV.CE.030695-9	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/09/2014	2014	21.600,00	100% para Central Geradora Eolica Ribeirão S.A. (PIE)	
Boca do Córrego	EOL.CV.CE.030697-5	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/08/2014	2014	24.300,00	100% para Central Geradora Eólica Palmas S.A. (PIE)	
São Jorge	EOL.CV.CE.030911-7	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/11/2014	2014	24.000,00	100% para Central Eólica São Jorge S.A (PIE)	
São Cristóvão	EOL.CV.CE.030912-5	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/11/2014	2014	26.000,00	100% para Central Eólica São Cristóvão S.A (PIE)	
Santo Antônio de Pádua	EOL.CV.CE.030916-8	CE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/11/2014	2014	14.000,00	100% para Central Eólica Santo Antônio de Pádua S.A. (PIE)	

ANEXO III – Região Nordeste: Parques eólicos em operação no estado da Paraíba (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Albatroz	EOL.CV.PB.029085-8	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	31/01/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Atlântica	EOL.CV.PB.029088-2	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	17/01/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Camurim	EOL.CV.PB.029084-0	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	31/01/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Caravela	EOL.CV.PB.029089-0	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	31/01/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Coelhos I	EOL.CV.PB.029086-6	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/03/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Coelhos II	EOL.CV.PB.029090-4	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	10/02/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Coelhos III	EOL.CV.PB.029087-4	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/03/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Coelhos IV	EOL.CV.PB.029091-2	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/01/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Mataraca	EOL.CV.PB.029092-0	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/01/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Millennium	EOL.CV.PB.029041-6	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	28/11/2007	2007	10.200,00	100% para MILLENNIUM CENTRAL GERADORA EÓLICA S.A. (PIE)	
Presidente	EOL.CV.PB.029083-1	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/01/2009	2009	4.800,00	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)	
Vitória	EOL.CV.PB.029075-0	PB	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	28/11/2010	2010	4.500,00	100% para CARDUS ENERGIA LTDA. (PIE)	

ANEXO IV – Região Nordeste: Parques eólicos em operação no estado de Pernambuco (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Caminho da Praia	EOL.CV.PE.031006-9	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	17/09/2012	2012	2.000,00	100% para Wind Power Energia S.A (REG)	
Gravatá Fruitrade	EOL.CV.PE.029020-3	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/04/2010	2010	4.950,00	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A. (PIE)	
Mandacaru	EOL.CV.PE.029015-7	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/04/2010	2010	4.950,00	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A. (PIE)	
Pau Ferro	EOL.CV.PE.030805-6	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/02/2015	2015	30.550,00	100% para Enel Green Power Pau Ferro Eólica S.A (PIE)	
Pedra do Gerônimo	EOL.CV.PE.030806-4	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/02/2015	2015	30.550,00	100% para Enel Green Power Pedra do Gerônimo Eólica S.A (PIE)	
Pirauá	EOL.CV.PE.028481-5	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/05/2010	2010	4.950,00	100% para Eólica Pirauá Geradora de Energia S.A. (PIE)	
Santa Maria	EOL.CV.PE.029019-0	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/04/2010	2010	4.950,00	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A. (PIE)	
Serra das Vacas I	EOL.CV.PE.031537-0	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	23.920,00	100% para Eólica Serra das Vacas I S.A (PIE)	
Serra das Vacas II	EOL.CV.PE.031540-0	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	22.295,00	100% para Eólica Serra das Vacas II S.A (PIE)	
Serra das Vacas III	EOL.CV.PE.031560-5	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	22.235,00	100% para Eólica Serra das Vacas III S.A (PIE)	
Serra das Vacas IV	EOL.CV.PE.031574-5	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	22.295,00	100% para Eólica Serra das Vacas IV S.A (PIE)	
Tacaicó	EOL.CV.PE.030789-0	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/02/2015	2015	18.800,00	100% para Enel Green Power Tacaicó Eólica S.A (PIE)	
Ventos de Santa Brígida I	EOL.CV.PE.031365-3	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	13.600,00	100% para Ventos de Santa Brígida I Energias Renováveis S.A. (PIE)	
Ventos de Santa Brígida II	EOL.CV.PE.031363-7	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	27.200,00	100% para Ventos de Santa Brígida II Energias Renováveis S.A (PIE)	
Ventos de Santa Brígida III	EOL.CV.PE.031354-8	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	28.900,00	100% para Ventos de Santa Brígida III Energias Renováveis S.A. (PIE)	
Ventos de Santa Brígida IV	EOL.CV.PE.031370-0	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	27.200,00	100% para Ventos de Santa Brígida IV Energias Renováveis S.A (PIE)	
Ventos de Santa Brígida V	EOL.CV.PE.031346-7	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	28.900,00	100% para Ventos de Santa Brígida V Energias Renováveis S.A. (PIE)	
Ventos de Santa Brígida VI	EOL.CV.PE.031353-0	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	28.900,00	100% para Ventos de Santa Brígida VI Energias Renováveis S.A (PIE)	
Ventos de Santa Brígida VII	EOL.CV.PE.031422-6	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	27.200,00	100% para Ventos de Santa Brígida VII Energias Renováveis S.A (PIE)	
Xavante	EOL.CV.PE.029011-4	PE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/04/2010	2010	4.950,00	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A. (PIE)	

ANEXO V – Região Nordeste: Parques eólicos em operação no estado de Piauí (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).								
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração
Delta do Parnaíba	EOL.CV.PI.030838-2	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	02/07/2014	2014	30.000,00	100% para PORTO DO PARNAÍBA ENERGIA S.A. (PIE)
Pedra do Sal	EOL.CV.PI.028731-8	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/12/2008	2008	18.000,00	100% para EÓLICA PEDRA DO SAL S.A. (PIE)
Porto das Barcas	EOL.CV.PI.030827-7	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	02/07/2014	2014	20.000,00	100% para PORTO DAS BARCAS ENERGIA S.A. (PIE)
Porto Salgado	EOL.CV.PI.030830-7	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	10/07/2014	2014	20.000,00	100% para PORTO SALGADO ENERGIA S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana II	EOL.CV.PI.031361-0	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	30.000,00	100% para Ventos de Santa Joana II Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana IX	EOL.CV.PI.031417-0	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	27/08/2015	2015	29.600,00	100% para Ventos de Santa Joana IX Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana VI	EOL.CV.PI.031367-0	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	30.000,00	100% para Ventos de Santa Joana VI Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana VIII	EOL.CV.PI.031366-1	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	30.000,00	100% para Ventos de Santa Joana VIII Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana X	EOL.CV.PI.031393-9	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/07/2015	2015	29.600,00	100% para Ventos de Santa Joana X Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana XI	EOL.CV.PI.031388-2	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/07/2015	2015	29.600,00	100% para Ventos de Santa Joana XI Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana XII	EOL.CV.PI.031414-5	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/07/2015	2015	28.900,00	100% para Ventos de Santa Joana XII Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana XIII	EOL.CV.PI.031394-7	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/07/2015	2015	29.600,00	100% para Ventos de Santa Joana XIII Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana XIV	EOL.CV.PI.031368-8	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	30.000,00	100% para VENTOS DE SANTA JOANA XIV ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana XV	EOL.CV.PI.031416-1	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/07/2015	2015	28.900,00	100% para Ventos de Santa Joana XV Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santa Joana XVI	EOL.CV.PI.031392-0	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/07/2015	2015	28.900,00	100% para Ventos de Santa Joana XVI Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santo Onofre I	EOL.CV.PI.031364-5	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	30.000,00	100% para Ventos de Santo Onofre I Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santo Onofre II	EOL.CV.PI.031362-9	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	30.000,00	100% para Ventos de Santo Onofre II Energias Renováveis S.A. (PIE)
Ventos de Santo Onofre III	EOL.CV.PI.031886-8	PI	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/12/2015	2015	30.000,00	100% para Ventos de Santo Onofre III Energias Renováveis S.A. (PIE)

ANEXO VI – Região Nordeste: Parques eólicos em operação no estado de Rio Grande do Norte (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Alegria I	EOL.CV.RN.028444-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/12/2010	2010	51.000,00	100% para New Energy Options Geração de Energia S.A (PIE)	
Alegria II	EOL.CV.RN.028443-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/12/2011	2011	100.650,00	100% para New Energy Options Geração de Energia S.A (PIE)	
Aratuá I	EOL.CV.RN.030121-3	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	31/01/2012	2012	14.400,00	100% para Brasventos Aratuá 1 Geradora de Energia S.A (PIE)	
Areia Branca	EOL.CV.RN.030340-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/02/2014	2014	27.300,00	100% para Eólica Bela Vista Geração e Comercialização de Energia S.A (PIE)	
Arizona 1	EOL.CV.RN.030622-3	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/10/2013	2013	28.000,00	100% para ARIZONA 1 ENERGIA RENOVÁVEL S/A (PIE)	
Asa Branca I	EOL.CV.RN.030505-7	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/08/2015	2015	27.000,00	100% para NOVA ASA BRANCA I ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A (PIE)	
Asa Branca II	EOL.CV.RN.030547-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	15/09/2015	2015	27.000,00	100% para NOVA ASA BRANCA II ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A (PIE)	
Asa Branca III	EOL.CV.RN.030548-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/09/2015	2015	27.000,00	100% para NOVA ASA BRANCA III ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A (PIE)	
Asa Branca IV	EOL.CV.RN.030498-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/12/2014	2014	32.000,00	100% para Asa Branca IV Energias Renováveis Ltda (PIE)	
Asa Branca V	EOL.CV.RN.030507-3	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/12/2014	2014	32.000,00	100% para Asa Branca V Energias Renováveis S.A. (PIE)	
Asa Branca VI	EOL.CV.RN.030520-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/12/2014	2014	32.000,00	100% para Asa Branca VI Energias Renováveis Ltda (PIE)	
Asa Branca VII	EOL.CV.RN.030513-8	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/12/2014	2014	32.000,00	100% para Asa Branca VII Energias Renováveis Ltda (PIE)	
Asa Branca VIII	EOL.CV.RN.030508-1	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/12/2014	2014	32.000,00	100% para Asa Branca VIII Energias Renováveis Ltda (PIE)	
Cabeço Preto	EOL.CV.RN.030333-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/05/2012	2012	19.800,00	100% para Gestamp Eólica Baixa Verde S.A (PIE)	
Cabeço Preto IV	EOL.CV.RN.030501-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/05/2012	2012	19.800,00	100% para Gestamp Eólica Moxotó S.A (PIE)	
Caicara I	EOL.CV.RN.030895-1	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/12/2015	2015	27.000,00	100% para USINA DE ENERGIA EOLICA CAICARA I SPE S.A. (PIE)	
Caicara II	EOL.CV.RN.030915-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/12/2015	2015	18.000,00	100% para USINA DE ENERGIA EOLICA CAICARA II SPE S.A. (PIE)	
Camilo Pontes I (Antiga Renascença I)	EOL.CV.RN.030515-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/12/2014	2014	30.000,00	100% para Energisa Geração – Central Eólica Renascença I S.A (PIE)	
Camilo Pontes II (Antiga Renascença II)	EOL.CV.RN.030516-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/12/2014	2014	30.000,00	100% para Energisa Geração – Central Eólica Renascença II S.A (PIE)	
Camilo Pontes III (Antiga Renascença III)	EOL.CV.RN.030527-8	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/12/2014	2014	30.000,00	100% para Energisa Geração – Central Eólica Renascença III S.A (PIE)	
Camilo Pontes IV (Antiga Renascença IV)	EOL.CV.RN.030551-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/12/2014	2014	30.000,00	100% para Energisa Geração - Central Eólica Renascença IV S.A (PIE)	
Camilo Pontes V (antiga Ventos de São Miguel)	EOL.CV.RN.030514-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/12/2014	2014	30.000,00	100% para GERAÇÃO CENTRAL EOLICA VENTOS DE SÃO MIGUEL S.A. (PIE)	
Campo dos Ventos II	EOL.CV.RN.030500-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/12/2014	2014	30.000,00	100% para CAMPO DOS VENTOS II ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. (PIE)	
Carcará I	EOL.CV.RN.030832-3	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/03/2015	2015	30.000,00	100% para USINA DE ENERGIA EOLICA CARCARA I SPE S.A. (PIE)	
Carcará II	EOL.CV.RN.030897-8	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/12/2014	2014	30.000,00	100% para USINA DE ENERGIA EOLICA CARCARA II SPE S.A. (PIE)	
Costa Branca	EOL.CV.RN.030672-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	03/12/2014	2014	20.700,00	100% para SPE Costa Branca Energia S.A (PIE)	
Dreen Boa Vista	EOL.CV.RN.030512-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/02/2015	2015	14.000,00	100% para GE BOA VISTA S/A (PIE)	
Dreen Olho D'Água	EOL.CV.RN.030549-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/02/2015	2015	30.000,00	100% para GE OLHO D'ÁGUA S/A (PIE)	
Dreen São Bento do Norte	EOL.CV.RN.030536-7	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/02/2015	2015	30.000,00	100% para GE SÃO BENTO DO NORTE S/A (PIE)	
Eurus I	EOL.CV.RN.030503-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	03/12/2014	2014	30.000,00	100% para DESA Eurus I S.A (PIE)	
Eurus II	EOL.CV.RN.030499-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/01/2015	2015	30.000,00	100% para Eurus II Energias Renováveis S.A (PIE)	
Eurus III	EOL.CV.RN.030504-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	03/12/2014	2014	30.000,00	100% para DESA Eurus III S.A (PIE)	
Eurus IV	EOL.CV.RN.030509-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	20/08/2015	2015	27.000,00	100% para NOVA EURUS IV ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A (PIE)	
Eurus VI	EOL.CV.RN.030351-8	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	8.000,00	100% para Eurus VI Energias Renováveis Ltda (PIE)	
Farol	EOL.CV.RN.030502-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/02/2015	2015	20.000,00	100% para GE FAROL S/A (PIE)	
Junco I	EOL.CV.RN.030902-8	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/12/2015	2015	24.000,00	100% para USINA DE ENERGIA EOLICA JUNCO I SPE S.A. (PIE)	
Junco II	EOL.CV.RN.030914-1	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/12/2015	2015	24.000,00	100% para USINA DE ENERGIA EOLICA JUNCO II SPE S.A. (PIE)	
Juremas	EOL.CV.RN.030660-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/12/2014	2014	16.100,00	100% para SPE Juremas Energia S.A. (PIE)	
Macacos	EOL.CV.RN.030661-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/12/2014	2014	20.700,00	100% para SPE Macacos Energia S.A (PIE)	
Mangue Seco 1	EOL.CV.RN.030285-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/09/2011	2011	26.000,00	100% para EOLICA MANGUE SECO 1 - GERADORA E COMERCIALIZADORA DE ENERGIA ELÉTR	
Mangue Seco 2	EOL.CV.RN.030284-8	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/09/2011	2011	26.000,00	100% para EOLICA MANGUE SECO 2 - GERADORA E COMERCIALIZADORA DE ENERGIA ELÉTR	
Mangue Seco 3	EOL.CV.RN.030281-3	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/08/2011	2011	26.000,00	100% para Eólica Mangue Seco 3 – Geradora e Comercializadora de Energia Elétrica S.A. (P	
Mangue Seco 5	EOL.CV.RN.030290-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/11/2011	2011	26.000,00	100% para Eólica Mangue Seco 4 – Geradora e Comercializadora de Energia Elétrica S.A. (P	
Mar e Terra	EOL.CV.RN.030389-5	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/02/2014	2014	23.100,00	100% para Eólica Mar e Terra Geração e Comercialização de Energia S.A (PIE)	
Mel 02	EOL.CV.RN.030454-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/02/2013	2013	20.000,00	100% para MEL 2 ENERGIA RENOVÁVEL S/A (PIE)	

Miassaba 3	EOL.CV.RN.030339-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/02/2014	2014	68.470,00	100% para Brasventos Miassaba 3 Geradora de Energia S.A (PIE)
Miassaba II	EOL.CV.RN.030370-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/12/2011	2011	14.400,00	100% para MIASSABA GERADORA EÓLICA S.A. (PIE)
Modelo I	EOL.CV.RN.030787-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/10/2014	2014	30.550,00	100% para Enel Green Power Modelo I Eólica S.A (PIE)
Modelo II	EOL.CV.RN.030788-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	23/10/2014	2014	25.850,00	100% para Enel Green Power Modelo II Eólica S.A (PIE)
Morro dos Ventos I	EOL.CV.RN.030301-1	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	28.800,00	100% para Desa Morro dos Ventos I S.A (PIE)
Morro dos Ventos II	EOL.CV.RN.030889-7	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/04/2015	2015	29.160,00	100% para Desa Morro dos Ventos II S.A (PIE)
Morro dos Ventos III	EOL.CV.RN.030310-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	28.800,00	100% para Desa Morro dos Ventos III S.A (PIE)
Morro dos Ventos IV	EOL.CV.RN.030311-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	28.800,00	100% para Desa Morro dos Ventos IV S.A (PIE)
Morro dos Ventos IX	EOL.CV.RN.030302-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	30.000,00	100% para Desa Morro dos Ventos IX S.A (PIE)
Morro dos Ventos VI	EOL.CV.RN.030300-3	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	28.800,00	100% para Desa Morro dos Ventos VI S.A (PIE)
Pedra Preta	EOL.CV.RN.030671-1	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	03/12/2014	2014	20.700,00	100% para SPE Pedra Preta Energia S.A. (PIE)
Rei dos Ventos 1	EOL.CV.RN.030416-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/02/2014	2014	58.450,00	100% para Brasventos Eolo Geradora de Energia S.A (PIE)
Rei dos Ventos 3	EOL.CV.RN.030417-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/02/2014	2014	60.120,00	100% para Rei dos Ventos 3 Geradora de Energia S.A (PIE)
Renascença V	EOL.CV.RN.030497-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/01/2015	2015	30.000,00	100% para Renascença V Energias Renováveis S.A (PIE)
Riachão I	EOL.CV.RN.030870-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	27/06/2015	2015	29.700,00	100% para Central Geradora Eolica Acari S.A. (PIE)
Riachão II	EOL.CV.RN.030871-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/06/2015	2015	27.000,00	100% para Central Geradora Eolica Albuquerque S.A. (PIE)
Riachão IV	EOL.CV.RN.030874-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/06/2015	2015	29.700,00	100% para Central Geradora Eolica Anemioi S.A. (PIE)
Riachão VI	EOL.CV.RN.030872-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/06/2015	2015	29.700,00	100% para Central Geradora Eólica Apeliotes S.A. (PIE)
Riachão VII	EOL.CV.RN.030873-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/06/2015	2015	29.700,00	100% para Central Geradora Eólica Arena S.A. (PIE)
RN 15 - Rio do Fogo	EOL.CV.RN.028424-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	15/07/2006	2006	49.300,00	100% para ENERGIAS RENOVÁVEIS DO BRASIL S/A (PIE)
Santa Clara I	EOL.CV.RN.030292-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	30.000,00	100% para SANTA CLARA I ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA (PIE)
Santa Clara II	EOL.CV.RN.030308-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	30.000,00	100% para Santa Clara II Energias Renováveis Ltda. (PIE)
Santa Clara III	EOL.CV.RN.030293-7	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	30.000,00	100% para SANTA CLARA III ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA (PIE)
Santa Clara IV	EOL.CV.RN.030307-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	30.000,00	100% para SANTA CLARA IV ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA (PIE)
Santa Clara V	EOL.CV.RN.030378-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	30.000,00	100% para Santa Clara V Energias Renováveis Ltda. (PIE)
Santa Clara VI	EOL.CV.RN.030304-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/03/2014	2014	30.000,00	100% para SANTA CLARA VI ENERGIAS RENOVÁVEIS LTDA (PIE)
Santa Helena	EOL.CV.RN.030834-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/05/2015	2015	29.700,00	100% para SANTA HELENA ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A (PIE)
SM	EOL.CV.RN.030864-1	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	23/04/2015	2015	29.700,00	100% para SANTA MARIA ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A (PIE)
Terral	EOL.CV.RN.030898-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/03/2015	2015	30.000,00	100% para Usina de Energia Eólica Terral SPE S.A. (PIE)
União dos Ventos 1	EOL.CV.RN.030562-6	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/04/2014	2014	22.400,00	100% para Energia Potiguar Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 10	EOL.CV.RN.030571-5	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/04/2014	2014	14.400,00	100% para Pontal do Nordeste Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 2	EOL.CV.RN.030563-4	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/04/2014	2014	22.400,00	100% para Torres de Pedra Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 3	EOL.CV.RN.030564-2	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/04/2014	2014	22.400,00	100% para Ponta do Vento Leste Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 4	EOL.CV.RN.030565-0	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/04/2014	2014	11.200,00	100% para Torres de São Miguel Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 5	EOL.CV.RN.030566-9	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/04/2014	2014	24.000,00	100% para Morro dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 6	EOL.CV.RN.030567-7	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/04/2014	2014	12.800,00	100% para Canto da Ilha Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 7	EOL.CV.RN.030568-5	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/04/2014	2014	14.400,00	100% para Campina Potiguar Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 8	EOL.CV.RN.030569-3	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/04/2014	2014	14.400,00	100% para Esquina dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)
União dos Ventos 9	EOL.CV.RN.030570-7	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	05/04/2014	2014	11.200,00	100% para Ilha dos Ventos Geradora Eólica S.A (PIE)
Ventos de Santo Uriel	EOL.CV.RN.030828-5	RN	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/05/2015	2015	16.200,00	100% para VENTOS DE SANTO URIEL S.A (PIE)

ANEXO VII – Região Nordeste: Parques eólicos em operação no estado de Sergipe (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Barra dos Coqueiros	EOL.CV.SE.030296-1	SE	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/09/2012	2012	34.500,00	100% para Energen Energias Renováveis S.A. (PIE)	

ANEXO VIII – Região Sudeste: Parques eólicos em operação no estado do Rio de Janeiro (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Gargaú	EOLCV.RJ.028730-0	RJ	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	28/10/2010	2010	28.050,00	100% para ÔMEGA GERAÇÃO S.A. (PIE)	

ANEXO IV – Região Sul: Parques eólicos em operação no estado do Rio Grande do Sul (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA			Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).							
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração
Atlântica I	EOL.CV.RS.030457-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/02/2014	2014	30.000,00	100% para Atlântica I Parque Eólico S.A (PIE)
Atlântica II	EOL.CV.RS.030462-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/03/2014	2014	30.000,00	100% para Atlântica II Parque Eólico S.A (PIE)
Atlântica IV	EOL.CV.RS.030461-1	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/03/2014	2014	30.000,00	100% para Atlântica IV Parque Eólico S.A (PIE)
Atlântica V	EOL.CV.RS.030480-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/11/2013	2013	30.000,00	100% para Atlântica V Parque Eólico S.A (PIE)
Capão do Inglês	EOL.CV.RS.031510-9	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2015	2015	10.000,00	100% para Companhia De Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil - ELET
Cerro Chato I (Antiga Coxilha Negra V)	EOL.CV.RS.030348-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	06/01/2012	2012	30.000,00	100% para Companhia De Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil - ELET
Cerro Chato II (Antiga Coxilha Negra VI)	EOL.CV.RS.030349-6	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	31/08/2011	2011	30.000,00	100% para Companhia De Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil - ELET
Cerro Chato III (Antiga Coxilha Negra VII)	EOL.CV.RS.030350-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	07/06/2011	2011	30.000,00	100% para Companhia De Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil - ELET
Cerro Chato IV	EOL.CV.RS.030784-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/03/2014	2014	10.000,00	100% para Eólica Cerro Chato IV S.A. (PIE)
Cerro Chato V	EOL.CV.RS.030786-6	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	17/05/2014	2014	12.000,00	100% para Eólica Cerro Chato V S.A. (PIE)
Cerro Chato VI	EOL.CV.RS.030756-4	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/10/2014	2014	24.000,00	100% para Eólica Cerro Chato VI S.A (PIE)
Cerro dos Trindade	EOL.CV.RS.030762-9	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/11/2013	2013	8.000,00	100% para Eólica Cerro dos Trindade S.A (PIE)
Chuí 09	EOL.CV.RS.031517-6	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/10/2015	2015	17.900,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Chuí I	EOL.CV.RS.030767-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/06/2015	2015	24.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Chuí II	EOL.CV.RS.030790-4	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/06/2015	2015	22.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Chuí IV	EOL.CV.RS.030754-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/06/2015	2015	22.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Chuí V	EOL.CV.RS.030760-2	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	23/05/2015	2015	30.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Corredor do Senandes II	EOL.CV.RS.030842-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	04/02/2015	2015	21.600,00	100% para ADS ER EÓLICA CORREDOR DO SENANDES 2 S/A (PIE)
Corredor do Senandes III	EOL.CV.RS.030819-6	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	23/01/2015	2015	27.000,00	100% para ADS ER EÓLICA CORREDOR DO SENANDES III S/A (PIE)
Corredor do Senandes IV	EOL.CV.RS.030840-4	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/04/2015	2015	29.700,00	100% para ADS ER EÓLICA CORREDOR DO SENANDES IV S/A (PIE)
Coxilha Seca	EOL.CV.RS.031487-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/12/2015	2015	30.000,00	100% para Companhia De Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil - ELET
Elebrás Cidreira 1	EOL.CV.RS.028712-1	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	21/05/2011	2011	70.000,00	100% para Elebrás Projetos S.A (PIE)
Fazenda Rosário	EOL.CV.RS.030343-7	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/06/2011	2011	9.200,00	100% para Parques Eólicos Palmares S.A. (PIE)
Fazenda Rosário 2	EOL.CV.RS.030478-6	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	27/03/2013	2013	23.000,00	100% para Parques Eólicos Palmares S.A. (PIE)
Fazenda Rosário 3	EOL.CV.RS.030334-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/06/2011	2011	16.100,00	100% para Parques Eólicos Palmares S.A. (PIE)
Galpões	EOL.CV.RS.031477-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2015	2015	8.000,00	100% para Companhia De Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil - ELET
Ibirapuitã I	EOL.CV.RS.030750-5	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	27/08/2015	2015	25.200,00	100% para EÓLICA IBIRAPUITÃ S.A. (PIE)
Minuano I	EOL.CV.RS.030844-7	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/05/2015	2015	22.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Minuano II	EOL.CV.RS.030791-2	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/05/2015	2015	24.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Osório 2	EOL.CV.RS.030286-4	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/12/2012	2012	27.600,00	100% para Ventos do Litoral Energia S.A. (PIE)
Osório 3	EOL.CV.RS.030449-2	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	15/02/2013	2013	29.900,00	100% para Ventos do Litoral Energia S.A. (PIE)
Parque Eólico de Osório	EOL.CV.RS.028810-1	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/06/2006	2006	50.000,00	100% para Ventos do Sul Energia S.A (PIE)
Parque Eólico de Palmares	EOL.CV.RS.028855-1	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	29/12/2010	2010	9.200,00	100% para Parques Eólicos Palmares S.A. (PIE)
Parque Eólico dos Índios	EOL.CV.RS.028864-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	13/12/2006	2006	50.000,00	100% para Ventos do Sul Energia S.A (PIE)
Parque Eólico dos Índios 2	EOL.CV.RS.030734-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2014	2014	29.900,00	100% para Ventos dos Índios Energia S.A (PIE)
Parque Eólico dos Índios 3	EOL.CV.RS.030894-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2014	2014	23.000,00	100% para Ventos dos Índios Energia S.A (PIE)
Pontal 2 B	EOL.CV.RS.030460-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/04/2015	2015	11.200,00	100% para Força dos Ventos Energia Eólica S.A (PIE)
REB Cassino I	EOL.CV.RS.030469-7	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/01/2015	2015	22.000,00	100% para EOL Vento Energias Renováveis S.A (PIE)
REB Cassino II	EOL.CV.RS.030477-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/01/2015	2015	20.000,00	100% para Eol Wind Energias Renováveis S.A. (PIE)
REB Cassino III	EOL.CV.RS.030468-9	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	14/01/2015	2015	22.000,00	100% para EOL Brisa Energias Renováveis S.A (PIE)
Sangradouro	EOL.CV.RS.028811-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/09/2006	2006	50.000,00	100% para Ventos do Sul Energia S.A (PIE)
Sangradouro 2	EOL.CV.RS.030381-0	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	02/10/2012	2012	29.900,00	100% para Ventos da Lagoa Energia S.A (PIE)
Sangradouro 3	EOL.CV.RS.030330-5	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/05/2012	2012	27.600,00	100% para Ventos da Lagoa Energia S.A (PIE)
Vento Aragano I	EOL.CV.RS.030833-1	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/04/2015	2015	29.700,00	100% para ADS ER EÓLICA VENTO ARAGANO I S/A (PIE)

Verace 24	EOL.CV.RS.031561-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/11/2015	2015	19.690,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 25	EOL.CV.RS.031541-9	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/11/2015	2015	7.160,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 26	EOL.CV.RS.031559-1	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/11/2015	2015	14.320,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 27	EOL.CV.RS.031600-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	26/11/2015	2015	16.110,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 28	EOL.CV.RS.031578-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2015	2015	12.530,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 29	EOL.CV.RS.031557-5	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2015	2015	17.900,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 30	EOL.CV.RS.031602-4	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2015	2015	17.900,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 31	EOL.CV.RS.031558-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	16/12/2015	2015	8.950,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 35	EOL.CV.RS.031539-7	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/12/2015	2015	12.530,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace 36	EOL.CV.RS.031610-5	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	25/12/2015	2015	21.480,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace I	EOL.CV.RS.030745-9	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	20.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace II	EOL.CV.RS.030742-4	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	20.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace III	EOL.CV.RS.030746-7	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	26.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace IV	EOL.CV.RS.030741-6	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	30.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace IX	EOL.CV.RS.030748-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	30.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace V	EOL.CV.RS.030829-3	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	30.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace VI	EOL.CV.RS.030740-8	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	18.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace VII	EOL.CV.RS.030747-5	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	30.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace VIII	EOL.CV.RS.030755-6	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	26.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Verace X	EOL.CV.RS.030749-1	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/02/2015	2015	28.000,00	100% para ÔMEGA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA 15 S.A. (PIE)
Xangri-lá	EOL.CV.RS.031302-5	RS	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	11/12/2014	2014	31.700,00	100% para HONDA ENERGY DO BRASIL LTDA. (PIE)

ANEXO X – Região Sul: Parques eólicos em operação no estado de Santa Catarina (Base extraída entre os anos de 2002 e 2015)

 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA		Data de referência dos dados: 01 de fevereiro de 2024 (As coordenadas ausentes encontram-se em verificação).									
Empreendimento	CEG	UF	Fonte	Fase	Origem	Tipo	Entrada em Operação	Ano	Potência Outorgada (kW)	Proprietário / Regime de Exploração	
Água Doce	EOL.CV.SC.028793-8	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	07/09/2006	2006	9.000,00	100% para CENAEEL - Central Nacional de Energia Eólica S.A. (PIE)	
Amparo	EOL.CV.SC.029069-6	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	24/12/2011	2011	22.500,00	100% para Amparo Energia Eólica S.A. (PIE)	
Aquibatã	EOL.CV.SC.029052-1	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	13/12/2011	2011	30.000,00	100% para AQUIBATÃ ENERGIA EÓLICA S.A. (PIE)	
Bom Jardim	EOL.CV.SC.029062-9	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	22/10/2011	2011	30.000,00	100% para Bom Jardim Energia Eólica S.A. (PIE)	
Campo Belo	EOL.CV.SC.029065-3	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	15/11/2011	2011	10.500,00	100% para Campo Belo Energia Eólica S.A. (PIE)	
Cascata	EOL.CV.SC.029054-8	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	27/10/2011	2011	6.000,00	100% para Cascata Energia Eólica S.A. (PIE)	
Cruz Alta	EOL.CV.SC.029070-0	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	09/11/2011	2011	30.000,00	100% para Cruz Alta Energia Eólica S.A. (PIE)	
Do Horizonte	EOL.CV.SC.028674-5	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	18/02/2004	2004	4.800,00	100% para CENAEEL - Central Nacional de Energia Eólica S.A. (REG)	
Eólica de Bom Jardim	EOL.CV.SC.028491-2	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	30/03/2002	2002	600,00	100% para Parque Eólico de Santa Catarina Ltda (REG)	
Pulpito	EOL.CV.SC.029051-3	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	19/08/2011	2011	30.000,00	100% para Pulpito Energia Eólica S.A. (PIE)	
Quinta de Gomariz	EOL.CV.SC.032302-0	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	01/02/2015	2015	4.000,00	100% para Lusinvest Participações LTDA (REG)	
Rio do Ouro	EOL.CV.SC.029055-6	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/07/2011	2011	30.000,00	100% para Rio de Ouro Energia Eólica S.A. (PIE)	
Salto	EOL.CV.SC.029056-4	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	02/12/2011	2011	30.000,00	100% para Salto Energia Eólica S.A. (PIE)	
Santo Antônio	EOL.CV.SC.029053-0	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	08/07/2011	2011	3.000,00	100% para Santo Antônio Energia Eólica S.A. (PIE)	
Tubarão P&D	EOL.CV.SC.032016-1	SC	EOL	Operação	Eólica	Cinética do vento	10/11/2014	2014	2.099,50	100% para ENGIE Brasil Energia S.A. (REG)	

APÊNDICE I - Pesquisa sobre a avaliação da utilização de resíduos de pás de turbinas eólicas no final de sua vida útil em processos de recuperação energética, através do coprocessamento em fornos de cimento.

Pesquisa sobre a avaliação da utilização de resíduos de pás de turbinas eólicas no final de sua vida útil em processos de recuperação energética, através do coprocessamento em fornos de cimento.

Esta pesquisa do Mestrado em Energias Renováveis pelo Instituto Federal do Ceará explora alternativas para reutilizar pás de turbinas eólicas no Brasil ao final de sua vida útil, considerando a falta de adoção de tecnologias avançadas no país. Define-se o fim da vida útil das pás pela obsolescência técnica ou degenerescência ao longo do tempo, excluindo resíduos da fabricação, defeitos, danos durante o transporte, falhas de produção e descartes catastróficos.

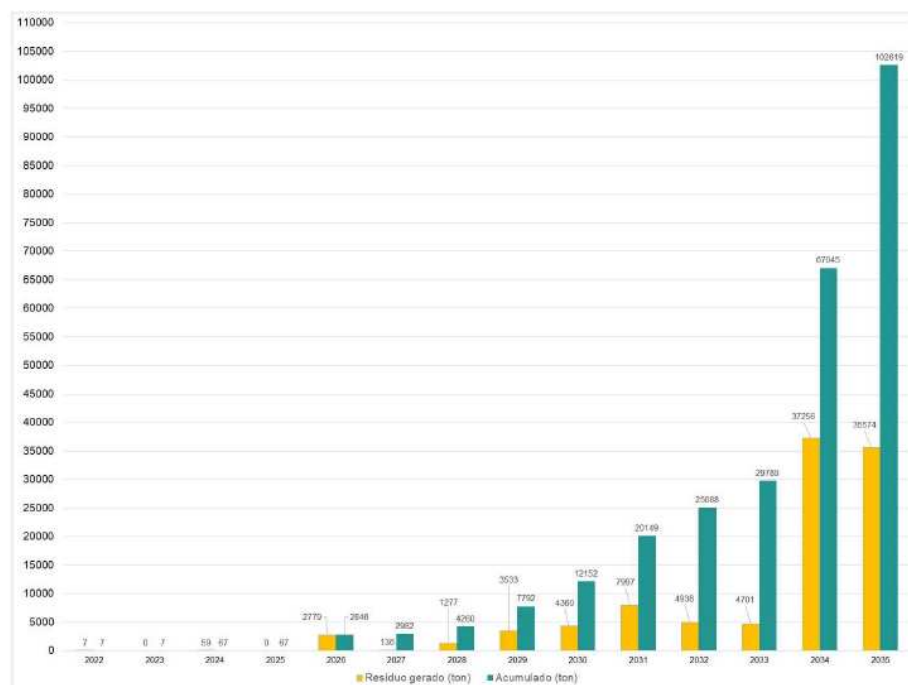
Os temas abordados incluem aspectos gerais da energia eólica, disposição de pás eólicas ao fim de sua vida útil no Brasil, coprocessamento de resíduos, viabilidade técnica desse coprocessamento e regulamentação. A pesquisa busca opiniões de especialistas para entender a preparação do Brasil para enfrentar os desafios futuros.

Com base em projeções da ANEEL, espera-se que até 2035, 305 parques eólicos brasileiros completem 20 anos de operação, gerando aproximadamente 102.621 toneladas de resíduos de pás eólicas. O aumento das dimensões das pás resultará em um aumento considerável no volume de resíduos gerados.

Orientações sobre a pesquisa:

- Serão 20 afirmações sobre temas específicos (Energia Eólica e Coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento);
- O entrevistado, mesmo que não conhecedor sobre determinado tema, deverá avaliar o cenário apresentado e expor a sua opinião sobre como enxerga o cenário brasileiro;
- Haverão 5 opções para resposta, variando entre "Definitivamente SIM, Indeciso e Definitivamente NÃO". Essas respostas são obrigatórias;
- Para cada resposta, haverá a opção de expor sua opinião sobre o tema, não sendo uma ação obrigatória.

Figura: Estimativa do volume de resíduos provenientes de pás eólicas gerados pelo seu descomissionamento (Dados em toneladas). (Fonte: Autor)



1. Setor de atuação da empresa: *

2. Cargo que ocupa na empresa: *

3. Tempo de atuação na empresa: *

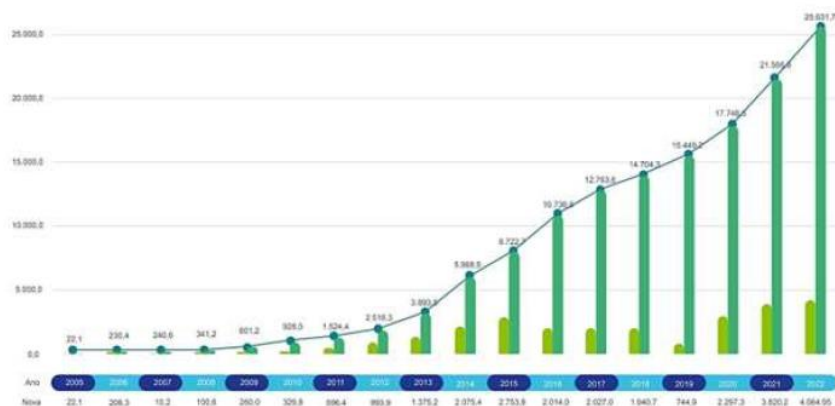
4. Tempo de experiência: *

Grupo A: Aspectos gerais sobre energia eólica

Nos últimos anos, o Brasil tem visto uma expansão notável na capacidade de turbinas eólicas, sinalizando uma mudança significativa em direção a fontes de energia mais limpas e renováveis. Com vastas áreas favoráveis à geração de energia eólica, especialmente ao longo da costa e em regiões interiores com altos ventos, o país se destaca como um líder regional no setor.

Essa expansão é impulsionada por diversos fatores, incluindo políticas governamentais favoráveis, como leilões de energia que estimulam investimentos em projetos eólicos, e um crescente interesse do setor privado em fontes de energia renovável. Além disso, avanços tecnológicos nas turbinas eólicas tornaram essa forma de energia mais acessível e eficiente, contribuindo para seu rápido crescimento.

Figura: Expansão da capacidade instalada de turbinas eólica no Brasil. Dados em MW (Fonte: ABEEólica, 2022)



5. Afirmação 1: O aumento da taxa de implementação de parques eólicos em escala global é inegável. Nos próximos anos, espera-se um crescimento exponencial dessas instalações. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

6. Afirmação 1- Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

7. Afirmação 2: O Brasil tem acompanhado um notável crescimento de projetos eólicos com uma quantidade expressiva de usinas e uma potência instalada considerável. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

8. Afirmação 2 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

9. Afirmação 3: O tempo de vida-útil de um sistema eólico é de 20 anos. Com a crescente instalação de parques eólicos, há uma previsão substancial de descomissionamento de pás eólicas nos próximos anos. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

10. Afirmação 3 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

11. Afirmação 4: Diferentemente da torre fabricada de concreto ou metal, devido as suas dimensões e materiais (fibra de vidro e resina) de fabricação, as pás são os componentes de uma turbina eólica que apresentam os maiores obstáculos para sua disposição ao término de sua vida útil. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

12. Afirmação 4 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

Grupo B: Aspectos gerais sobre a atual disposição de pás eólicas em fim de vida útil no Brasil

No Brasil, o descarte de pás eólicas em fim de vida útil é um desafio que requer soluções adequadas. Essas pás, compostas por materiais como fibras de vidro e resinas, muitas vezes são destinadas a aterros sanitários, levantando preocupações ambientais e de ocupação de espaço. Outras alternativas de disposição e reciclagem estão sendo exploradas para lidar de forma mais eficiente e sustentável com esses resíduos específicos.

Figura: Pá descartada em aterro sanitária (Fonte: Simpsom, 2020 - coloradosun.com)



13. Devido a ausência de iniciativas ou obrigatoriedade do correto direcionamento ambiental, o descarte de pás eólicas em aterros sanitários é uma prática comum no Brasil, gerando preocupações ambientais e de ocupação de espaço. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

14. Afirmação 1- Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

15. O descarte em aterros sanitários representa um desafio ambiental significativo devido aos materiais compósitos das pás eólicas, como fibras de vidro e resinas, no entanto é a alternativa mais praticada no mercado brasileiro. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

16. Afirmação 2 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

17. Uma alternativa imediata é a incineração, no entanto ela não apresenta retorno financeiro direto, reduzindo a possibilidade de iniciativas nessa direção. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

18. Afirmação 3 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

19. A incineração enfrenta limitações devido aos gases emitidos durante a queima e aos resíduos sólidos resultantes, conhecidos como cinzas. *

Marcar apenas uma oval.

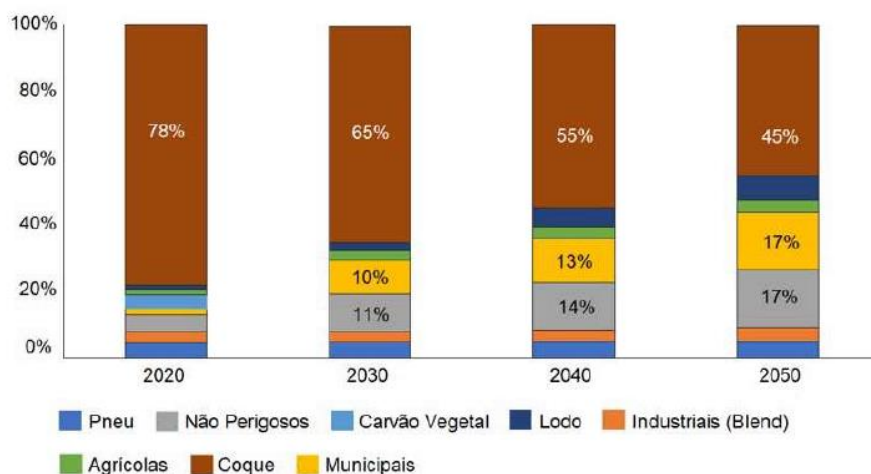
- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

20. Afirmção 4 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

Grupo C: Aspectos gerais sobre coprocessamento de resíduos

O coprocessamento de resíduos é uma técnica que aproveita resíduos industriais, urbanos ou agrícolas como substitutos de matérias-primas ou combustíveis convencionais em processos industriais, como a produção de cimento. Essa abordagem contribui para a preservação de recursos naturais, a redução da geração de resíduos e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes de descartes inadequados. Os benefícios incluem a redução da quantidade de resíduos destinados a aterros, a recuperação de energia, a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e a economia de recursos naturais. Apesar disso, é necessário considerar os potenciais impactos negativos, como a emissão de poluentes atmosféricos, a necessidade de controle rigoroso das emissões para evitar impactos na saúde humana e ambiental, e a possibilidade de contaminação do produto final se os resíduos não forem tratados adequadamente. No Brasil, o coprocessamento de resíduos está em ascensão devido à demanda por soluções sustentáveis na gestão de resíduos e à busca por práticas mais amigáveis ao meio ambiente na indústria.

Figura: Projeção da transição do consumo energético em fábricas de cimento no Brasil (Fonte: EPE, 2020)



21. Afirmação 1: O cenário do coprocessamento de resíduos no Brasil está em constante evolução, trazendo oportunidades promissoras para a gestão ambiental e a sustentabilidade.

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

22. Afirmação 1 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

23. Afirmação 2: Há uma crescente conscientização sobre os benefícios ambientais do coprocessamento, contribuindo para uma visão mais positiva dessa prática em diversos setores da sociedade brasileira. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

24. Afirmação - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

25. Afirmação 3: O contínuo desenvolvimento da infraestrutura para o coprocessamento de resíduos no Brasil reflete o compromisso crescente com soluções inovadoras e sustentáveis para o gerenciamento de resíduos, no entanto ainda há desafios logísticos a serem enfrentados entre fonte geradora e coprocessadora. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

26. Afirmação 3 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

27. Afirmação 4: O cumprimento rigoroso das normas ambientais e regulamentações governamentais fortalece a credibilidade e a eficácia do coprocessamento de resíduos, impulsionando sua adoção e contribuindo para um futuro mais sustentável. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

28. Afirmação 4 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

Grupo D: Viabilidade técnica do coprocessamento de resíduos provenientes de pás eólicas em fim de vida útil

Segundo Liu et al. (2019), reciclar 1 tonelada de resíduos de pás eólicas pode substituir 600kg de carvão. Hanes et al. (2021) e Nagle et al. (2020) observaram que esse material pode substituir clínquer na produção de cimento. A EPRI sugere que uma tonelada de material de pá de turbina eólica pode substituir 0,3 tonelada de sílica e 0,27 tonelada de calcário na fabricação de cimento, reduzindo cerca de 2% das emissões de CO₂ do processo do forno de cimento. Se 30% do carvão for substituído pelo material da pá, pode-se evitar aproximadamente 2% das emissões de CO₂ do forno de cimento. No entanto, a presença de boro nos resíduos pode retardar o tempo de cura do cimento (Pickering, 2006), e a composição do material da pá deve ser conhecida previamente para classificá-lo com base no tipo de resina usada (Beauson et al., 2022).

Figura: Resíduo de pá eólica em processamento para coprocessamento. (Fonte: GE News, 2020; FARZAN, 2022)



29. Afirmação 1: No Brasil, o uso de resíduos de pás eólicas em recuperação energética por meio do coprocessamento pode ser uma solução viável e eficiente. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

30. Afirmação 1- Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

31. Afirmação 2: O uso de pás eólicas para recuperação energética pode promover a redução de uso de combustíveis fósseis e redução do custo de fabricação do cimento, se tornando uma alternativa promissora para a gestão sustentável desses materiais. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

32. Afirmação 2 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

33. Afirmação 3: A caracterização detalhada dos resíduos de pás eólicas, incluindo sua composição química e física, é essencial para determinar sua adequação ao processo de coprocessamento. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

34. Afirmação 3 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

35. Afirmação 4: A colaboração entre empresas do setor eólico, fabricantes de cimento e instituições de pesquisa é fundamental para impulsionar a inovação e desenvolvimento de melhores práticas no coprocessamento de resíduos de pás eólicas. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
☐ Provavelmente SIM
☐ Indeciso
☐ Provavelmente NÃO
☐ Definitivamente NÃO

36. Afirmação 4 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

Grupo E: Regulamentação e políticas públicas

As regulamentações referentes ao descarte de resíduos de pás eólicas, classificados como Classe II (Não perigosos e não inerte), desempenham um papel crucial na gestão ambiental e na promoção da sustentabilidade. No contexto das políticas públicas, é fundamental que haja uma estrutura regulatória clara e abrangente para orientar as práticas de descarte de resíduos de pás eólicas. Isso inclui a definição de padrões de manejo, transporte e disposição final desses resíduos, bem como a implementação de medidas de controle e fiscalização para garantir o cumprimento das normas estabelecidas.

37. Afirmação 1: As regulamentações referentes ao descarte de resíduos de pás eólicas, classificados como Classe II (Não perigosos e não inerte), desempenham um papel crucial na gestão ambiental e na promoção da sustentabilidade. No contexto das políticas públicas, é fundamental que haja uma estrutura regulatória clara e abrangente para orientar as práticas de descarte de resíduos de pás eólicas. Isso inclui a definição de padrões de manejo, transporte e disposição final desses resíduos, bem como a implementação de medidas de controle e fiscalização para garantir o cumprimento das normas estabelecidas. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

38. Afirmação 1- Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

39. Afirmação 2: Novas regulamentações são necessárias para orientar e regular o descarte e o reaproveitamento de resíduos de pás eólicas, garantindo práticas ambientalmente sustentáveis. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

40. Afirmação 2 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

41. Afirmação 3: A responsabilidade pela destinação adequada de resíduos de pás eólicas deve ser compartilhada entre fabricantes, operadores de parques eólicos e autoridades reguladoras. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

42. Afirmação 3 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:

43. Afirmação 4: A governança eficaz é crucial para o sucesso de projetos relacionados ao coprocessamento de resíduos de pás eólicas, exigindo coordenação entre diferentes partes interessadas e níveis de governo. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Definitivamente SIM
- ☐ Provavelmente SIM
- ☐ Indeciso
- ☐ Provavelmente NÃO
- ☐ Definitivamente NÃO

44. Afirmação 4 - Caso o entrevistado tenha a intenção de comentar sobre o tema e resposta, utilizar campo abaixo:
