

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGE

PLINIO CENTOAMORE

**ANÁLISE DE PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR PARA DESTINAÇÃO DE
PÁS DE TURBINAS EÓLICAS EM FINAL DE VIDA**

SÃO PAULO
2020

Centoamore, Plinio.

Análise de práticas de economia circular para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida. / Plinio Centoamore. 2020.

139 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2020.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

1. Economia circular. 2. Pás de turbinas eólicas. 3. Energia eólica. 4. Final de vida. 5. Sustentabilidade.

I. Rodrigues Pinto, Luiz Fernando. II. Título

CDU 658.5

PLINIO CENTOAMORE

**ANÁLISE DE PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR PARA DESTINAÇÃO DE
PÁS DE TURBINAS EÓLICAS EM FINAL DE VIDA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – Uninove como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Produção

Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto

**São Paulo
2020**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE


Plinio Centoamore

Título da Dissertação: Análise de Práticas de Economia Circular para Destinação de Pás de Turbinas Eólicas em Final de Vida.

A Comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o(a) candidato(a) Plinio Centoamore **APROVADO**.

São Paulo, 18 de novembro de 2020.

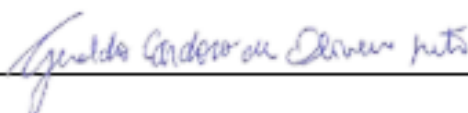
Prof(a). Dr(a). Luiz Fernando Rodrigues Pinto (UNINOVE / PPGE) - Orientador



Prof(a). Dr(a). Antonio Freitas Rentes (USP São Carlos / EESC) - Membro Externo



Prof(a). Dr(a). Geraldo Cardoso de Oliveira Neto (UNINOVE / PPGE) - Membro Interno



São Paulo
2020

RESUMO

O crescimento exponencial de parques eólicos deve gerar uma grande quantidade de pás de turbinas eólicas para descarte nas próximas décadas. A vida útil em serviço destes componentes é avaliada entre 20-25 anos. A situação apresentada explora a questão da destinação sustentável para as pás, considerando suas dimensões extremas em conjunto com as imensas quantidades geradas pelo seu final de vida. A busca por definições para destinação das pás, assume um carácter de urgência, porque se aproxima o tempo em que a quantidade de pás disponíveis para descarte atingirá um volume difícil de administrar. O objetivo deste trabalho foi analisar as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas, alinhadas ao conceito de Economia Circular, orientadas à circularidade dos materiais que compõe sua estrutura física. Muitas destas alternativas ainda não demonstraram consistência suficiente para garantir uma destinação ambientalmente segura e que represente um ganho econômico para a sociedade como um todo. O método de pesquisa utilizado neste estudo foi análise de especialistas que trabalham em empresas do setor de energia eólica. O resultado desta pesquisa indicou as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida. A contribuição teórica deste trabalho consistiu na consolidação ainda não encontrada na literatura das alternativas de destinação de turbinas eólicas. Em termos de contribuição prática, a análise cruzada de dados teóricos com a experiência de especialistas oferece a gestores informações relevantes a serem consideradas em tomada de decisão. Além disso, este estudo contribui na forma de um alerta para a sociedade para os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de pás de turbinas eólicas.

Palavras-chave: Economia Circular. Pás de Turbinas Eólicas. Energia Eólica. Final de Vida. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Wind farms exponential growth will generate a huge amount of wind turbine blades available for disposal. This fact will be due to the life span perspective on service of a wind turbine blade, which is design to work under normal conditions to last about 20-25 years. The current situation arises questions in terms of guarantee a sustainable destination for wind turbine blades, considering their large dimensions together with huge amounts of available parts to be disposal. For this purpose, the study aim to analyze alternatives on destinations for such components that reached their end of service life, considering the concepts of a Circular Economy, adopting an orientation towards blades materials components circularity. The potential alternatives shown at literature are still in processes development phase. Some of these alternatives do not demonstrate yet enough consistency to provide a sustainable way to disposal and, at the same time represent an economic gain for the society as such. These possibilities are spread out on several academic studies, having every one, a diverse emphasis for each pathway, so much as reconfiguration for a different application than the original one, throughout recycling processes of materials components, or even landfilling or incineration. The utilized research method was an analysis from experts, which belongs to wind energy market. Using this framework, and combining such possibilities in the same text, this research presents alternatives for blades disposal to those experts, and listened to them about this issue. For the Academy, having a single text containing those available alternatives can be helpful, and, for market could help to take right decisions. For the society as a whole, it will bring an environmental consciousness. Results shows possible destinations, difficulties reported on proper disposal of blades and appropriate actions in terms of processes developments for blades destinations. Debate responsibilities and the role of official agencies related to this issue. Maintain a focus on concerns that belongs to this business, searching for attitudes environmentally sustainable, combining such activity with a positive financial result.

Keywords: Circular Economy. Wind Turbine Blades. Wind Energy. End of Life Destination. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Previsão e Tendências de Consumo Global de Energia.....	15
Figura 2: Exemplos de Aplicação em Parque Infantil na Holanda.....	22
Figura 3: Instalação Urbana em Rotterdam, Holanda.....	22
Figura 4: Projeto de Ponto de Ônibus Feito com Pás de Turbinas Eólicas.....	23
Figura 5: Processo de Recuperação de Energia por Queima em Leito Fluidizado....	24
Figura 6: Ilustração de Partes de uma Turbina Eólica.....	28
Figura 7: Aterro Sanitário nos EUA no Estado de Wyoming.....	30
Figura 8: Estrutura da Dissertação de Mestrado.....	32
Figura 9: Representação Gráfica da Teoria Malthusiana da População.....	34
Figura 10: Caracterização de Fluxo Linear Curto, Linear Longo, Circular Curto e Circular Longo.....	38
Figura 11: Matriz Combinada Circularidade/Longevidade no Uso de Recursos.....	39
Figura 12: Estratégias de Projetos Ciclo Fechado no Uso de Recursos.....	41
Figura 13: Estratégias de Projetos para Desacelerar o Uso de Recursos.....	41
Figura 14: Definições de Reciclagem Baseadas em Terminologias de Reciclagem de Materiais Plásticos.....	42
Figura 15: Características de Destinação - Resíduos de Pás Turbinas Eólicas.....	43
Figura 16: Hierarquia das Categorias de Gerenciamento de Resíduos.....	44
Figura 17: Ciclo de Vida de uma Turbina Eólica.....	47
Figura 18: Representação da Estrutura Metodológica da Pesquisa.....	67
Figura 19: Seleção de Artigos para Análise Sistemática.....	73
Figura 20: Ciclo de Destinação de Resíduos de Pás de Turbinas Eólicas em Final de Vida.....	105
Gráfico 1: Capacidade Mundial Instalada Cumulativa – Energia Eólica <i>Onshore</i>	17
Gráfico 2: Capacidade Mundial Instalada Cumulativa – Energia Eólica <i>Offshore</i>	17
Gráfico 3: Distribuição Geográfica de Artigos.....	49
Gráfico 4: Distribuição de Artigos por País.....	49
Gráfico 5: Distribuição de Artigos por Ano de Publicação.....	50
Gráfico 6: Distribuição de Artigos por Periódicos.....	51
Gráfico 7: Distribuição de Ciclo de Vida Útil de Turbinas Eólicas.....	60
Gráfico 8: Projeção Global de Resíduos Gerados de Pás de Turbinas Eólicas.....	62
Quadro 1: Distribuição Geográfica dos Artigos por Continentes.....	48

Quadro 2: Resumo das Destinações de Resíduos de Pás de Turbinas Eólicas.....	63
Quadro 3: Fluxo de Combinações de Palavras-chaves.....	72
Quadro 4: Segmento de Atuação e Tempo de Experiência Profissional.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção e Consumo Mundial de Energia por Ano.....	15
Tabela 2 - Alternativas de Destinação de Pás de Turbinas Eólicas Encontradas nos Artigos Seleccionados.....	64
Tabela 3 – Quadro Resumo das Respostas Obtidas nos Questionários.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

BTU – British Thermal Unit

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer

GJ - Gigajoules - 10⁹ Joules

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GW – Gigawatts - 10⁹ Watts

KW – Kilowatts - 10³ Watts

MW – Megawatt - 10⁶ Watts

MW/ano – Megawatt por ano

MWh – Megawatt hora

TOE – Tonnes of Oil Equivalent

∞ – Infinito

LISTA DE SIGLAS

AWEA – American Wind Energy Association

BP – British Petroleum

ETIPWind – European Technology & Innovation Platform on Wind Energy

EU Landfill Directive – European Council Directive 1999/31/EC em Abril de 1999

GWEC – Global Wind Energy Council

IACMI – Institute for Advance Composites Manufacturing Innovation

SusChen – The European Technology Platform for Sustainable Chemistry

UN – United Nations

WindEurope – The Association for Wind Energy in Europe – (Antiga EWEA)

WWEA – World Wind Energy Association

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 A NECESSIDADE DE ENERGIA.....	14
1.2 LACUNA DE PESQUISA.....	18
1.3 PERGUNTAS DE PESQUISA.....	25
1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	26
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	27
1.6 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	28
1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	31
2 REVISÃO DA LITERATURA	33
2.1 ECONOMIA CIRCULAR.....	33
2.1.1 Conceituação da Economia Circular.....	33
2.1.2 Circularidade e Longevidade.....	36
2.1.3 Desenvolvimento de Projetos de Produto para Economia Circular.....	40
2.1.4 Alternativas de Destinação de Pás de Turbinas Eólicas em Final de Vida.....	42
2.1.5 Estrutura Hierárquica das Categorias de Gerenciamento de Resíduos.....	43
2.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA.....	45
2.2.1 O Ciclo de Vida de uma Turbina Eólica.....	46
2.2.2 Desenvolvimento da Revisão Bibliométrica.....	47
2.2.3 Desenvolvimento da Revisão Sistemática.....	51
2.2.4 Descrição das Alternativas de Destinação para Pás de Turbinas Eólicas.....	55
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	66
3.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA DA PESQUISA.....	66
3.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	67
3.3 ANÁLISE DOS ESPECIALISTAS.....	74
3.3.1 Elaboração do Questionário.....	74

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1 ASPECTOS GERAIS	80
4.1.1 Discussões sobre Aspectos Gerais	84
4.2 REUSO/REDISTRIBUIÇÃO	86
4.2.1 Discussão sobre Reuso/Redistribuição	89
4.3 REMANUFATURA	90
4.3.1 Discussão sobre Remanufatura	93
4.4 RECICLAGEM	94
4.4.1 Discussão sobre Reciclagem	96
4.5 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA	98
4.5.1 Discussões sobre Recuperação de Energia	100
4.6 DISPOSIÇÃO	101
4.6.1 Discussão sobre Disposição	103
4.7 CICLO DE DESTINAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS	104
5 CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS	111
APÊNDICE A	117

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento global energético está entrando em um novo período histórico, quando energia limpa e de baixa emissão de carbono deva ser inevitavelmente requerida (CAINENG *et al.*, 2016). No que diz respeito as características de sustentabilidade na geração de energia elétrica através da força dos ventos, o futuro de curto e médio prazo nos prepara surpresas, com consequências que irão exigir soluções para enfrentar os desafios que se descortinam em um horizonte próximo. Desta maneira os princípios da Economia Circular podem ser de extrema importância e utilidade para o encaminhamento de soluções ambientalmente corretas, endereçando soluções para eventuais efeitos nocivos advindos da exploração de uma fonte de recursos renováveis.

“É incontestável que o vento oferece energia ambientalmente amigável, o que não significa que exista ausência de impacto ambiental gerado pela fabricação, serviço e descomissionamento” (KALKANIS *et al.*, 2019, p. 1136).

1.1 A NECESSIDADE DE ENERGIA

Conforme Farias & Sellito (2011, p. 7), a energia pode ser definida como a capacidade de realizar trabalho ou de transferir calor. As necessidades energéticas do ser humano variam conforme sua evolução ao longo da história. No início, alimentação, iluminação noturna, aquecimento para sobrevivência e conforto, para em seguida dirigir um olhar para segurança e como meio de armazenamento de recursos (FARIAS & SELLITO, 2011). Na tabela 1, ficam demonstrados a produção e o consumo mundial de energia associados às suas fontes primárias de geração, representados em ‘toe’ – Tonnes of Oil Equivalent.

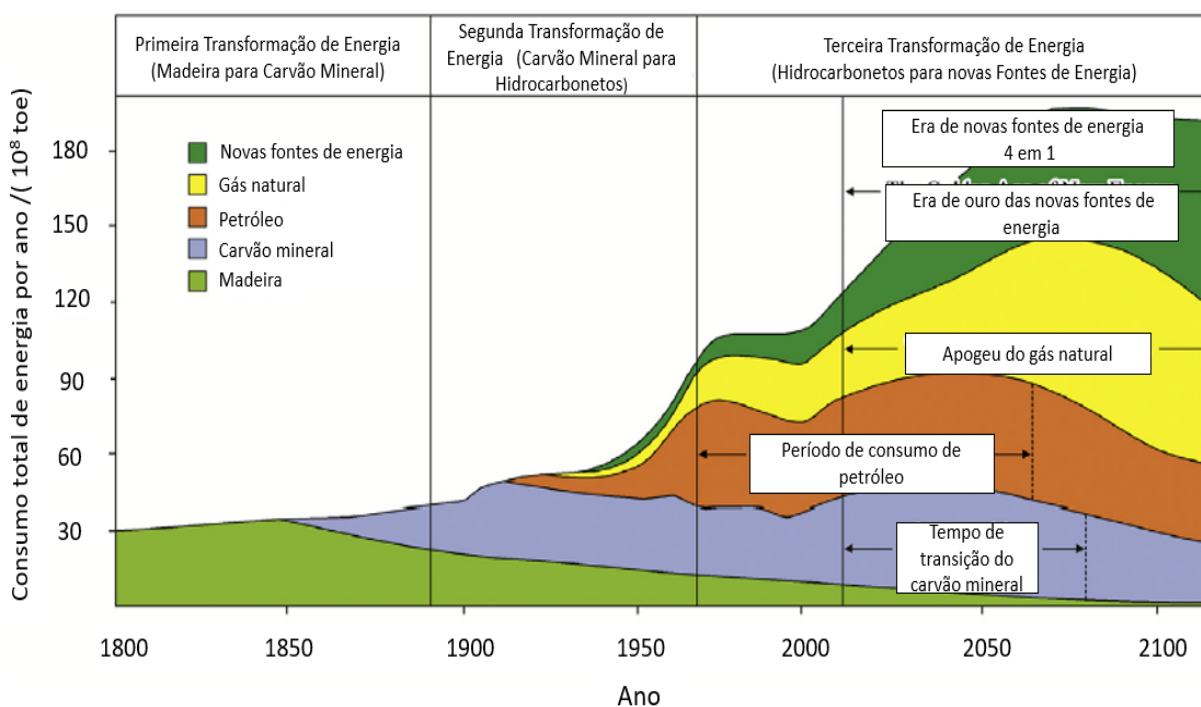
Tabela 1 - Produção e Consumo Mundial de Energia por Ano (base 2018) em 10^8 toe

Fonte de Energia	Item	Mundo (10^8 toe)	(%)
Petróleo	Produção	47,21	34,24
	Consumo	47,11	34,46
Gas Natural	Produção	30,93	22,4
	Consumo	30,66	22,42
Carvão Mineral	Produção	39,64	28,74
	Consumo	38,82	28,4
Energia Nuclear	Produção	5,74	4,16
	Consumo	5,74	4,21
Energia Hídrica	Produção	9,12	6,62
	Consumo	9,12	6,65
Energia Renovável	Produção	5,27	3,84
	Consumo	5,27	3,86
Total	Produção	137,91	100,0
	Consumo	136,72	100,0

Fonte: Dados retirados da BP – British Petroleum Statistical Review of World Energy 2018.

Na Figura 1 estão demonstrados os períodos projetados de consumo global de energia, explanando as bandas de fontes primárias de energia e seu comportamento em relação ao consumo ao longo dos anos. Representa também uma previsão de variação de consumo das fontes primárias nas próximas décadas.

Figura 1 - Previsão e Tendências de Consumo Global de Energia



Fonte: Caineng *et al*, 2016

Pode-se notar pela Figura 1 que a humanidade passou por duas fases de consumo de energia primária e que atravessa a terceira fase com a coexistência de 4 fontes primárias. Dentre estas fontes encontram-se as fontes renováveis, até então pouco exploradas.

Costuma-se chamar de novas fontes de energia, as fontes originárias de recursos renováveis. São recursos repostos naturalmente pela natureza, não tendo como resultado a interferência humana. Fatores como a disponibilidade de recursos, interesses comerciais, domínio de tecnologias e a preservação do meio ambiente levaram os países em direção a diferentes escolhas para a composição de suas matrizes energéticas para geração de eletricidade. (FARIAS & SELLITO, 2011).

Fontes de energia renováveis, incluindo hídrica, eólica, solar, geotérmica e biomassa, são considerados elementos centrais de uma sociedade moderna objetivando, entre outros atributos, uma baixa geração de gases derivados da queima de combustíveis (CO, CO₂) neste século XXI. Entre as tecnologias disponíveis, a energia eólica, gerada a partir da força dos ventos se apresenta como uma solução com múltiplas vantagens. (LEFEUVRE *et al.*, 2019).

O uso da energia eólica tem crescido globalmente a uma taxa acelerada, onde a capacidade instalada foi multiplicada por 30, tendo como base a data inicial de comparação o ano de 1999 (YAZDANBAKHSH *et al.*, 2018). Somente nos EUA a instalação de parques eólicos com novas turbinas geradoras cresceu a uma taxa de 10 vezes nos últimos anos, sendo que, o mercado americano é o segundo maior do mundo, perdendo somente para a China. (HUNT, WANNER & HENSLEY, 2016).

Em 2016 energias hídrica e eólica lideraram as fontes primárias utilizadas para geração de eletricidade no mundo (LEFEUVRE *et al.*, 2019). Entretanto, a energia eólica apresenta uma taxa de crescimento maior que a de geração hidráulica. De fato, a capacidade instalada global de energia eólica cresceu a uma taxa de 15% em parques *onshore* e de 33% em *offshore*, ano após ano, entre 2010 e 2017 (LEFEUVRE *et al.*, 2019).

Os gráficos 1 e 2 demonstram o aumento da capacidade instalada dos parques eólicos na última década. É fácil perceber a curva de aumento da capacidade instalada acumulada, o que demonstra a dinâmica deste mercado. Para as instalações *onshore* o crescimento segue um incremento anual, em média, de 12% a 15%. Praticamente dobrou em 5 anos. Para o caso das instalações *offshore* este

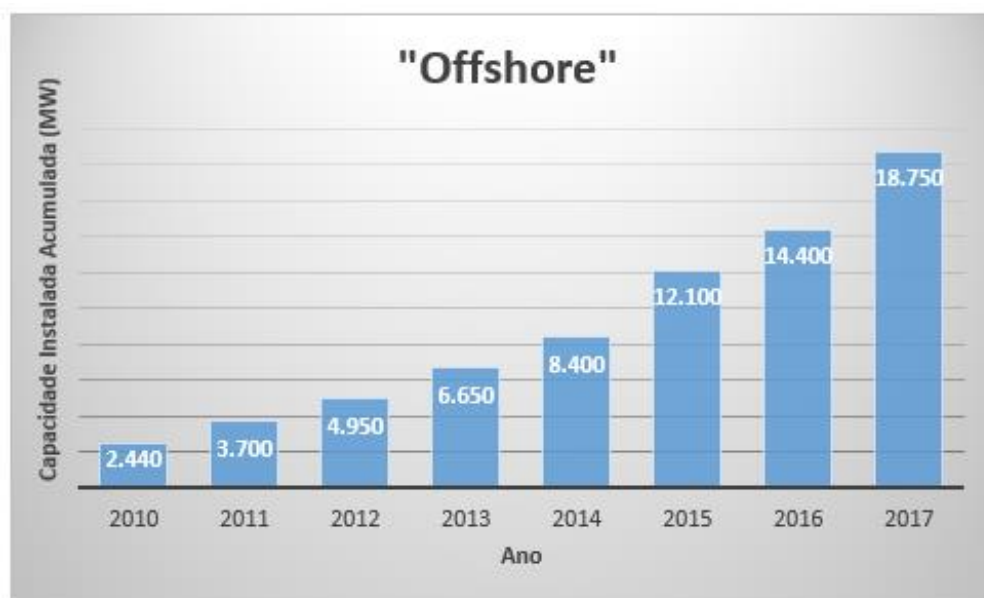
crescimento atinge um valor médio de 35% ao ano, tendo praticamente dobrado a cada três anos.

Gráfico 1 - Capacidade mundial instalada cumulativa - Energia Eólica *Onshore* em MW/ano



Fonte: GWEC – Global Wind Report 2019

Gráfico 2 - Capacidade mundial instalada cumulativa - Energia Eólica *Offshore* em MW/ano



Fonte: GWEC – Global Wind Report 2019

O crescimento da indústria de geração elétrica através da força dos ventos nos últimos 15 anos deverá gerar uma quantidade crescente de resíduos de pás de turbinas eólicas em final de vida útil e deverá ter sua destinação definida a partir de boas práticas de uma economia sustentável (YAZDANBAKHSH *et al.*, 2018). Este é o principal assunto desenvolvido neste estudo.

1.2 LACUNA DE PESQUISA

Os materiais utilizados em pás de turbinas eólicas que estarão disponíveis para descarte, são compostos, na sua grande maioria, por resinas poliméricas reforçadas por fibra de vidro (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer) (YAZDANBAKHSI *et al.*, 2018). A caracterização do descarte destes componentes fica em função de sua vida útil. Considera-se 20 anos como valor médio de vida útil de uma pá de turbina eólica em serviço (BEAUSON *et al.*, 2016; HARDEE, 2012).

A combinação de mantas de fibras de vidro e polímeros, também conhecida como materiais compostos de polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP), representa a grande massa na composição de materiais que constituem as pás (JENSEN & SKELTON, 2018). Além deste composto, nas pás são utilizados parafusos tipo prisioneiros fabricados em aço, fiação em cobre para dissipação de raios atmosféricos, madeira balsa para reforço estrutural e tinta protetiva. O material composto (GFRP) tem em sua composição média de 60% a 70% de mantas de tecido de fibra de vidro tem uma função estrutural funcionando como reforço da superfície da pá (JENSEN & SKELTON, 2018). O restante, de 30% a 40%, é constituído de resinas poliméricas, considerando-se estes valores em peso (JENSEN & SKELTON, 2018).

Entretanto, materiais compostos poliméricos são termofixos e quando atingem seu ponto de cura a resina fica entrelaçada com a manta de fibra de vidro, caracterizando este processo como irreversível, dificultando desta forma sua reciclagem (JENSEN & SKELTON, 2018).

Como já citado anteriormente, pás de turbinas eólicas têm uma vida útil média de 20 anos. Atualmente a grande maioria das pás de turbinas eólicas fabricadas em materiais compostos por resinas poliméricas reforçadas com mantas de fibra de vidro (GFRP), quando atingem seu final de vida útil, são descartadas em aterros sanitários (YANG *et al.*, 2011). Materiais à base de GFRP não são biodegradáveis e seu descarte em aterros sanitários já é largamente restringido por alguns países, incluindo Alemanha e Holanda (CHERRINGTON *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2011). É bem provável que materiais compostos a base de GFRP produzidos atualmente, a partir do instante que atingirem seu final de vida e passarem a ser considerados como material para descarte, diversos países já estarão em um estágio de regulação

avançado na direção de uma destinação sustentável para este tipo de componente (YAZDANBAKHSI *et al.*, 2018).

A alternativa imediata para esta situação é a incineração que também enfrenta limitações em função dos gases de queima gerados e dos resíduos sólidos (cinzas), que acabam sendo destinados também para aterros sanitários (JENSEN & SKELTON, 2018). Da mesma maneira, existe a possibilidade de que estes resíduos sólidos serem endereçados para aditivos em construção civil, mas o balanço financeiro mostra-se negativo (JENSEN & SKELTON, 2018).

De acordo com Rahimizadeh *et al.* (2019), o dramático crescimento da indústria eólica experimentado nos últimos 20 anos irá resultar em uma quantidade expressiva de pás a serem descartadas por conta de seu final de vida útil. Na sua grande maioria, a destinação atual para disposição de pás de turbinas eólicas tem o endereço de aterros sanitários, método este associado a impactos ambientais indesejáveis (JOB, 2013; LARSEN, 2009).

O Instituto para Inovação na Manufatura de Materiais Compostos do Departamento Americano de Energia – IACMI, tem o encargo de incentivar e desenvolver a habilidade de reciclar materiais compostos e tem como meta a reciclabilidade de 80% do material destinado para descarte, meta que deverá ser atingida até o final da década dos anos 2020 (IACMI, 2016).

Através de levantamentos sobre quantidades de pás de turbinas eólicas disponibilizadas para descarte, após o término de sua vida útil, tem-se uma perspectiva dos volumes a serem administrados como material residual para descarte. Estes dados foram obtidos através de pesquisa em uma revisão bibliométrica e sistemática sobre as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida.

Uma análise de dados apresentados pela Sociedade Americana de Energia Eólica - (AWEA), com base no número anualizado de turbinas eólicas acumulado até 2015, mostra que por volta de 2035 a quantidade de pás de turbinas eólicas a serem descartadas deve atingir um volume aproximado acima de 700.000 toneladas anuais (ARIAS, 2016). Baseado no crescimento projetado da utilização de energia eólica experimentado atualmente, pode-se estimar que, por volta de 2055 o montante de pás de turbinas eólicas para descarte deverá atingir um total acima de 2,7 Milhões de toneladas/ano (YAZDANBAKHSI *et al.*, 2018).

Por volta do ano de 2050, existe uma previsão de um montante a ser atingido de aproximadamente de 2,0 Milhões de tonelada/ano de pás de turbinas eólicas para descarte (LIU & BARLOW, 2017). Os volumes tendem a atingir valores significativamente altos, o que traz a necessidade de uma profunda reflexão sobre o desenvolvimento de uma estratégia de destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas sustentável do ponto de vista ambiental, econômico e social (MARSH, 2017). Além das quantidades extremas de resíduos de pás de turbinas eólicas a serem geradas nas próximas décadas, existe o aumento substancial do tamanho e do peso destes componentes (LIU & BARLOW, 2017). Este efeito ocorre pelo aumento da capacidade de geração de energia que vem sendo experimentada nas turbinas das novas gerações, como consequência natural do desenvolvimento tecnológico destes equipamentos (LIU & BARLOW, 2017).

Como referência, pode-se considerar que a grande maioria dos rotores de turbinas eólicas tem três pás (MARSH, 2017). Conforme Liu & Barlow (2017), a potência instalada na maioria dos equipamentos abaixo de 1MW operam com pás com comprimento entre 12 e 15 metros, e peso que varia de 2 a 5 toneladas cada. A partir dos primeiros anos deste século, o incremento da potência instalada para uma faixa entre 1,5 e 4MW, resultou em aumento do comprimento as pás que podem variar entre 40 e 50 metros e com peso em torno de 10 toneladas cada (LIU & BARLOW, 2017). Atualmente já existem turbinas instaladas com potência entre 5 e 8 MW que usam pás de 70 a 80 metros de comprimento, com peso variando entre 25 e 30 toneladas cada (LIU & BARLOW, 2017). A tendência é que este crescimento continue. Estão sendo testadas turbinas com potência de 12MW, com comprimento de pás acima de 100 metros, pesando em torno de 50 toneladas cada (LIU & BARLOW, 2017).

Existem vários estudos indicando diversas direções, tais como um mercado secundário utilizando-se de turbinas eólicas desmontadas antes de seu final de vida para repotenciamento dos parques eólicos (MARSH, 2017; JENSEN & SKELTON, 2018). Pode ser citado também os estudos de Beauson et al. (2016) na utilização de pedaços de pás de turbinas eólicas como reforço para aplicações em construção civil, ou ainda reforço de concreto estrutural conforme citado no trabalho de Yazbandakhsh et al. (2018). Foram encontrados também, estudos de reforços em peças de polímeros inorgânicos usando resíduos de fibra de vidro oriundos de pás de turbinas eólicas em final de vida (NOVAIS et al., 2017). Foram pesquisados artigos que descrevem

estudos de processos de reciclagem de pás de turbinas eólicas, para separação dos materiais utilizados na composição do produto através de queima em leito fluidizado, pirólise ou dissolução química (WU *et al.*, 2019; JENSEN & SKELTON, 2018; KALKANIS *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2012).

A falta de alinhamento de iniciativas em relação ao desenvolvimento e implementação de legislações apropriadas para a definição do tratamento de descarte a ser dado às pás de turbinas eólicas em final de vida útil ao redor do mundo faz com que o posicionamento do mercado diante desta situação assuma orientações que não necessariamente atendam a um descarte considerado sustentável.

Também como exemplo, dentre muitas alternativas em estudo, projetos de arquitetura para equipamentos urbanos conforma mostram as figuras 2, 3 e 4. Estas aplicações estão sendo desenvolvidas com bastante criatividade por um escritório de arquitetura na Holanda e já existem instalações urbanas utilizando-se de pás de turbinas eólicas destinadas ao descarte por terem atingido o final de sua vida útil. Por mais interessante que estas aplicações possam aparentar, as soluções ainda estão longe de um resultado definitivo nesta direção. A utilização de resíduos de pás conforme exemplo mostrado representa uma quantidade muito pequena de pás a serem consumidas neste tipo de aplicação, quando comparada com os volumes gerados para descarte por motivos de término de vida útil. Adicionalmente a este fato, existe a geração de sobras pós adaptação para as utilizações apresentadas. Estas também deverão gerar resíduos, sem mencionar os custos gerados pela necessidade de adaptação para estas novas funções.

Figura 2 - Exemplos de Aplicações em parque infantil na Holanda



Fonte: Wikado Playground, Superuso Studios, Gevind Consortiun, 2015

Figura 3 - Instalação Urbana em Rotterdam, Holanda



Fonte: Re-wind Rotterdam 2012 Foto de Denis Guzzo

Figura 4 – Projeto de ponto de ônibus feito com pás de turbinas eólicas.



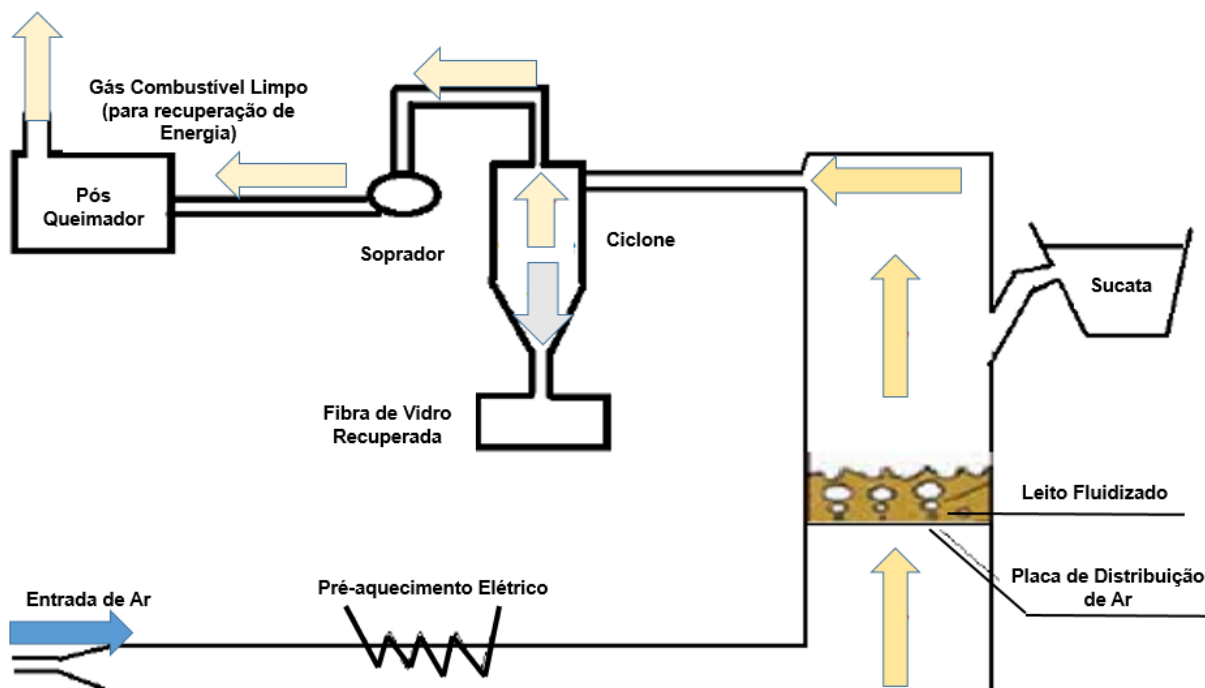
Fonte: Wikado Playground, Superuso Studios Gewind Consortiun, 2015

Considerando a natureza não biodegradável destes componentes, governos e entidades ambientalistas incentivam a elaboração de legislação ambiental para a definição clara das alternativas de descarte aceitáveis (ALBERS *et al.*, 2009). Estes movimentos aumentaram consideravelmente suas demandas na direção de processos de reciclagem ou reaproveitamento ambientalmente sustentável previstos para serem implementados em futuro próximo (CHERRINGTON *et al.*, 2012; LARSEN, 2009).

Quanto às possibilidades de reciclagem das matérias primas utilizadas na fabricação das pás, os artigos pesquisados, tais como os desenvolvidos por Yang *et al.* (2012), Novais *et al.* (2017), Ortegon, Nies & Sutherland (2013), Rahimizadeh *et al.* (2019), Wu *et al.* (2019), Mantelli *et al.* (2019), entre outros, mostram uma série de alternativas para sua destinação. Alguns processos ainda estão em fase de desenvolvimento em laboratório, outros sendo testados em escala de projeto piloto e outros ainda na fase de elaboração da ideia central de destinação sem a garantia da viabilidade técnica para implementação em escala industrial.

Como exemplo, está representado na figura 5, de forma esquemática, um processo de recuperação de energia por queima em leito fluidizado. Este processo está sendo desenvolvido em laboratório (KALKANIS *et al.*, 2019).

Figura 5 – Processo de Recuperação de Energia por Queima em Leito Fluidizado



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

Diversos artigos desenvolvem temas com relação as pás de turbinas eólicas em final de vida. Temas como, quantidade de pás a serem descartadas ao final de suas vidas nos próximos anos (LIU & BARLOW, 2017; LEFREUVRE *et al.*, 2019), possibilidades de utilização de material reciclado como insumo de novos componentes, incluindo novas pás (BEAUSON *et al.*, 2016; NOVAIS *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2019; GALLAGHER *et al.*, 2017; YAZDANBAKHSH *et al.*, 2019). Foram também encontradas tratativas sobre os impactos ambientais e uma discussão sobre as eventuais responsabilidades dos produtores envolvidos na cadeia de suprimento das pás de turbinas eólicas (CHERRINGTON *et al.*, 2012; JENSEN, 2018), aspectos de reciclagem de resíduos de pás com foco nos conceitos de Economia Circular (JENSEN & SKELTON, 2018; DUFLOU *et al.*, 2012; MARSH, 2017). Três artigos discutem a possibilidade de reutilização de pás ou turbinas eólicas completas, a partir de projetos de repotenciamento de parques existentes, redirecionadas para um mercado secundário (GALLAGHER *et al.*, 2017; ORTEGON, NIES & SUTHERLAND, 2013; MARSH, 2017). Foram também identificadas tratativas para processos mecânicos, químicos, térmicos e termoquímicos de reciclagem, no final de vida em serviço de pás de turbinas eólicas (ORTEGON, NIES & SUTHERLAND, 2013; KALKANIS *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2012; TAZI *et al.*, 2019). Por último, dois artigos

discutem a utilização de material reciclado para fabricação de filamentos para impressoras 3D a serem aplicados na manufatura aditiva (MANTELLI *et al.*, 2019; RAHIMIZADEH *et al.*, 2019).

As indicações percebidas nos artigos pesquisados se referem a alternativas de reuso, remanufatura, reciclagem e/ou disposição para resíduos de pás de turbinas eólicas em final de vida útil e estão citadas neste trabalho.

O problema principal é a dificuldade encontrada para visualizar o conjunto de alternativas para descarte existentes. Também não foram levantadas as dificuldades para implementação de tratativas que contemplem os pressupostos de uma Economia Circular, no sentido de fechar o ciclo de utilização das matérias primas principais utilizadas na fabricação de pás de turbinas eólicas. Estas lacunas representam parte do escopo que este trabalho se propõe levar adiante.

1.3 PERGUNTAS DE PESQUISA

Através dos resultados das pesquisas em artigos selecionados percebe-se que iniciativas para determinação dos destinos para resíduos gerados por pás de turbinas eólicas em final de vida útil não demonstram uma consistência que indique com segurança os melhores caminhos a serem trilhados na busca de alternativas para um descarte ambientalmente sustentável.

São percebidas incertezas em relação a diversos estudos, que deveriam caracterizar de forma inequívoca os caminhos técnicos e operacionais para a implementação de soluções que atendam necessidades ambientais, mas que também viabilizem a adoção de soluções que resultem em ganhos econômicos e sociais. As pesquisas referenciadas, dizem respeito à Remanufatura, a Reciclagem e a Recuperação de Energia dos resíduos de pás de turbinas eólicas. Para Remanufatura, as soluções de utilização apresentadas para instalações urbanas encontram-se em fase de desenvolvimento em escritórios de arquitetura na Europa. Para o caso de reciclagem, existem diversos processos sendo estudados, mas não foram encontradas indicações claras de resultados práticos obtidos, tampouco o detalhamento destes processos de elaboração dos resíduos definidos, associados a resultados técnicos para aplicação prática. São indicadas aplicações na indústria da construção civil, como equipamentos de utilização urbana tais como parques infantis, pontes para pedestres e tanques para criação de peixes. Como resultado de processos de reciclagem, são citados a utilização destes resíduos como aditivos para

concreto, como reforço para resinas poliméricas, como base de estradas, para fabricação de asfalto, para fabricação de madeira artificial, etc. Apesar destas indicações, a pesquisa realizada não aponta para nenhuma utilização em uso atualmente, gerando incertezas com relação a viabilidade técnica e econômica destas alternativas em escala industrial.

Na maioria dos casos, as soluções estudadas estão em fase de desenvolvimento de laboratório, necessitando ainda sua definição como um processo de manufatura aplicável em escala industrial. Enquanto não forem apresentadas ao mercado soluções que garantam uma destinação que atenda aos requisitos ambientais e ainda possam gerar um resultado financeiro positivo, a prática comum é o descarte das pás em aterros sanitários.

Esta percepção é sentida, principalmente, quando se avalia como os grandes centros de desenvolvimento de geração de energia elétrica a partir da força dos ventos se comportam em relação a este tema, tais como EUA, Comunidade Européia e China (WWEA, 2011). Neste trabalho, as respostas ficaram restritas às seguintes questões:

- i) Quais são as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida?
- ii) Qual a opinião de especialistas em relação às alternativas e quanto às responsabilidades para a destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida?

O desenvolvimento deste tema foi realizado através de uma análise levada a cabo com a participação de especialistas atuantes em áreas correlatas a este tipo de negócio, com o objetivo de compilar o pensamento do mercado em relação a estes assuntos. Este estudo foi desenvolvido com a ajuda de um questionário montado com base nas indicações de alternativas identificadas nos artigos pesquisados. A partir dos resultados obtidos, foi feita uma comparação entre o que pensa o mercado e o que se apresenta nos artigos pesquisados, sobre este tema. Este estudo comparativo também representa uma lacuna neste ambiente e que, também não foi identificada anteriormente nas pesquisas bibliométrica e sistemática realizadas.

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste estudo é apresentar as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas a partir do seu final de vida útil, comparando as alternativas

em desenvolvimento com as práticas de mercado identificadas por meio de análise de especialistas.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Levantamento das alternativas para descarte encontradas nos artigos pesquisados para o descarte de pás de turbinas eólicas e sua descrição sucinta.

- Consultar especialistas na área de geração de energia eólica, comparando estes resultados à luz das possibilidades de descarte e suas consequências citadas nos artigos considerados na revisão bibliométrica.

- Desenvolver um “Framework” que demonstre as alternativas de descarte em discussão atualmente e inseri-las como um conceito de Economia Circular, apresentando suas interrelações com o meio ambiente.

Tendo como base as possibilidades apresentadas e pouco exploradas para a destinação dos resíduos de pás de turbinas eólicas, este estudo tem a pretensão de explorar as linhas de pensamento, objetivando esclarecer as posições adotadas por especialistas envolvidos nesta área de atividade, em relação as possibilidades de descarte apresentadas através do questionário da pesquisa. Compilar quais são as percepções destes profissionais em relação ao futuro de médio prazo (entre 5 e 15 anos) no que diz respeito aos caminhos a serem tomados para o enfrentamento dos desafios de bem administrar a geração de resíduos de pás de turbinas eólicas, principalmente frente as quantidades estimadas pelas diversas previsões disponíveis.

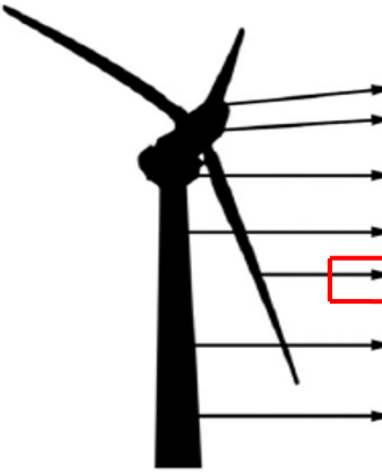
Desta maneira procurar antever o universo que se descortina a frente, explorando os desafios a serem enfrentados na direção de um futuro cercado de preocupações, mas também de oportunidades. Esclarecer as consequentes responsabilidades em relação ao meio ambiente por parte da cadeia de valor deste sistema respondendo às partes interessadas, com assunção do compromisso de aceitar e resolver as questões de sustentabilidade geradas a partir da utilização em larga escala da energia elétrica gerada a partir da força dos ventos.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Na figura 6 está representada, esquematicamente, uma turbina eólica com seus componentes principais identificados. Este estudo está concentrado nas pás para captação da energia potencial contida nos ventos e transferir esta energia, via

seu movimento de rotação para o eixo principal da turbina localizado na nacela, que através de mecanismos gira o eixo do gerador.

Figura 6 - Ilustração de Partes de uma Turbina Eólica, com materiais principais e potencial destinação



Parte da Turbina	Material Principal	Destinação no Final de Vida
Hub	Ferro Fundido	Fundição
Nacela	Material Composto/Aço	Reciclagem/Incineração/ Aterro Sanitário
Componentes Internos	Aço/Bateria/ Componente Elétrico	Reciclagem/Incineração/ Aterro Sanitário
Plataformas & Escadas	Aço/Alumínio	Fundição
Pás	Material Composto	Reciclagem/Incineração/ Aterro Sanitário
Cabos & Barras de Transmissão	Plástico/Cobre /Alumínio	Reciclagem/Fundição
Torre	Aço	Fundição
Miscelâneas	Lubrificantes/Tintas/ Borrachas/Plásticos	Reciclagem/Incineração/ Aterro Sanitário

Fonte: Jensen (2018)

Este estudo está limitado somente às discussões sobre alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida útil, seja por reontenciamento dos parques em que estas turbinas estão instaladas, seja pelo descomissionamento destas turbinas, por força do final de vida em serviço.

1.6 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Conforme Kalkanis *et al.* (2019), não se discute o fato de que o vento ofereça energia ambientalmente amigável, o que não significa que não existam impactos ambientais gerados pela manufatura, operação e descomissionamento de seus equipamentos. Em torno deste conceito é que foi realizado este estudo, uma vez que muito se discute em relação ao desenvolvimento da energia eólica como uma das alternativas de geração de eletricidade mais eficiente que se apresenta atualmente.

Por outro lado, enquanto alguns materiais utilizados em turbinas eólicas são recicláveis com facilidade (tais como parte das torres, caixa de engrenagens, e as estruturas de suporte), as pás, fabricadas em materiais poliméricos compostos termofixos, representam um desafio para descarte (BEAUSON *et al.*, 2016). Turbinas

eólicas são projetadas para uma vida útil de 20-25 anos, considerando-se uma duração média de 20 anos pelos fabricantes destes equipamentos (TAZI *et al.*, 2019).

Apesar das qualidades inegáveis da geração de energia eólica, ainda não existe um histórico de atividades neste segmento que possa fechar o ciclo de vida dos sistemas de geração de eletricidade através da força dos ventos, a partir de conceitos de circularidade. Olhando-se sob a ótica de uma Economia Circular, faltam dados da fase complementar do ciclo produtivo na cadeia de valor deste segmento que possam caracterizar o fechamento fluxo de materiais utilizados na fabricação dos equipamentos de geração como um caminho sustentável para a destinação de seus resíduos após o término de sua vida em serviço. Atualmente a solução tem sido o descarte em aterros sanitários ou a prática da incineração, para os casos onde este descarte esteja proibido. Nestes dois casos, as possíveis soluções não acrescentam nenhuma contribuição para a teoria, não indicam uma solução aplicável ambientalmente aceitável para o mercado e não preservam a sociedade como um todo dos eventuais danos ao meio ambiente que possam ser gerados por estas práticas.

Como exemplo desta prática segue uma sequência de fotos de um aterro sanitário localizado no Estado Americano do Wyoming denominado *Casper Regional Landfill*, mostrada na figura 7. As imagens mostram uma grande área utilizada nas operações para acomodação das pás no solo através de movimentação do terreno com máquinas de terraplanagem e percebe-se o volume ocupado pelos componentes descartados e posteriormente recobertos com material retirado deste solo. Nestes casos, a utilização desta área fica restrita ao descarte dos resíduos de pás. Nota-se também ao fundo, que este aterro fica próximo de um parque eólico, o que, naturalmente, poderia servir como área para instalações de novas turbinas. Neste caso, melhoraria o índice de aproveitamento do potencial de geração deste local, uma vez que parte da infraestrutura necessária para geração já estaria instalada.

Figuras 7 - Aterro Sanitário nos Estados Unidos no Estado do Wyoming



Fonte: Bloomberg Green, 2020. Fotografado por Benjamin Rasmussen

Esta situação faz com que o descarte ambientalmente seguro destes componentes fique relegado a uma importância secundária dentro do contexto do negócio de geração de energia eólica. O impacto desse tipo de descarte caracteriza uma utilização pobre do potencial da área utilizada como aterro sanitário e que deverá permanecer inutilizada por muitas décadas. Com o aumento substancial dos volumes a serem descartados estas áreas se tornaram críticas em relação ao uso do solo, consumindo grande porções de terreno que se tornarão improdutivos. Principalmente em países onde a extensão territorial é limitada.

Os parques eólicos ocupam grandes extensões de terra e as instalações requeridas para geração de energia estão localizadas geralmente em locais remotos da zona rural. Estes parques encontram-se longe dos principais meios de acesso como rodovias ou instalações de desmontagem e reciclagem de materiais, o que faz com que os custos de logística e desmontagem sejam altos (TAZI *et al.*, 2019). Por outro lado, a vida útil destes equipamentos é limitada em 20-25 anos de serviço, o que

direciona para uma necessidade de definição da destinação para descarte de seus resíduos em um curto espaço de tempo.

Somado a estas circunstâncias, as quantidades de pás a serem descartadas após o término da vida útil é enorme, podendo chegar a 2,0 milhões de toneladas por ano por volta de 2050 (LIU & BARLOW, 2017).

Para completar este quadro, este modelo de negócio é relativamente recente, com seu desenvolvimento ainda em estágio inicial de evolução tecnológica. Este fato leva a uma escala de prioridades que não privilegia possibilidades ambientalmente sustentáveis de destinação de seus resíduos. Este trabalho tem como foco esta questão, procurando levantar a importância das atividades a serem desenvolvidas na direção do esclarecimento das alternativas que estão sendo consideradas para descarte de resíduos gerados e sua pertinência dentro do arcabouço de atividades que devem ser desenvolvidas por este mercado.

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Como estrutura deste trabalho, nesta sequência está a Revisão da Literatura, usando como base teórica os conceitos de Economia Circular, dedicando um item a este assunto. Apresentação da revisão bibliométrica e sistemática desenvolvida para estudo das alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida.

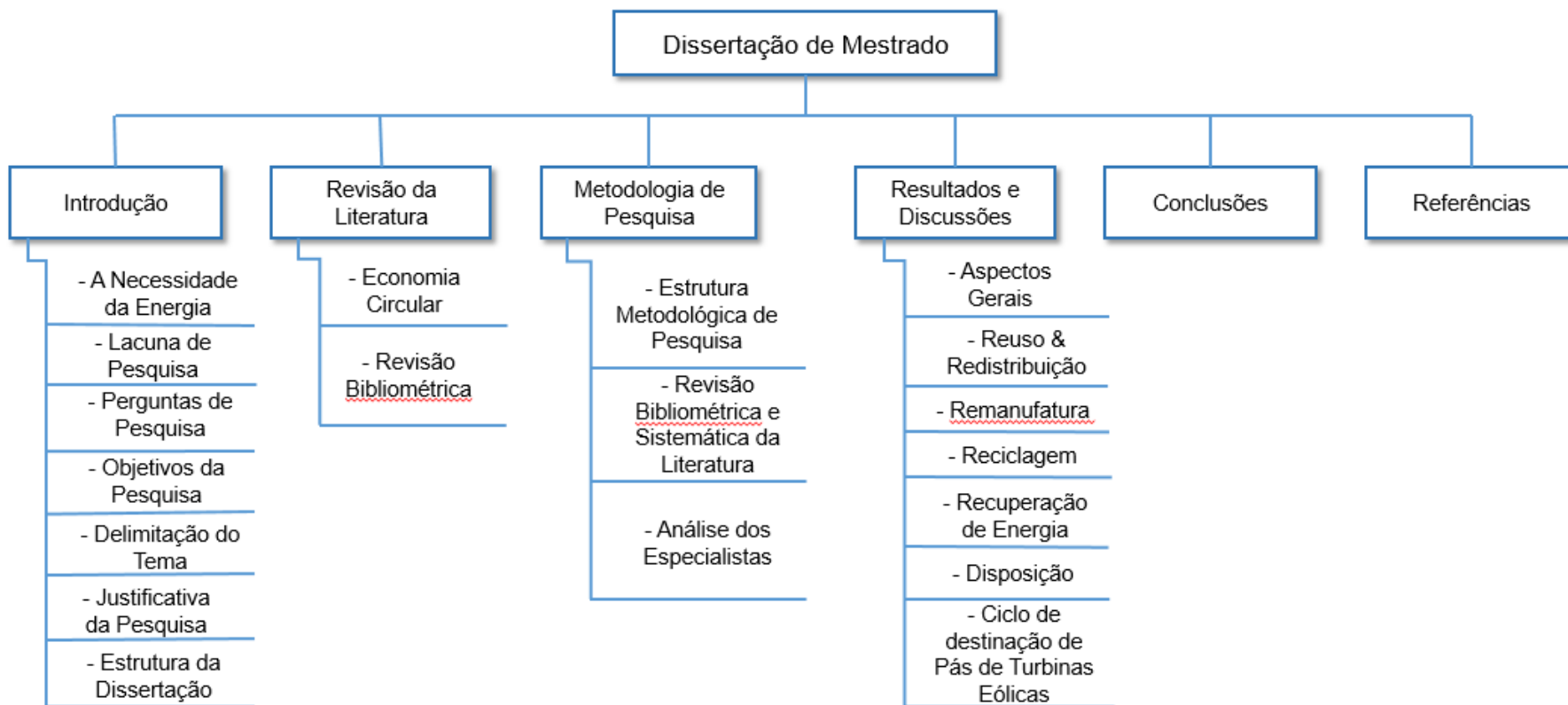
Após, a descrição da Metodologia aplicada nesta pesquisa, com as definições das bases da revisão bibliométrica e sistemática utilizada. A apresentação da forma como foi elaborado a pesquisa através de questionários semiestruturados e dos critérios de escolha dos especialistas para a pesquisa de opinião destes, sua compilação e análise.

A demonstração dos resultados das pesquisas em conjunto com as discussões baseadas nas respostas obtidas, contendo as análises das alternativas para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida, associada aos comentários pertinentes das respostas dos especialistas frente aos dados levantados na revisão bibliométrica.

As conclusões baseadas nos temas percorridos ao longo do estudo considerando-se as informações apresentadas, os fatos citados, construindo uma imagem do futuro baseado nestes dados.

Por fim, a citação completa das referências utilizadas neste estudo.

Figura 8: Estrutura da Dissertação de Mestrado



Fonte: O Autor

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos de Economia Circular e as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida, que foram identificadas na literatura.

2.1 ECONOMIA CIRCULAR

Este trabalho foi desenvolvido com apoio teórico dos conceitos da Economia Circular, e considerando-se as informações apresentadas a partir da revisão da literatura para o atingimento dos preceitos do fechamento do ciclo dos materiais dentro das diretrizes de um sistema caracterizado por uma política restaurativa de materiais utilizados.

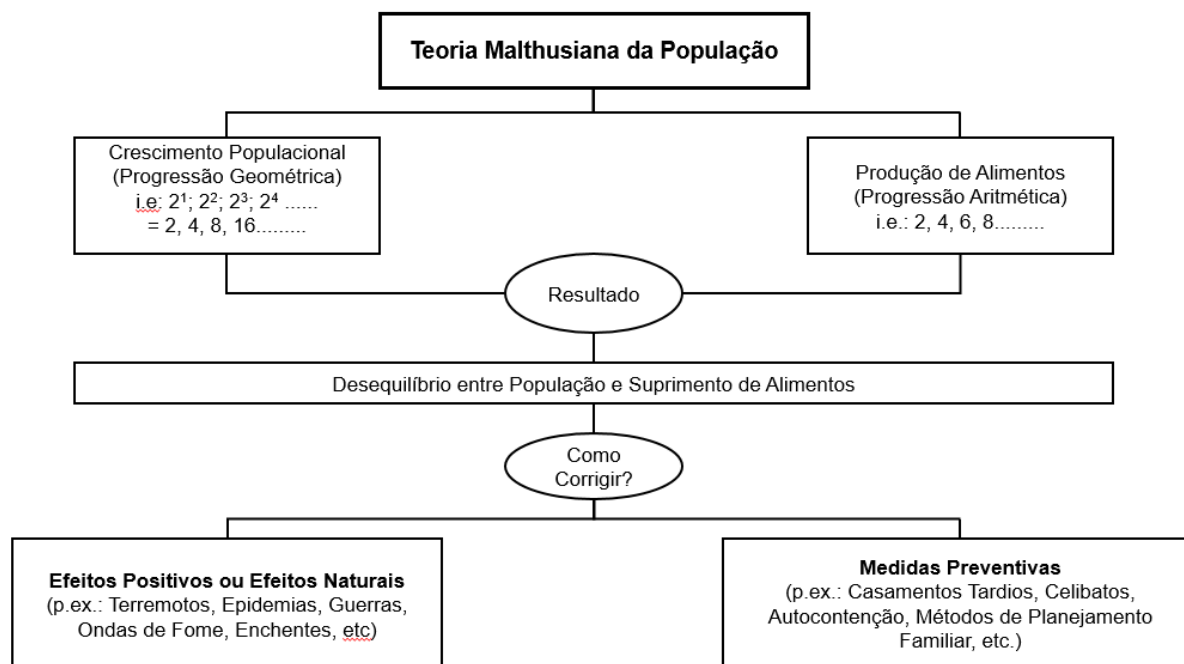
Os conceitos de Circularidade e Longevidade estão representados com a descrição de uma métrica utilizada para dimensionar o nível de aplicabilidade destes dois atributos, complementados por uma maneira combinada de utilização destes conceitos para assegurar uma maior abrangência na sua interpretação. Também estão citadas algumas referências baseadas em artigos científicos pesquisados sobre definições usuais destes conceitos dentro de suas possibilidades de utilização, focando o projeto do produto para um desempenho satisfatório em relação a sua adequação aos pressupostos da Economia Circular. Para completar o assunto, estão listadas as definições para as alternativas de destinações em uso atualmente, seja em fase de desenvolvimento ou em aplicação prática, utilizando-se da terminologia corrente.

2.1.1 Conceituação da Economia Circular

Recursos naturais no planeta Terra são limitados (FIGGE *et al.*, 2018). Da forma como a sociedade se move em direção a um desenvolvimento sustentável, vários debates surgiram na direção em que estes recursos possam ser utilizados de uma forma mais eficiente (FIGGE *et al.*, 2018). A citação acima, é baseada em diversos trabalhos publicados e não necessariamente nos últimos anos. O primeiro conceito de recursos limitados de nosso planeta foi discutido pelo economista e

demógrafo inglês Thomas Robert Malthus, no seu livro *An Essay on the Principle of Population* em 1798, onde foi desenvolvida a Teoria Malthusiana da População (MALTHUS, 1798). Segundo Malthus (1798), a população cresce exponencialmente, enquanto a produção de alimentos cresce aritmeticamente. A seguir, a representação gráfica da teoria desenvolvida por Malthus (1798).

Figura 9 - Representação Gráfica da Teoria Malthusiana da População



Fonte: Malthus, 1798

Em seu trabalho "*Pain-Cost and Opportunity-Cost*", Green (1894), associou a escassez ao custo onde a escassez interfere com as forças econômicas, considerando este fato como verdadeiro, onde a Teoria dos Valores omite o elemento 'escassez' que passa a ter uma aplicação superficial no mundo econômico.

O estudo de Meadows *et al.* (1972) montou um modelo global especificamente para investigar as cinco maiores tendências que formam as preocupações globais: a industrialização acelerada, o rápido crescimento populacional, a desnutrição generalizada, o esgotamento de recursos não renováveis e a deterioração ambiental. Meadows *et al.* (1972) conclui que, se as tendências do crescimento da população mundial, a industrialização, a poluição, a produção de alimentos e o esgotamento de recursos naturais não se modificarem, os limites de crescimento neste planeta serão atingidos em algum momento dos próximos 100 anos. O resultado mais provável é que será repentino e incontrolável, com o declínio da população e da capacidade

industrial. Como complemento desta conclusão, Meadows *et al.* (1972), cita que é possível alterar estas tendências de crescimento e estabelecer condições que sejam ecológica e economicamente estáveis para uma sustentabilidade em um futuro distante. O estado de equilíbrio global pode ser projetado para que as necessidades de materiais básicos para cada pessoa na Terra possam ser satisfeitas, tendo oportunidades iguais para concretizar seu potencial humano individual.

Baseado em Leontief (1991), a ideia que serve de alicerce para a Economia Circular é a de se utilizar repetidamente os mesmos recursos em um ciclo, dissociando estoques preciosos de recursos virgens da atividade econômica. Diante deste conceito existe um amplo espectro de aplicabilidade para Economia Circular.

A história humana esteve sempre fortemente ligada ao controle, extração e uso de recursos naturais (BEHRENS *et al.*, 2007). Entretanto, nas últimas décadas, a demanda por recursos naturais tem se acelerado, na medida que é fortemente considerada uma séria ameaça para o bom funcionamento das economias e das sociedades por estarem associadas aos problemas ambientais, tais como mudanças climáticas, perda de biodiversidade, desertificação e da degradação de ecossistemas (BEHRENS *et al.*, 2007).

As considerações sobre Economia Circular estão em fundamentos de nossa economia industrial que, com base nos pressupostos tradicionais, se tem pautado pelas características fundamentais estabelecidas nos primórdios da industrialização, qual seja, um modelo linear de consumo de recursos (LIEDER & RACHID, 2016). Um modelo baseado em “pegar – fazer - dispor”, onde as empresas extraem o material, aplicam energia e trabalho para fabricação de um produto, o vendem para um consumidor na ponta da linha, que o descarta quando este não serve mais a seus propósitos (BOCKEN *et al.*, 2015).

O conceito de Economia Circular é baseado no estudo de sistemas não lineares, tendo como resultado o fato de que a Economia Circular traça uma clara distinção entre “consumo” e “uso” de materiais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013). Na Economia Circular os materiais que compõe os produtos em final de vida são reaproveitados de alguma maneira em novos ciclos produtivos ou de utilização (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

“A Economia Circular refere-se a uma economia industrial que seja intencionalmente reparadora: ambiciona confiar em energias renováveis; minimiza,

monitora e elimina o uso de substâncias químicas tóxicas; e erradica resíduos através de projetos dedicados” (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013, p. 22).

2.1.2 Circularidade e Longevidade

O conceito de Circularidade, assim como o de Economia Circular, não é novo, especialmente em termos de materiais em ciclos fechado de utilização. Não é uma novidade originada em recentes desenvolvimentos, mas aparece como emergindo nestes tempos através da história: Antes da Revolução Industrial, isto é, no período da fabricação artesanal e dos métodos de produção manual, resíduos de materiais a serem descartados ou não utilizáveis eram praticamente desconhecidos (STRASSER, 2000).

Após a Revolução Industrial, produtos destinados para descarte após seu uso (Obsolescência Planejada), anunciaram a era da moda e do estilo, estimulando conseqüentemente, a mentalidade de ‘jogar fora’, o que atualmente é conhecido como um comportamento de consumo linear (LIEDER & RACHID, 2016). Além disso, considerando-se a mecanização da sociedade através de máquinas a vapor, ferrovias e equipamentos elétricos, uma nova forma de recuperação de produtos apareceu, e é conhecida como remanufatura, na qual produtos duráveis são restaurados para a condição de novos (STEINHILPER, 1998). O nascimento da remanufatura tem sua origem nos tempos da Segunda Guerra Mundial, quando a escassez de recursos obrigou a indústria automotiva a praticar a remanufatura (LIEDER & RACHID, 2016). A escassez de recursos impulsionou o pensamento humano em direção a soluções que possam atender as necessidades prioritárias de sobrevivência, evolução, segurança e conforto para uma vida cada vez mais adaptada as circunstâncias de nossa existência.

Em uma Economia Circular, nutrientes e recursos materiais permanecem dentro da biosfera e nos sistemas de produtos, através da Circularidade (UN - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2012).

Para entender o fluxo – ou a circularidade – dos recursos em questão é necessário definir uma métrica, preferivelmente uma que represente o uso destes recursos ao nível das organizações, individualmente (FIGGE *et al.*, 2018). Diversas formas de medir circularidade foram propostas por diversos estudiosos, mas em todas existem limitações. Algumas matrizes de medição colocam sua atenção em setores

específicos e produtos associados e desenham estas fórmulas para a análise do fluxo de materiais e tipicamente examinam cadeias de suprimentos, na determinação das entradas e saídas de recursos específicos, desde sua extração inicial até a eventual destinação para descarte (LAI *et al.*, 2008).

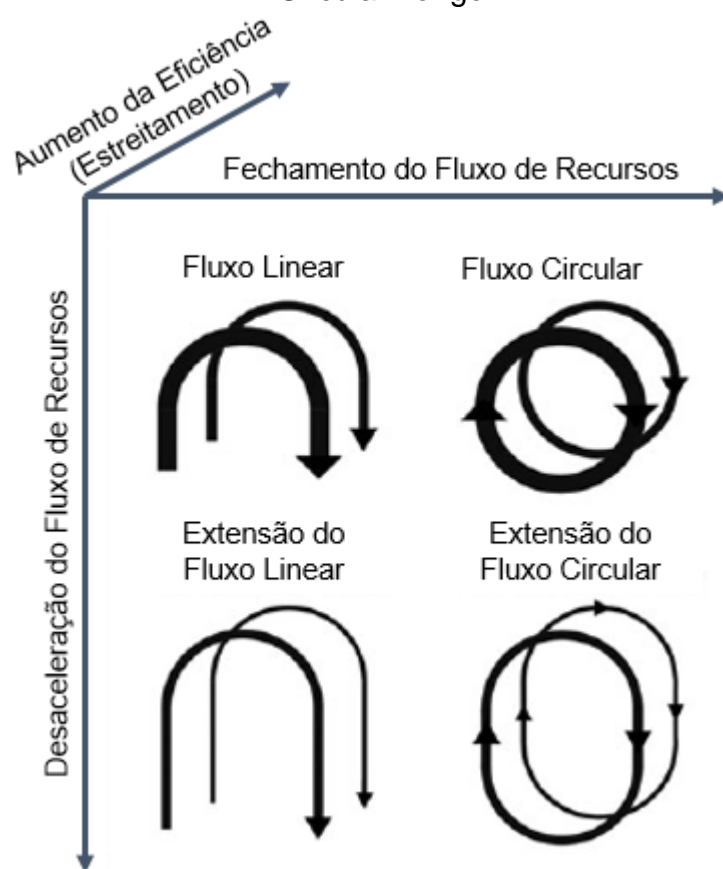
A medida de circularidade reflete a quantidade de vezes que um recurso é usado, na média, em um sistema de produto. A circularidade pode estar entre (1) e infinito (∞). A circularidade igual a (1) é a característica de um sistema totalmente linear; a circularidade infinita (∞), significa um sistema completamente circular (FIGGE *et al.*, 2018).

Uma maneira alternativa para medir a eficiência ecológica de recursos virgens é dar ênfase a sua longevidade, isto é, por quanto tempo um determinado recurso é utilizado e pode ser medido em dias, meses, anos, etc. (FRANKLIN-JOHNSON, FIGGE & CANNING, 2016). A ideia é quanto maior o tempo que um recurso possa ser utilizado, maior sua contribuição para a Economia Circular.

Em um determinado sentido, o trabalho de Franklin-Johnson, Figge & Canning (2016), representa um avanço significativo no entendimento da mensuração da eficiência ecológica de recursos, oferecendo uma alternativa de abordagem que endereça as diversas limitações das medidas de circularidade (FIGGE *et al.*, 2018).

Os dois métodos de medição mostrados, apresentam limitações na extensão em que eles possam expressar a utilização de recursos como uma contribuição para a Economia Circular. Enquanto as medidas de circularidade mostram a média de número de vezes que um recurso é utilizado, estas medidas não fazem nenhuma consideração sobre o período no qual eles foram utilizados (FIGGE *et al.*, 2018). É possível que recursos possam ser utilizados muitas vezes, mas por curtos espaços de tempo. Por outro lado, recursos possam ser usados por longos períodos de tempo, mas não de uma forma circular – fato que é abordado pelo indicador de longevidade, mas que falha no seu endereçamento (FIGGE *et al.*, 2018). A figura seguinte, demonstra graficamente a categorização das abordagens linear e circular na direção de redução do uso de recursos.

Figura 10 - Caracterização de Fluxos Linear Curto, Linear Longo, Circular Curto e Circular Longo



Fonte: Adaptado de Bochen *et al.* (2016)

A partir desta representação fica determinado os conceitos de 'desaceleração do ciclo de uso de recursos', o 'fechamento do ciclo de uso de recursos' e o 'aumento da eficiência de uso de recursos – estreitamento do fluxo'.

Na estrutura desenvolvida por Stahel (1994) fica descrito a seguir, a configuração apresentada na Figura 11, com as seguintes definições:

- Desaceleração do ciclo de uso de recursos: Através de projeto dedicado a bens com vida longa e extensão da vida de produtos (isto é, ciclos de serviços para estender a duração da vida de produtos, como por exemplo, através de reparos, remanufatura, etc.), o período de utilização de produtos é estendido e/ou intensificado, resultando na desaceleração do fluxo de recursos.

- Fechamento do ciclo de uso de recursos: Através de reciclagem, o ciclo entre término de utilização e produção se fecha, resultando em um fluxo circular de recursos.

- Eficiência de recursos ou estreitamento do fluxo de recursos: Objetivar a utilização de menores quantidades de recursos no fluxo produtivo.

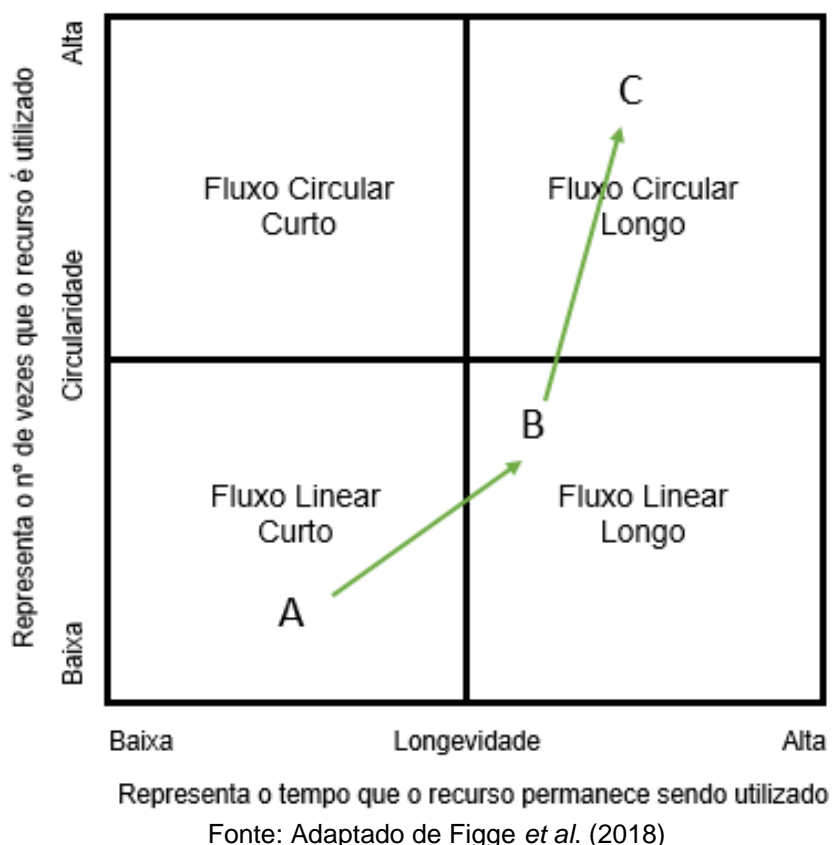
Quando se compara uma Economia Linear com uma Economia Circular se está referindo a um fluxo “berço-para-túmulo” (*cradle-to-grave*) contra um fluxo “berço-para-berço” (*cradle-to-cradle*) (BRAUNGART *et al.*, 2008). “Esta distinção estabelece claramente a diferença entre perfis de fluxo que caracterizam modelos lineares e circulares” (BOCKEN *et al.*, 2016). Além disso, Stahel (1994), refere-se a sistemas cíclicos como “sistemas de fluxo fechado” distinguindo fundamentalmente dois diferentes tipos de ciclo dentro de um ciclo de fluxo fechado, a saber:

- 1) Reutilização de bens e
- 2) Reciclagem de materiais.

Tendo em vista estas considerações, as limitações descritas são eliminadas pela combinação das duas abordagens, com a proposta de utilização de uma métrica com um poder explicativo maior que os oferecidos pelas medidas de circularidade e longevidade individualmente (FIGGE *et al.*, 2018).

A seguir, a matriz representativa da combinação entre Circularidade e Longevidade na utilização de recursos. Desta maneira, esta abordagem mescla os princípios de Circularidade e Longevidade (FIGGE *et al.*, 2018).

Figura 11 - Matriz Combinada de Circularidade e Longevidade na Utilização de Recursos



De acordo com Figge *et al.* (2018), esta matriz combinada entre circularidade e longevidade, identifica quatro possíveis combinações. Esta matriz representa uma estrutura simples de utilização de recursos, onde, sobrepondo os dados de uso inicial (A), com renovação (B) e reciclagem (C) pode-se ilustrar como empresas devem começar a utilizar recursos de uma forma circular longa, ou seja, mais sustentável (FIGGE *et al.*, 2018).

2.1.3 Desenvolvimento de Projetos de Produto para Economia Circular

A preocupação em integrar produtos a uma Economia Circular ocupa um lugar de importância vital no desenvolvimento do projeto base, por que após a caracterização do produto através de suas especificações primeiras, apenas poucas alterações são possíveis sem um prejuízo maior no andamento do projeto do produto (BOCKEN *et al.*, 2016).

Na estratégia de fechar o ciclo de utilização de recursos, a filosofia de projeto conhecida como “berço-a-berço” (*cradle-to-cradle*), propagada por McDonough, Braungart (2002), inspirou diversas empresas e escritórios de engenharia a aplicar um conceito circular ambicioso nos projetos de produto (BAKKER *et al.*, 2010). São apontadas 3 possibilidades para projetos com ciclos fechados de recursos (BOCKEN *et al.*, 2016).

A primeira, com o projeto voltado para um ciclo tecnológico, os projetistas objetivam desenvolver produtos de uma forma que os materiais possam ser reciclados continuamente em novos materiais ou produtos (BOULDING, 1966).

A segunda, um projeto desenvolvido para um ciclo biológico, voltado para produtos para consumo. Através desta estratégia, os produtos de consumo são biodegradáveis e projetados com materiais biologicamente nutrientes (MCDONOUGH & BRAUNGART, 2002). Biodegradação é a capacidade de se degradar a partir de uma atividade biológica, a partir de processos relacionados, nos quais uma matéria orgânica é biologicamente decomposta, através da ação de microorganismos, geralmente bactérias e fungos (VERT *et al.*, 2012).

Por fim, a terceira possibilidade define o projeto com foco em facilidade de desmontagem e remontagem, que dá preferência a configurações que garantam que os produtos e seus componentes possam ser facilmente separados e remontados. (BAKKER *et al.*, 2010).

Figura 12 - Estratégias de Projetos de Produto para Fechar o Ciclo de Utilização de Recursos

Estratégias de Projeto de Produto para Ciclos Fechados de Utilização de Recursos

- Projeto considerando um Ciclo Tecnológico (Desenvolvimento de Serviços)
- Projeto considerando um Ciclo Biológico
- Projeto voltado para facilitar montagem, desmontagem e remontagem

Adaptado de Bocken *et al.*, 2016

Desta maneira, estratégias de projeto de produto para desacelerar o fluxo de recursos na obtenção do produto, assim como garantir um ciclo fechado de uso destes recursos são citadas a seguir:

- Estratégias para desacelerar ciclos de recursos.
- Projeto de produtos para uma longa duração em serviço.
- Projeto para estender a vida útil dos produtos.
- Estratégias de projeto de produto para fechar o ciclo de uso de recursos.
- Projeto para ciclos tecnológicos focados em prestação de serviços.
- Projeto para ciclos biológicos biodegradáveis.
- Projeto com foco em facilidade de montagem e desmontagem, movimentação e transporte.

A figura 12 a seguir apresentam uma visão geral das estratégias de projeto de produto para desaceleração do ciclo de uso de recursos.

Figura 13 - Estratégias de Projeto de Produto para Desacelerar o Ciclo de Utilização de Recursos

Estratégias de Projeto de Produto para Desacelerar ciclos de Utilização de Produtos

Produtos Projetados para uma Vida Útil Longa

- Projeto para Desenvolver Empatia por Parte do Usuário
- Projeto para Garantia de Confiabilidade e Durabilidade

Projetos para Estender a Vida Útil do Produto

- Projeto com Garantia de Manutibilidade e Fácil Reparo
- Projeto Possibilitando Modernização e Adaptabilidade
- Projeto Possibilitando Estandarização e Compatibilidade
- Projeto para Facilidade de Montagem, Desmontagem e Remontagem

Fonte: Adaptado de Bocken *et al.*, 2016

Para completar o panorama de definições e conceitos sobre Economia Circular aplicados aos temas dedicados a este trabalho, é apresentado, a seguir a figura 13 com características comuns a estes assuntos. O quadro delimita as

definições típicas para destinações de resíduos que afetam diretamente o componente referenciado neste estudo, qual seja, pás de turbinas eólicas em final de vida.

Figura 14 - Definições de Reciclagem, Baseadas em Terminologias de Reciclagem de Materiais Plásticos (Hopewell, 2009)

Método de Reciclagem	Definição
a) Reciclagem Primária, inclusive com referência a reciclagem em regime de ciclo fechado (Aström, 1997)	- Reprocessamento Mecânico em um produto com propriedades equivalentes (Hopewell, 2009). " <i>Upcycling</i> " se refere à manutenção ou melhoria das propriedades do material. Este último conceito é reativamente novo e inexplorado, conforme McDounough, 2013.
b) Reciclagem Secundária, inclusive com referência a " <i>downgrading</i> " e a " <i>downcycling</i> "	- Reprocessamento Mecânico em um produto com propriedades menores (Hopewell, 2009). Na reciclagem secundária, o material é reprocessado para um produto de menor valor, tal como borracha em grau industrial reprocessada para borracha de uso geral (Lee,2001).
c) Reciclagem Terciária, também descrita como reciclagem química ou de insumo (despolimerização & repolimerização)	- Recuperação dos constituintes químicos do material (Hopewell, 2009). De uma maneira mais ampla, definido por Kumar, 2011, com a quebra estrutural do material para seu componente base original, (por exemplo através de despolimerização) e a consecutiva recuperação (repolimerização).
d) Reciclagem Quaternária, também descrita como reciclagem térmica, recuperação de energia, e energia de resíduos	- Diz respeito a recuperação de energia dos materiais (Hopewell,2009). Dentro dos conceitos de Economia Circular, esta categoria não é considerada como reciclagem, porque somente o conteúdo enérgico do material é reutilizado novamente, considerando-se portanto um sistema linear.

Fonte: Adaptado de Bochen *et al.*, 2016

2.1.4 Alternativas de Destinação de Pás de Turbinas Eólicas em Final de Vida

As possibilidades de destinação das pás de turbinas eólicas dispostas para alternativas de destinação, seguem alguns caminhos. Estas destinações foram encontradas na revisão de literatura, objeto desta seção, sendo adaptadas e utilizadas a partir de ELLEN MACARTHUR (2013), com as definições explicitadas a seguir. Estas destinações foram agrupadas da seguinte maneira:

a) Reuso/Redistribuição – Uso de um produto novamente para o mesmo propósito que na forma original, ou com uma pequena modificação ou melhoria.

b) Remanufatura – Alocação de materiais e componentes em diferentes usos após o término de sua vida útil, através de diferentes cadeias de valor.

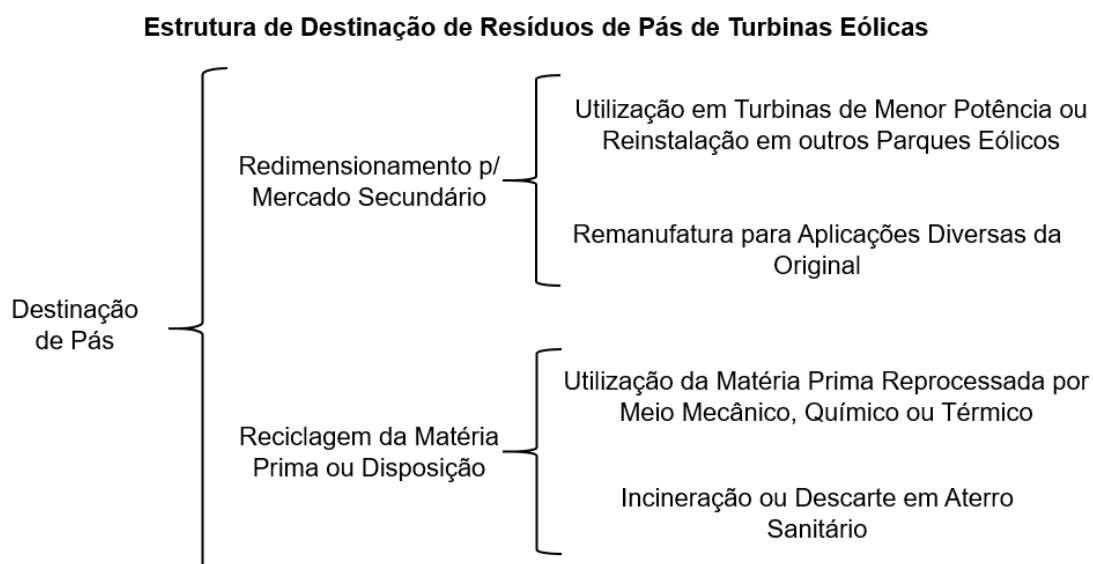
c) Reciclagem – Reciclagem funcional de materiais. Processo de recuperação de materiais para o propósito ou outros propósitos, excluindo-se a recuperação de energia.

d) Recuperação de Energia – Conversão de resíduos não recicláveis de materiais em utilização para aquecimento, geração de eletricidade ou combustíveis através de uma ampla gama de processos de recuperação de energia, incluindo combustão, gaseificação, pirólise, digestão anaeróbica e recuperação de gases de aterros sanitários.

e) Disposição – Envio para incineração do material residual, ou descarte em um local utilizado como depósito controlado de resíduos sólidos, na superfície ou enterrados no solo (Aterro Sanitário).

Na figura 15, encontram-se resumidas, as alternativas de destinação, que foram identificadas nos artigos pesquisados para este estudo, quanto ao reuso/redistribuição, remanufatura, reciclagem, recuperação de energia, disposição para incineração, ou o descarte em aterros sanitários.

Figura 15 - Características de Destinação de Resíduos de Pás de Turbinas Eólicas



Fonte: O Autor

2.1.5 Estrutura Hierárquica das Categorias de Gerenciamento de Resíduos

A Figura 16 representa a sequência natural na estrutura hierárquica para administração de resíduos sob o ponto de vista de uma Economia Circular.

Figura 16 - Hierarquia das Categorias de Gerenciamento de Resíduos

Categorias hierárquicas para gerenciamento de resíduos

- Manter partes por mais tempo. Projetar para facilitar a desmontagem e reciclagem. Diminuir o número de materiais em projeto e fabricação.

Prevenção

Projeto

- Verificar, Manter limpo, Recuperar, Modernizar e Reparar todos os Itens ou peças de Reposição. Reutilizar peças existentes para aplicações diferentes, normalmente com valor menor que o original.

Reuso/Redistribuição

Manutenção
& Reparo

- Transformar os resíduos em novas substâncias ou produtos. Incluindo materiais compostos desde que atendam os protocolos.

Reciclagem

Térmica
Química
Mecânica

- Pirólise
- Leito
fluidizado
- Solvólise
- Fragmentação

- Inclui digestão anaeróbica, incineração para recuperação de energia, gaseificação e pirólise para produzir energia (combustíveis, aquecimento e energia) e sobras para descarte.

Recuperação

Material &
Energia

- Forno de
Cimento
- Incineração

- Envio para aterros sanitários e incineração sem recuperação de energia.

Disposição

Fonte: SusChen - Materials Working Group (2018, p.15). Adaptado pelo Autor

Para dar sequência nesta pesquisa na direção da discussão das alternativas para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida útil, a figura 15 mostrada aqui, esclarece as possibilidades de gerenciamento de resíduos, dividindo estas alternativas em uma estrutura hierarquizada.

Esta representação começa pelo desenvolvimento do projeto com uma característica preventiva. Na sequência, estão explicadas as ferramentas ligadas a Reuso/Redistribuição, depois as características da Reciclagem, Recuperação, e em último a Disposição, com as possibilidades de incineração e/ou de envio para aterros sanitários.

Nesta representação estão considerados as possibilidades de gerenciamento de resíduos, na forma apresentada em categorias, alinhadas com as nomenclaturas usuais verificadas nos artigos selecionados pela pesquisa bibliométrica.

Na próxima seção serão exploradas as alternativas encontradas na revisão da literatura para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida, utilizando-se de uma revisão bibliométrica e uma revisão sistemática realizada na pesquisa em artigos científicos com foco no tema principal deste estudo.

2.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA

Turbinas Eólicas contém uma taxa de reciclabilidade de 80% a 90% (ETIPWind – EUROPEAN TECHNOLOGY & INNOVATION PLATAFORM ON WIND ENERGY, 2019). A maioria dos componentes de uma turbina eólica – as fundações, a torre, os componentes da caixa de multiplicação e o gerador – são recicláveis e são tratados como tal. “As pás de turbinas eólicas representam um desafio específico em razão da natureza complexa dos materiais utilizados na sua fabricação” (ETIPWind – EUROPEAN TECHNOLOGY & INNOVATION PLATAFORM ON WIND ENERGY, 2019, p.1). Apesar da existência de várias tecnologias para reciclagem de pás, e de um número crescente de empresas que oferecem serviços de reciclagem para materiais compostos, estas soluções ainda não estão amplamente disponíveis e não se mostram competitivas em relação ao custo (JENSEN, 2018).

2.2.1 O Ciclo de Vida de uma Turbina Eólica

Em 2019, o mercado de energia eólica atingiu a marca de 651GW de capacidade acumulada instalada, com a previsão de continuidade de forte crescimento para os próximos anos (2020 – 2024) na Ásia, nas Américas e na Europa (GWEC, 2019). Foram instalados 60,4GW de novas turbinas os parques *onshore* onde houve um crescimento de 17% quando comparado 2018, sendo que a China e os EUA permaneceram como os maiores mercados mundiais, em conjunto com um aumento de 60% em novas instalações *offshore* (GWEC, 2019). Adicionado a estes fatos, está o tamanho das pás de turbinas eólicas que cresceram 8 vezes desde a década de 1980 suplantando os 100 metros de comprimento, ajudando a gerar energia verde ao encontro de uma demanda global (WU *et al.*, 2019).

A vida útil projetada destas pás de turbinas eólicas gira em torno de 20 – 25 anos, e atualmente, a única opção de descarte em final de vida destas pás é o aterro sanitário (WU *et al.*, 2019). Nos próximos 25 anos, está projetado um volume de 225.000 toneladas/ano de pás fabricadas com polímeros reforçados com fibra de vidro ou carbono, e que atingiram seu final de vida útil requerendo um descarte ou preferencialmente, reciclagem (FLIZIKOWSKI & BIELINSKI, 2013).

Uma turbina eólica moderna, exige uma grande quantidade de recursos aliados a um alto consumo de energia. Em outros tipos de indústria, devolver estes materiais para o ciclo fechado de materiais, conforme conceitos de uma Economia Circular, oferece diversos benefícios, tais como: a) reduz a utilização de recursos naturais; b) diminui o impacto ambiental; c) aumenta possibilidades de geração de oportunidades de emprego; d) aumenta a eficiência de utilização de recursos e de energia; e) estimula o mercado de materiais reciclados (JENSEN, 2018).

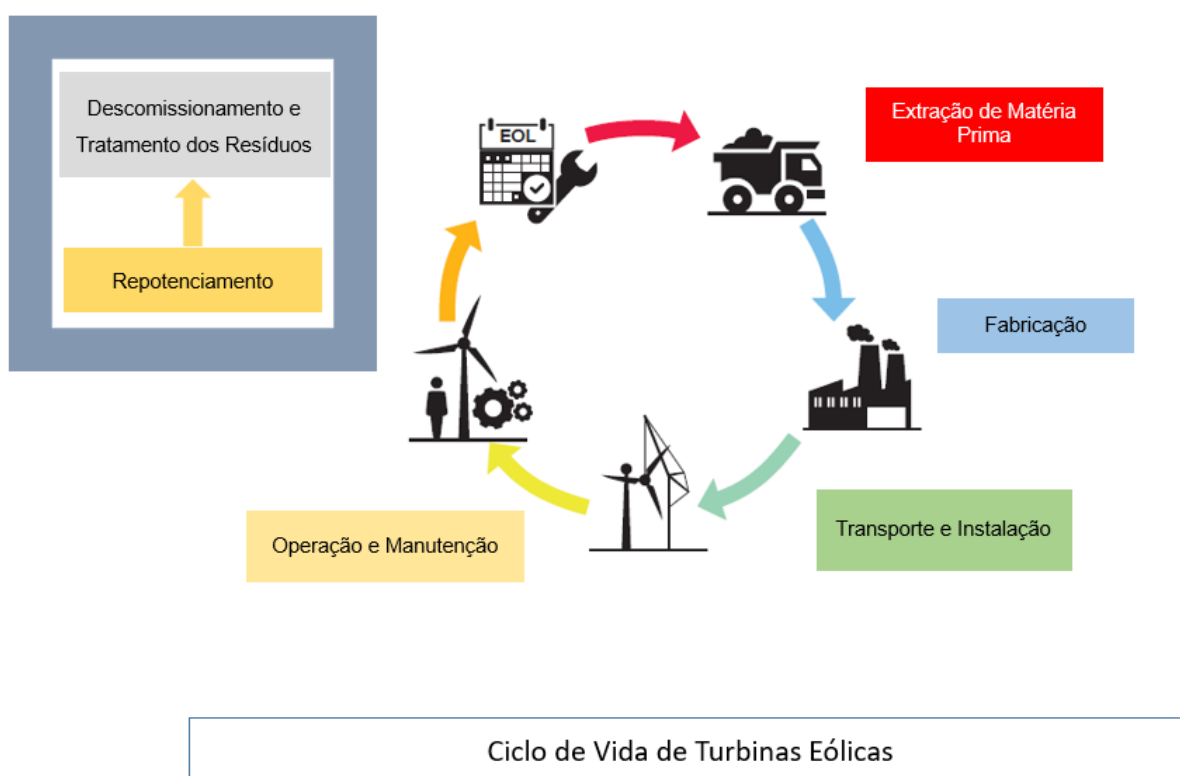
Conforme WindEurope (2020), uma quantidade cada vez maior de turbinas eólicas será descomissionada em futuro próximo. Considerando que o período de vida padrão de uma turbina eólica é de aproximadamente 20-25 anos, com algumas máquinas atingindo até 35 através da extensão de sua vida em serviço (JENSEN, 2018). E considerando também que oportunidades de repontenciamento de parques eólicos aparecem a cada dia (MARSH, 2017). A maioria das turbinas eólicas instaladas nos anos de 1990 são de alguns poucos KW de potência e a altura do gerador está, normalmente, abaixo de 60m, onde os ventos têm menor energia potencial acumulada (MARSH, 2017). Se estes geradores forem substituídos por

equipamentos mais altos e mais potentes, o aumento de produção de energia pode ser considerável (GALLAGHER *et al.*, 2017).

Neste caso, se fosse praticado o repotenciamento nesta ordem de grandeza, as turbinas antigas gerariam 14.000 pás descomissionadas por volta de 2023, o equivalente a um volume entre 40.000 e 60.000 toneladas (WINDEUROPE, 2019).

A figura 17, a seguir mostra o ciclo de vida de uma turbina eólica, representando as diversas fases de vida de equipamentos geradores de eletricidade incluindo a extração da matéria prima, a fabricação da turbina, seu transporte e instalação no parque eólico, a fase de produção de energia e sua destinação final. Para a destinação final identificam-se duas alternativas a serem exploradas: O repotenciamento ou o descomissionamento com a consequente necessidade de tratamento dos resíduos gerados.

Figura 17 - Ciclo de Vida de uma Turbina Eólica



Fonte: WindEurope, 2020

2.2.2 Desenvolvimento da Revisão Bibliométrica

Dentro da revisão bibliométrica aplicada ao tema do estudo aqui descrito foram consideradas as características de uma Economia Circular associada as

alternativas de destinação para pás de turbinas eólicas em final de vida útil. Nesta pesquisa foram selecionados artigos que referenciavam estes dois pressupostos, e a forma de seleção utilizada está descrita na Seção 3, Metodologia de Pesquisa.

Nesta avaliação, foram considerados 163 artigos, selecionados conforme a metodologia estabelecida para esta revisão bibliométrica. Os resultados desta revisão bibliométrica apresentaram algumas características notáveis em relação aos intervalos de tempo e a maneira como os artigos representativos se distribuem pelas publicações que norteiam esta pesquisa. Foram estudados os seguintes atributos: a distribuição de artigos por continentes; a distribuição por países dos artigos referenciados onde ocorreram as pesquisas; as datas (em ano) em que as publicações ocorreram; e os periódicos em que estes artigos foram publicados. A seguir, estão representados os resultados dos atributos descritos no parágrafo anterior.

Quadro 1 - Distribuição Geográfica dos Artigos por Continentes

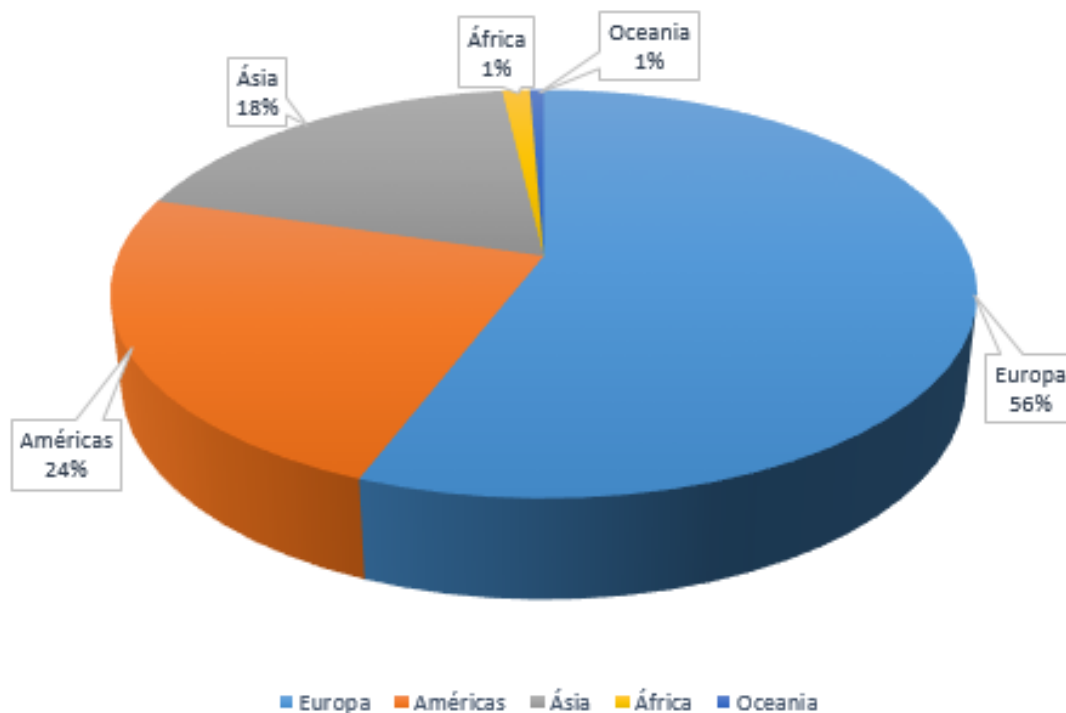
Distribuição de artigos por continentes (Distribuição geográfica)			
Continentes	Europa	Alemanha , Áustria, Bélgica, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Espanha, França, Grécia, Holanda, Irlanda, Itália, Letônia, Noruega, Polônia, Portugal, Rep. Checa, UK	91 artigos (55,9%)
	Américas	Canadá, EUA	39 artigos (23,9%)
	Ásia	China, Cingapura, Índia, Iran, Malásia, Paquistão, Rússia, Tailândia, Taiwan, Turquia, Japão	30 artigos (18,4%)
	África	Egito, Líbia	02 artigos (1,2%)
	Oceania	Austrália	01 artigo (0,6%)

Fonte: O Autor

Para a distribuição geográfica pelos continentes, temos uma concentração de artigos localizados nos Países Europeus, publicados ao longo do período avaliado. Este período corresponde aos primeiros aparecimentos de estudos relacionados ao tema proposto (por volta do começo da década dos anos 90 do século passado) até 2019. Esta distribuição indica as origens da utilização de energia eólica na época

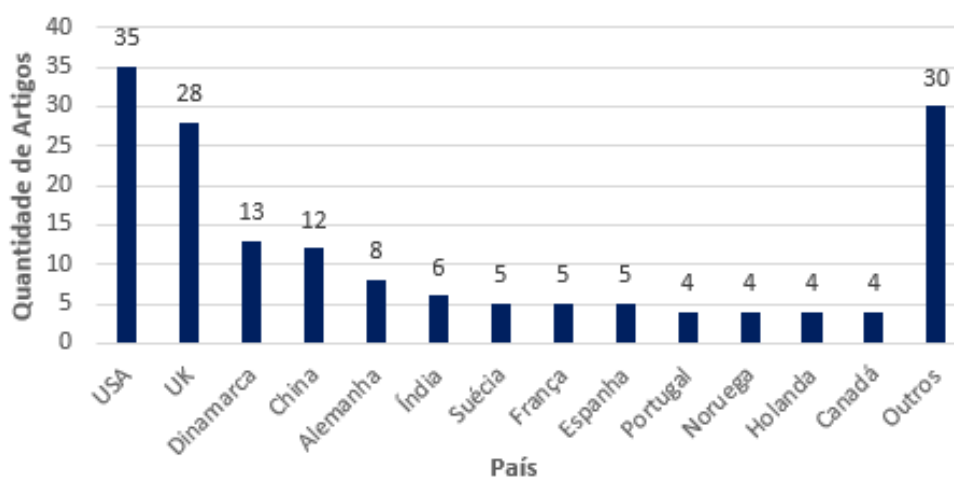
atual. Pode-se concluir que o início da utilização de energia elétrica gerada a partir da força do vento teve seu desenvolvimento e proliferação na Europa, mais precisamente nos países localizados próximos a costa noroeste europeia.

Gráfico 3 - Distribuição Geográfica de Artigos
Distribuição Geográfica por Continentes



Fonte: O Autor

Gráfico 4 - Distribuição de Artigos por País
Distribuição por País



Fonte: O Autor

Os países europeus localizados no leste do continente têm sua representatividade limitada, fazendo parte da distribuição, mas com uma presença

tímida. Dos países listados, considerados como pertencentes ao leste europeu, a maioria apresentou poucos artigos – até no máximo três artigos. Estes países são Croácia (um artigo), Eslováquia (um artigo), Letônia (um artigo), Polônia (três artigos), Rep. Checa (um artigo) e Romênia (um artigo).

Analisando os dados para os países asiáticos existe uma presença expressiva da China naquela região, perfazendo 40% dos artigos apresentados. Nota-se também a baixa incidência de artigos originários do Japão (6,7% dos artigos referenciados na Ásia). Nas Américas, prevalece a presença de artigos vindos do Estados Unidos da América do Norte (35 artigos), contribuindo com 21,5% do total de artigos, e não se identificou nenhuma outra contribuição além de quatro artigos gerados no Canadá.

Gráfico 5 - Distribuição de Artigos por Ano de Publicação



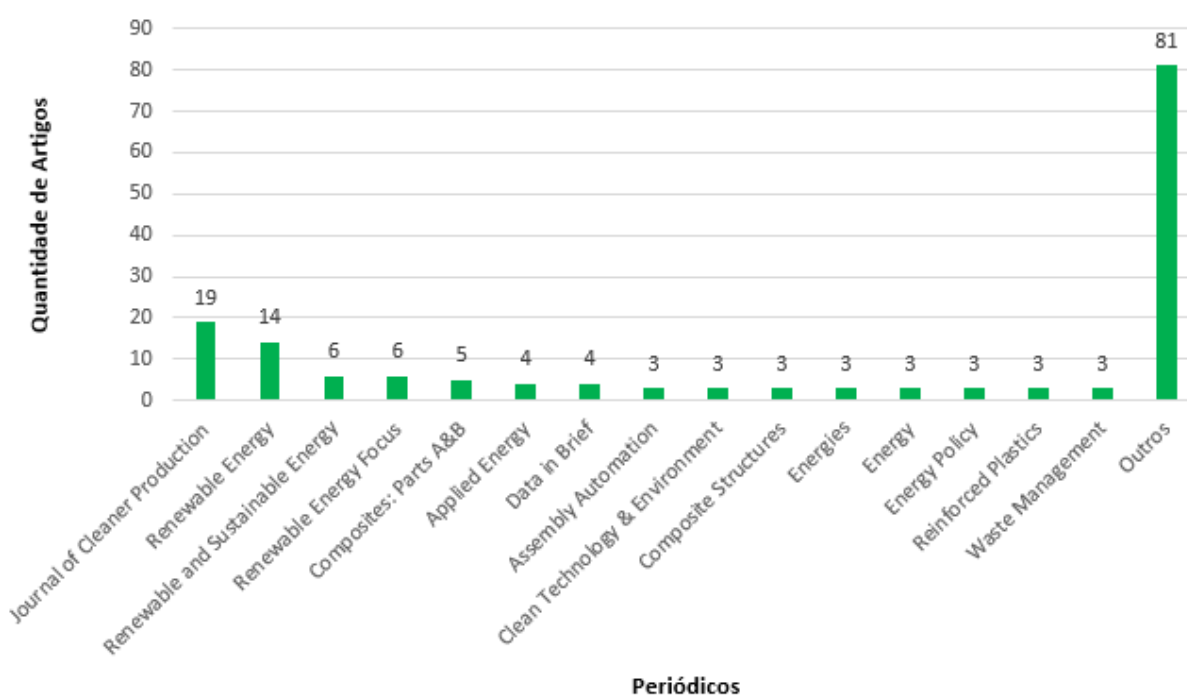
Fonte: O Autor

No que diz respeito ao ano de publicação, nota-se uma concentração de artigos localizada no final do período considerado. O crescimento de publicações segue uma curva ascendente ao longo dos anos e caracteriza um aumento progressivo do interesse no assunto em questão.

A distribuição de artigos publicados abrange um número grande de periódicos. De um total de 163 artigos selecionados, 81 artigos estão distribuídos por 70 periódicos. Estão representados neste quadro somente periódicos que tenham publicado 3 ou mais artigos.

Quanto aos periódicos que publicaram os artigos escolhidos, estes são das mais diversas origens com foco em diversos temas científicos. Os artigos estão distribuídos quase que equitativamente entre eles. Perfazem um total de 85 periódicos para 163 artigos, o que representa uma média de 1,9 artigos para cada periódico citado. A baixa concentração de número de artigos por periódico só não é explícita para quatro representantes deste grupo, a saber, *Journal of Cleaner Production* com 19 dos artigos publicados, *Renewable Energy* com 14 artigos, *Renewable and Sustainable Energy* com 6 artigos e *Renewable Energy Focus* também com 6 artigos. Estes quatro periódicos completam 45 artigos (28%) das publicações. Os 118 artigos restantes (72%) das publicações estão sub-divididos em 81 periódicos.

Gráfico 6 - Distribuição de Artigos por Periódicos
Distribuição por Periódicos



Fonte: O Autor

2.2.3 Desenvolvimento da Revisão Sistemática

A maioria das pás de turbinas eólicas são fabricadas em material composto por resinas poliméricas reforçadas por fibra de vidro (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer) (YAZDANBAKSHI *et al.*, 2018). Estes materiais compostos (GFRP), contém uma concentração variando entre 12% e 60% em volume de fibra de vidro. (YAZDANBAKSHI *et al.*, 2018). A exposição às intempéries e solicitações mecânicas

em serviço, sugere que a vida útil de uma pá seja em torno de 20 anos. (BEAUSON *et al.*, 2014).

Para este estudo, quando é tratado o assunto de término de vida útil de pás de turbinas eólicas, não significa, necessariamente, que o componente entrou em colapso ou está com sua condição estrutural comprometida. Considera-se, também os casos de repotenciamento de parques eólicos, onde os equipamentos de geração de energia estão em plena capacidade produtiva, mas não atendem mais às necessidades dos operadores destes parques, no que diz respeito ao potencial de geração apresentado pelas turbinas instaladas em relação ao potencial oferecido pelos ventos neste local. Este fato acontece por conta da evolução tecnológica experimentada pelas turbinas eólicas geradoras nos últimos anos, que apresentaram um desenvolvimento significativo, oferecendo uma capacidade de produção de energia muito maior, otimizando o desempenho produtivo do parque em questão, justificando desta forma a substituição das turbinas originais (MARSH, 2017). Considera-se, portanto, que este equipamento, neste parque eólico atingiu seu final de vida em serviço.

Uma outra característica é o custo de manutenção preventiva e de reparo de falhas de uma turbina eólica durante sua vida em serviço, o que representa em torno de 25% do custo médio da energia gerada (JENSEN, 2018). Quando se trata de falhas, estas são frequentemente de alto custo de recuperação, sem mencionar os riscos de segurança correspondentes às operações de manutenção corretiva. (JENSEN, 2018). Uma alternativa de baixo risco é o repotenciamento do parque, após alguns anos de produção, com a instalação de turbinas novas e de maior potencial produtivo. (JENSEN, 2018).

Olhando para o cenário completo deste tema, conforme Ortegon, Nies & Sutherland (2013), o término da vida útil de uma turbina eólica ocorre por seguintes motivos:

- (i) Quando o conjunto de geração não consegue mais atingir o desempenho esperado em função da fadiga de seus componentes;
- (ii) Quando da ocorrência de falhas dos componentes que compromete a instalação e modo operacional da turbina;
- (iii) Quando da sua deterioração estrutural;
- (iv) Quando da ocorrência de acidentes naturais atmosféricos ou de operação/manutenção;

(v) Por não mais satisfazer as necessidades ou expectativas dos usuários.

Para o caso de descarte de resíduos de pás considerando-se a reciclagem, a dificuldade para uma operação ambientalmente sustentável baseia-se na característica termofixa do material composto (GFRP), o que representa um desafio (BEAUSON *et al.*, 2016). A partir do ponto de cura, as resinas utilizadas no composto, ficam entrelaçadas com a fibra de vidro, tornando o material estável, o que dificulta sua reciclagem. Ademais, materiais a base de GFRP não são biodegradáveis e seu descarte em aterros sanitários é largamente restringido em alguns países, como Alemanha e Holanda (YAZDANBAKHSI *et al.*, 2018).

Diante destas circunstâncias, considera-se como forma de caracterização das alternativas para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida útil um descritivo das possibilidades de administração da vida destes componentes, envolvendo conceitos de Economia Circular. Para início, conforme Marsh, (2017) considera-se uma característica de projeto que privilegie a durabilidade dos componentes da turbina eólica, assegurando sua confiabilidade ao longo de sua vida e, acima deste fato, aumentando esta vida. Ao mesmo tempo, desenvolver um projeto que facilite a desmontagem e a reciclagem dos materiais resultantes do descomissionamento. Para o caso de reutilização das turbinas resultantes de processos de repotenciamento de parques eólicos, as indicações são de inspeções de verificação, limpeza, recuperação e reparo de peças e componentes destinados a outras instalações, seja por utilização como peças de reposição ou por reinstalação completa destes equipamentos em um mercado secundário (MARSH, 2017).

As situações de reciclagem de resíduos, recuperação de matérias primas e/ou energia, ou disposição via incineração ou descarte em aterros sanitários os procedimentos estão discutidos em detalhes neste estudo.

De acordo com Ortegon, Nies & Sutherland (2013), dois cenários podem ocorrer em um parque eólico gerador de energia elétrica com turbinas em final de sua vida útil: Repotenciamento ou Descomissionamento.

- Repotenciamento

Durante o processo de repotenciamento, o objetivo é manter o parque eólico em operação, mas com um acréscimo de capacidade produtiva. Este acréscimo é conseguido através da substituição das turbinas geradoras existentes por novos equipamentos. As turbinas selecionadas para serem substituídas por ocasião do repotenciamento, são desmontadas e substituídas por novos equipamentos com

maior eficiência de produção e/ou com maior potência nominal. As turbinas desmontadas servem para serem aplicadas em mercados secundários como equipamentos produtivos, quando, nestes casos, são utilizadas como turbinas com potências menores em parques eólicos de menor porte, geralmente fora dos ramos de distribuição para consumo geral (MARSH, 2017). Normalmente estas instalações servem a locais afastados tais como fazendas ou instalações de mineração sem a infraestrutura natural de fornecimento de energia elétrica (MARSH, 2017). Podem também ser desmontadas e as peças que apresentarem condições de uso, destinadas para manutenção de turbinas existentes e utilizadas como peças de reposição em manutenção preventiva e/ou corretiva (MARSH, 2017). Estão inclusas neste grupo pás originárias destas operações de desmontagem. Devem ser práticas comuns nestes casos, operações de recuperação dos componentes, recondicionamento para extensão de sua vida útil e garantia de performance confiabilidade na reutilização destas peças (MARSH, 2017). Considera-se também a possibilidade de uma reforma geral do sistema de produção de energia eólica através de turbinas, incluindo todos os conjuntos principais de geração, como torres, nacelles, hubs e pás (ORTEGON, NIES & SUTHERLAND, 2013). Alemanha e Dinamarca, conhecidos como pioneiros em desenvolvimento de sistemas de geração eólica apresentam bastante experiência nesta área (MARSH, 2017).

- Descomissionamento

O segundo cenário apresenta o processo de descomissionamento de um parque eólico que inclui a desmontagem das turbinas instaladas, a remoção das estruturas localizadas acima do nível do solo, a remoção das fundações localizadas abaixo do nível do solo, a sementeira e o replantio da vegetação original da região, com a eventual necessidade da substituição da camada de terra da superfície afetada pela instalação dos equipamentos do parque eólico (ORTEGON, NIES & SUTHERLAND, 2013).

Ao final deste processo, deve ser feito um acompanhamento, por um período de dois anos, com monitoramento das condições de recuperação da área, seguidas das eventuais correções que se façam necessárias para o retorno integral do meio ambiente à sua condição original, condição em que se encontrava o meio ambiente antes do estabelecimento do parque eólico (ORTEGON, NIES & SUTHERLAND, 2013). Quanto às turbinas desmontadas, ou ainda, suas peças, estas seguem para processos de descarte conforme suas características e o tipo de material que fazem

parte de seus componentes (ORTEGON, NIES & SUTHERLAND, 2013). Tanto no cenário de repotenciamento quanto no de descomissionamento de parques eólicos, os processos que envolvem as atividades pertinentes a estas operações incluem desmontagem, separação, recuperação e gerenciamento dos materiais residuais gerados a partir das operações aqui citadas. Estes processos são descritos no item 2.2.4.

2.2.4 Descrição das Alternativas de Destinação para Pás de Turbinas Eólicas

Para classificação dos processos de destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas, estes foram subdivididos nas 5 categorias citadas na seção 2.1.6 e aqui, são descritas conforme sua caracterização encontrada nos artigos que fazem parte da pesquisa aqui realizada. A seguir estas caracterizações com suas referências.

a) Reuso/Redistribuição

Para Reuso/Redistribuição, considera-se que as pás serão utilizadas em instalações novas, atendendo a um mercado secundário, conforme indicado no item “Repotenciamento” e descritas como sobras de peças ou turbinas completas, em consequência das operações de repotenciamento de parques existentes (MARSH, 2017). Esta destinação como reuso/redistribuição, atende tanto como peças de reposição como partes de uma turbina completa. Como já mencionado as pás a serem utilizadas nos casos citados necessitam passar por operações de verificação e possível recuperação de eventuais defeitos ou descontinuidades associadas a processos de fadiga, para garantia de seu desempenho nesta nova instalação (JENSEN & SKELTON, 2018).

As destinações de componentes, incluem a reutilização de pás como equipamentos de substituição de componentes de turbinas existentes ou de turbinas completas com características de equipamentos em condições de uso, por estarem na sua meia vida, não importando sua idade cronológica (ORTEGON, NIES & SUTHERLAND, 2013). Estas turbinas, ou mesmo peças em condições de uso, tem como destino países em desenvolvimento, em um estágio embrionário de utilização de energia eólica, atuando em um mercado secundário para estes equipamentos, ou

em instalações “off-grid” como citado nos artigos de Jensen & Skelton (2018) e Marsh (2017).

b) Remanufatura

Na Remanufatura, existem indicações para utilização em mobiliário urbano, tais como abrigos para parada de ônibus, pontes para passagem de pedestres e parques infantis, existindo também citações para utilização em instalações de arquitetura integradas ao mobiliário urbano (de DECKER, 2015).

Para estas situações foram encontradas diversas citações em alguns dos 18 artigos selecionados para este estudo. Estas citações referem-se a ideias em desenvolvimento por escritórios de arquitetura urbana apoiados por entidades supra empresariais que incentivam o desenvolvimento de aplicações em mobiliário urbano (JENSEN & SKELTON, 2018). Estas instalações ainda se encontram em carácter experimental. Como exemplo, o consórcio para inovação Genvind, que é um projeto suportado pela Agência Nacional Dinamarquesa para a Pesquisa e Inovação (JENSEN & SKELTON, 2018). Exemplos destas aplicações estão mencionadas na seção 1.2 deste estudo. São mencionados, também tanques para piscicultura de acordo com Jensen & Skelton (2018) e Cherrington *et al.*, (2012).

c) Reciclagem

A opção de Reciclagem indicada neste item, é a que oferece o maior leque de possibilidades. Para esta destinação faz-se necessário processos de acondicionamento do material a ser reciclado. Este acondicionamento pode ser realizado por processos mecânicos, químicos ou térmicos.

c.1) Processos Mecânicos

Os processos mecânicos incluem corte, trituração e moagem para determinada granulometria. Estes processos são definidos através da destinação a ser dada ao material na reciclagem e tem uma relação direta com as funções a serem desenvolvidas por estes resíduos.

São citados a utilização de resíduos moídos utilizados como aditivo para indústria cimenteira conforme citado por Marsh (2017) e como adição em concreto na forma de filamentos retirados dos resíduos das pás para melhoria de propriedades mecânicas como limite de ruptura, resistência a compressão e a flexão conforme estudado por Yazdanbakhsh *et al.* (2018).

Como material particulado também a partir de processos de moagem mecânica usado como reforço de resinas poliméricas. Para evitar as consequências

do descarte em aterros sanitários ou da incineração, aplica-se a trituração mecânica, uma técnica de redução de tamanho simples e rápida (RAHIMIZADEH *et al.*, 2019). Múltiplas tecnologias estão sendo desenvolvidas nos últimos tempos para explorar as possibilidades de reciclagem de GFRP, entre elas a trituração mecânica (WU *et al.*, 2019). Este processo é caracterizado por uma redução gradual do tamanho do composto em final de vida, começando pelo corte em placas de tamanho que caibam nos equipamentos de processamento mecânico (aproximadamente 100mm) ou ainda esmagadas (KALKANIS *et al.*, 2018). Após esta redução, a reciclagem dos materiais compostos consiste em sucessivos processos de corte, trituração e moagem para reduzir o material a fragmentos de alguns milímetros de tamanho (BEAUSON *et al.*, 2016). Como base de estradas e fabricação de asfalto conforme citado por Marsh (2017) e Cherrington *et al.* (2012). Como isolamento térmico e acústico na forma de placas constituídas de núcleo de retângulos retirados de pás e com cobertura de placas de gesso cartonado (drywall) também de acordo com Marsh (2017) e Cherrington *et al.* (2012). Para fabricação de madeira artificial em aplicações de construção civil ou como matéria prima para fabricação de móveis como citado por Cherrington *et al.* (2012). Pode ser citado também sua utilização em dormentes de ferrovias como material pultrudado a partir de resíduos moídos das pás de turbinas eólicas como descrito por Cherrington *et al.* (2012). Usado em instalações de arquitetura ou como material de enchimento para paredes divisórias de escritórios e casas com o objetivo de isolamento térmico e acústico como citado por Jensen & Skelton (2018).

c.2) Processos Químicos e Termoquímicos.

Através de processos químicos e termoquímicos, em processos de separação por pirólise, por solvólise com ácido nítrico, amônia ou glicol ou ainda através da decomposição da matriz polimérica em processos a partir sistemas de leito fluidizado, garantindo a separação das fibras de vidro da matriz polimérica com ciclones de separação (JENSEN & SKELTON, 2018). Nestes casos a separação da matriz, constituída de resinas poliméricas, do reforço constituído de mantas de fibra de vidro, tem como resultados, nas três possibilidades de separação aqui descritas (pirólise, solvólise e leito fluidizado), uma matéria prima pronta para reutilização (JENSEN & SKELTON, 2018). A aplicação dos resíduos de fibra de vidro, após a separação da matriz pode ser adicionada em novos materiais compostos, inclusive na fabricação de novas pás, para melhoria de suas propriedades mecânicas (NOVAIS *et al.*, 2017).

Estas matérias primas com base em resinas poliméricas também podem ser aplicadas na extrusão de filamentos para impressoras 3D como material consumível conforme descrito por Rahimizadeh *et al.* (2019) e Mantelli *et al.* (2019).

c.3) Processos Térmicos

Associado ao conceito térmico, também se discute a queima pura e simples para eliminação destes resíduos com sobras sólidas e gasosas que necessitam ser tratadas adequadamente. Estas sobras sólidas de combustão (cinzas) servem para serem incorporadas em fornos de clínquer para produção de cimento, condição que pode gerar uma demanda destes resíduos, uma vez que estas cinzas contém uma grande quantidade de sílica e de cálcio, dois componentes principais da composição de clínquer em alto grau (MARSH, 2017). A incineração mostra um processo de queima como uma opção razoavelmente acessível e de baixo custo. O processo de combustão necessita ser eficientemente controlado para evitar problemas com as emissões de gases oriundos do processo de queima. Este assunto está tratado por Marsh (2017).

d) Recuperação de energia

Existem também, estudos desenvolvendo a queima destes resíduos para recuperação da energia contida nestes materiais compostos, exigindo a separação das mantas de fibra de vidro, através de processos químicos, dos quais o mais comum é a pirólise, o que resulta na obtenção de um óleo com alto potencial energético, na separação das fases do material composto (KALKANIS *et al.*, 2019). Pode-se citar também a queima em leito fluidizado, com a geração de um gás com alto poder calorífico que pode ser usado como combustível, conforme mostrado na figura 9 no item 1.2 deste estudo.

Conforme Jensen & Skelton (2018) existem três caminhos principais que são identificados para destinação de materiais compostos em final de vida: aterros sanitários, incineração ou reciclagem. Para reciclagem existem numerosas alternativas, entre elas, o processamento mecânico, a pirólise, a queima em leito fluidizado e a reciclagem química (JENSEN & SKELTON, 2018). Em diversas situações materiais compostos por GFRP são incinerados, por exemplo em fornos de cimento para aproveitamento de sua energia contida (DUFLOU *et al.*, 2012). A recuperação de energia é usada com sucesso em países como Alemanha e Dinamarca; os resíduos de material composto é misturado com 10% de resíduos sólidos municipais para praticamente eliminar estes resíduos durante a sua queima

(CHERRINGTON *et al.*, 2012). Desta forma, a recuperação de energia, através da reciclagem de materiais de engenharia contribuem para a sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável de processos industriais (YANG *et al.*, 2012).

A possibilidade de conversão do material composto de resinas poliméricas reforçadas com mantas de fibra de vidro é detalhada em Jensen & Skelton (2018). A citação está colocada como um processo de conversão em desenvolvimento pelo projeto Genvind na Dinamarca, já citado anteriormente no grupo b - Remanufatura neste item, onde o composto resultante do processo de separação caracteriza-se como um óleo com um alto poder calorífico, semelhante ao biodiesel. Este processo de separação permite a extração das fibras de vidro sem deixar resíduos de resinas nestas fibras. Este resultado propicia a reutilização das fibras recuperadas em novos produtos com as características originais necessárias a fabricação de materiais compostos semelhantes aos usados nas pás de turbinas eólicas (JENSEN & SKELTON, 2018).

e) Incineração e descarte em aterros sanitários

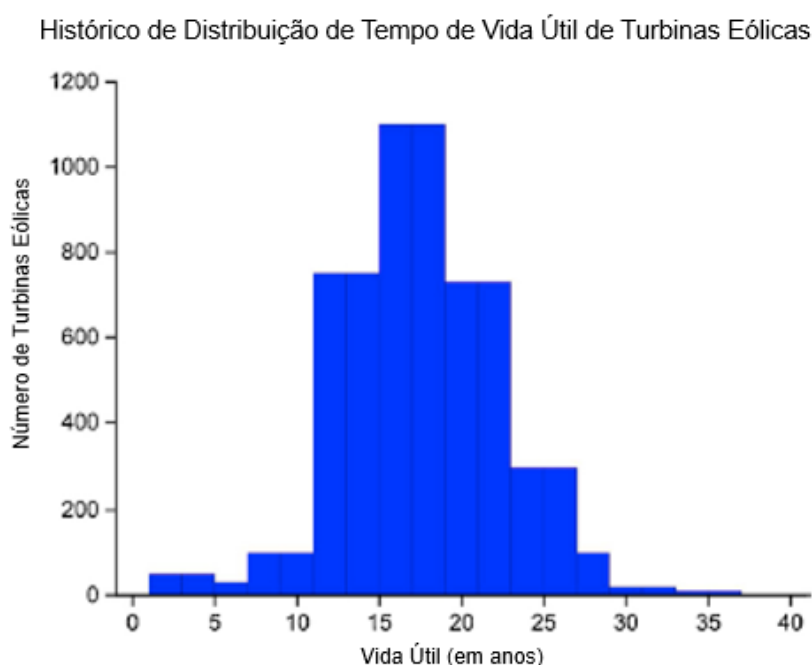
A incineração é considerada uma das alternativas para destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas em final de vida quando o descarte em aterros sanitários não é permitido. Isto ocorre em alguns poucos países da Europa e tem suas implicações ambientais referenciadas na geração de restos de queima como gases decorrentes da combustão e cinzas geradas como resíduos desta queima.

O descarte em aterros sanitários não é considerado uma solução ambientalmente sustentável. A utilização de aterros sanitários para descarte de pás está citada por Marsh (2017). A diretiva para aterros sanitários foi introduzida em 1999, para prevenir ou reduzir quanto mais possíveis efeitos negativos gerados por descartes indiscriminados, introduzindo requisitos de restrições técnicas para resíduos e aterros sanitários (CHERRINGTON *et al.*, 2012). Todos os artigos com citações referentes a utilização de descarte em aterros sanitários são unânimes em afirmar que esta solução não deve ser utilizada por não atender os requisitos de uma operação ambientalmente sustentável (YANG *et al.*, 2012). Não atende também aos conceitos de uma Economia Circular. Apesar de todas os pressupostos negativos, esta prática é a mais utilizada hoje em dia, fora da Europa, por conta do “EU Landfill Directive – 99/31EC” (YANG *et al.*, 2012). A Alemanha, por exemplo, banuiu a disposição de material composto de resinas reforçadas com fibra de vidro desde junho

de 2005 (YANG *et al.*, 2012). Exemplo de descartes em aterros sanitários estão apresentados nas figuras 6,7,8 e 9 da seção 1.6 deste estudo.

Alguns artigos pesquisados se preocuparam em avaliar as quantidades de material composto utilizado na fabricação de pás de turbinas eólicas que estarão disponíveis para descarte e/ou reuso após o término de sua vida útil. Os resultados destas previsões mostraram-se consistentes entre si. A maioria explorou a duração do ciclo de vida de uma turbina eólica em uso. Como exemplo, a seguir apresenta-se uma distribuição do tempo de vida de turbinas eólicas (em anos), na Dinamarca.

Gráfico 7 - Distribuição de Ciclo de Vida Útil de Turbinas Eólicas

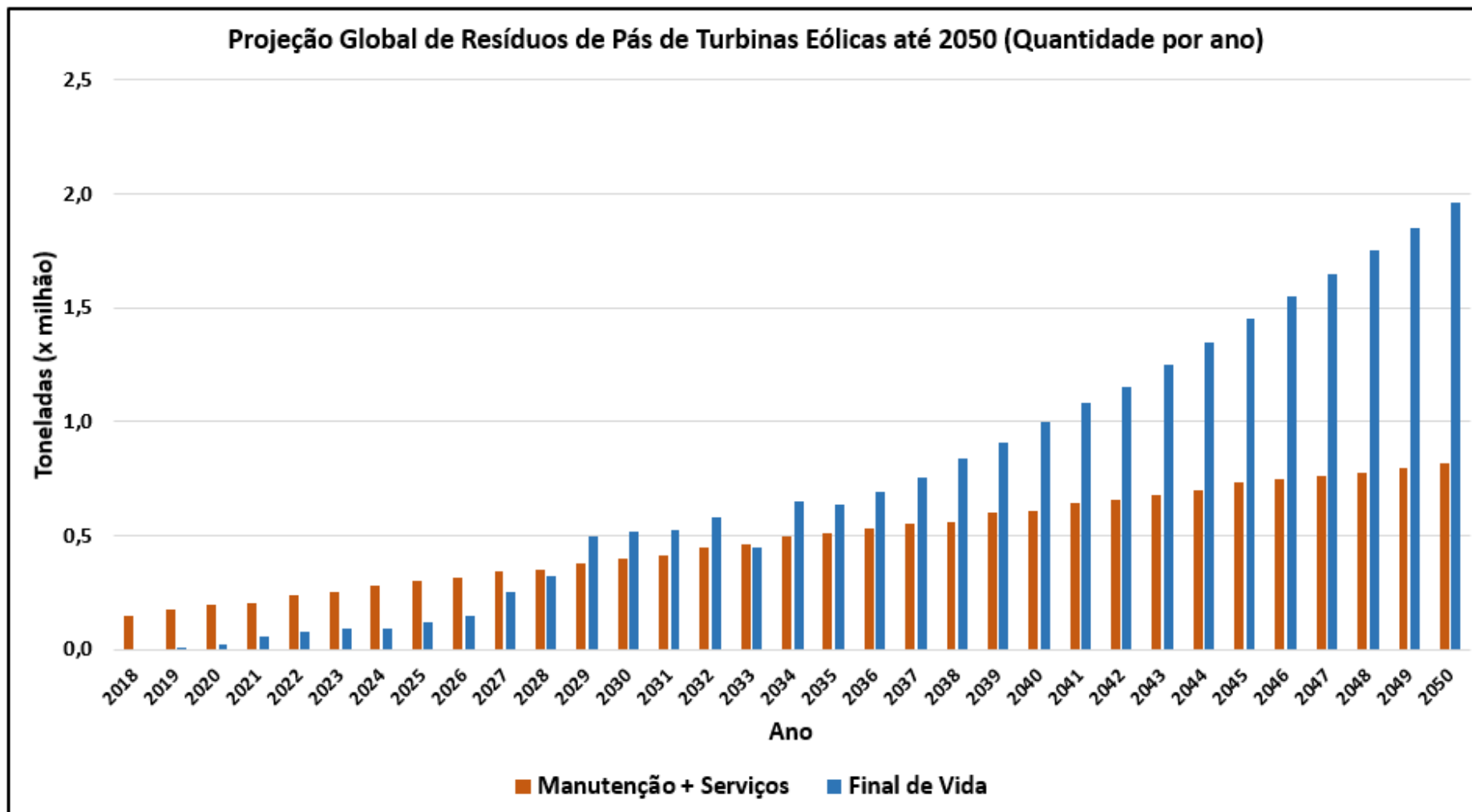


Fonte: Adaptado de Tazi *et al.*, 2019

Lefreuvre *et al.* (2019) explorou as previsões de quantidade de resíduos até 2050 provenientes de materiais compostos a base de resinas poliméricas reforçadas com fibras de carbono, o que se mostra como uma tendência de crescimento na utilização deste tipo reforço uma vez que ele oferece propriedades mecânicas melhores que a fibra de vidro, apesar de apresentar um custo de fabricação superior. Liu & Barlow (2017) apresentou, através de seu estudo, uma previsão das quantidades de resíduos que deveriam estar disponíveis para destinação e as curvas de crescimento destes volumes desde o período atual até o ano 2050. O gráfico 8, seguinte apresenta os valores estimativos para a quantidade de resíduos a serem gerados nas próximas décadas (LIU & BARLOW, 2017).

A partir da leitura do gráfico pode-se perceber as quantidades de material residual que deverá ser gerado durante a vida das pás em serviço por consequência de manutenção preventiva ou corretiva (no gráfico 8 representado pelas colunas em cor marron) e as quantidades de resíduos geradas pelo final de vida em serviço (representadas em azul). As projeções definem estas quantidades até o ano 2050. Deve-se notar que as quantidades acumuladas anualmente até o ano 2040 dizem respeito a equipamentos já instalados e em funcionamento, o que deverá gerar resíduos para descarte, considerando uma vida útil em serviço de 20-25 anos para estes componentes.

Gráfico 8 – Projeção Global de Resíduos Gerados de Pás de Turbinas Eólicas



Fonte: Liu & Barlow, 2017

Gallager *et al.* (2017) analisaram as potencialidades de adaptação de turbinas eólicas em um contexto de Economia Circular através de possibilidades de reciclagem e usando um projeto com características ecológicas. Em outro estudo selecionado, Jensen (2018) avaliou os impactos ambientais na reciclagem de turbinas eólicas.

O quadro 2 demonstra as possibilidades encontradas nos 18 artigos selecionados através da Revisão da Literatura, levada a termo nesta pesquisa e serviu como base de estudo para a sequência deste trabalho.

Quadro 2 – Resumo das Destinações de Resíduos de Pás de Turbinas Eólicas

Quadro Resumo da Destinação de Resíduos de Pás de Turbinas Eólicas		
Destino	Forma de Utilização	Índice
Reuso/Redistribuição	Mercado Secundário	a.1
Remanufatura	Utilização como Mobiliário Urbano	b.1
	Pontes	b.2
	Tanques para Peixes	b.3
Reciclagem	Aditivo para Indústria Cimenteira	c.1
	Incineração p/ recolher as cinzas	c.2
	Reforço de Resinas Poliméricas	c.3
	Base de Estradas	c.4
	Fabricação de Asfalto	c.5
	Isolação Térmica e Acústica	c.6
	Fabricação de Madeira Artificial	c.7
	Filamentos para Impressão 3D	c.8
	Dormentes para Ferrovias	c.9
	Adição em Concreto	c.10
	Utilização em Instalações de Arquitetura	c.11
	Material Industrial para enchimento	c.12
Recuperação de Energia	Queima para Recuperação de Energia	d.1
Disposição	Incineração	e.1
	Descarte em Aterro Sanitário	e.2

Fonte: O Autor

Na tabela 2, estão descritos os 18 artigos selecionados para servir de suporte para o desenvolvimento deste estudo, contendo o título do artigo, o autor nº 1, o país de origem do artigo, o periódico em que o artigo foi publicado, o ano de publicação, e as possibilidades de destinação encontradas nos textos dos artigos.

Tabela 2: Alternativas de Destinação de Pás de Turbinas Eólicas Encontradas nos Artigos Seleccionados (18x)

#	Autor	País	Periódico	Ano	a.1	b.1	b.2	b.3	c.1	c.2	c.3	c.4	c.5	c.6	c.7	c.8	c.9	c.10	c.11	c.12	d.1	e.1	e.2		
					Reuso	Remanufatura	Reciclagem												Recuperação de Energia	Disposição					
1	Yazdanbakhsh	USA	Resources, Conservation & Recycling	2018														1						1	
2	Yang	Holanda	Chemical Engineering and Processing	2012																		1			1
3	Beauson	Dinamarca	Composite: Part A	2016					1																1
4	Tazi	França	Resources, Conservation & Recycling	2019	1																	1		1	3
5	Lefreuvre	França	Resources, Conservation & Recycling	2019																					0
6	Novais	Portugal	Journal of Cleaner Production	2017					1																1
7	Marsh	UK	Renewable Energy Focus	2017	1				1	1	1	1											1	1	7
8	Jensen(a)	Dinamarca	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2018	1	1	1												1	1					5
9	Cherrington	UK	Energy Policy	2012				1			1	1	1	1		1	1	1				1		1	9
10	Kalkanis	Grécia	Energy Procedia	2019	1				1																2
11	Liu	UK	Waste Management	2017	1																				1
12	Gallagher	Irlanda	Journal of Industrial Ecology	2017																					0
13	Jensen(b)	Dinamarca	Wind Energy	2018																					0
14	Ortegon	USA	Journal of Cleaner Production	2013	1																				1
15	Rahimizadeh	Canadá	Composite: Part B	2019	1				1						1										3
16	Wu	UK	Advance Manufacturing: Polymer & Composites Science	2019	1				1																2
17	Mantelli	Itália	Rapid Prototyping Journal	2017											1										1
18	Duflou	Bélgica	MRS Bulletin	2012	1																	1		1	3
Quantidade de Artigos Citados para cada Forma de Utilização					9	1	1	1	1	5	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	4	1	4		

Fonte: O Autor. **Legenda:** (a.1) mercado secundário; (b.1) Utilização como Mobiliário Urbano; (b.2) Pontes; (b.3) Tanques para Peixes; (c.1) Aditivo para Indústria Cimenteira; (c.2) Incineração para Recolher Cinzas; (c.3) Reforço de Resinas Poliméricas; (c.4) Bases de Estradas; (c.5) Fabricação de Asfalto; (c.6) Isolação Térmica e Acústica; (c.7) Fabricação de Madeira Sintética; (c.8) Filamentos para Impressão 3D; (c.9) Dormentes de Ferrovias; (c.10) Adição em Concreto; (c.11) Utilização em instalações de Arquitetura; (c.12) Material Industrial de Enchimento; (d.1) Queima para Recuperação de Energia; (e.1) Incineração; (e.2) Descarte em Aterro Sanitário.

A tabela 2 apresentada demonstra os artigos selecionados (18x) para esta pesquisa, esclarecendo os países em que foram desenvolvidos, os periódicos em que foram publicados e o ano de sua publicação. Apresenta também a distribuição dos assuntos tratados pelos artigos, segundo cada temática explorada (a.1, b.1, b.2, b.3, c.1, c.2, c.3, c.4, c.5, c.6, c.7, c.8, c.9, c.10, c.11, c.12, d.1, e.1, e.2). As indicações estão detalhadas no eixo horizontal superior da planilha contendo o tema de alternativas explorado por cada artigo pesquisado. As indicações da forma de utilização apresentada nos artigos, estão colocadas na legenda localizada abaixo da tabela em questão.

A última linha da tabela mostra a somatória de citações nos artigos para cada forma de utilização selecionada. A última coluna à direita da tabela, apresenta a quantidade de formas de utilização que cada artigo contém. Nos artigos #5, #12 e #13 não existem citações de nenhuma forma de utilização para os resíduos gerados. Estes artigos referem-se a pás com reforço de fibra de carbono (artigo #5), às características de Economia Circular (artigo #12) e a descrição de processos de reciclagem para materiais compostos (artigo #13).

A partir da tabela 2, pode-se visualizar quais as alternativas de destinação para pás de turbinas eólicas em final de vida que estão sendo consideradas nos estudos apresentados em artigos científicos. Além destas alternativas é possível perceber a distribuição destas alternativas pelos textos dos artigos pesquisados, conforme a característica da destinação citada. Estas características estão subdivididas em formas de utilização, sendo inicialmente alocadas em um mercado secundário como consequência de um repontenciamento de parques eólicos instalados, e como destinação de resíduos de pás em final de vida em serviço, para remanufatura, reciclagem, recuperação de energia ou disposição para incineração ou para aterros sanitários. Desta maneira a revisão bibliográfica induz a um modelo teórico baseado nesta configuração, também explicitado no quadro 2 desta seção.

Fica também exposto, através da revisão da literatura, os desafios de circularidade como base de uma Economia Circular. Nos artigos listados na tabela 2, estão mencionadas as dificuldades logísticas encontradas no tratamento dos resíduos, as dificuldades encontradas no desenvolvimento dos processos de recuperação de energia e de reciclagem, a adequação destes processos quanto ao seu equilíbrio financeiro nas operações de reprocessamentos de resíduos, e as implicações de descarte em aterros sanitários.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

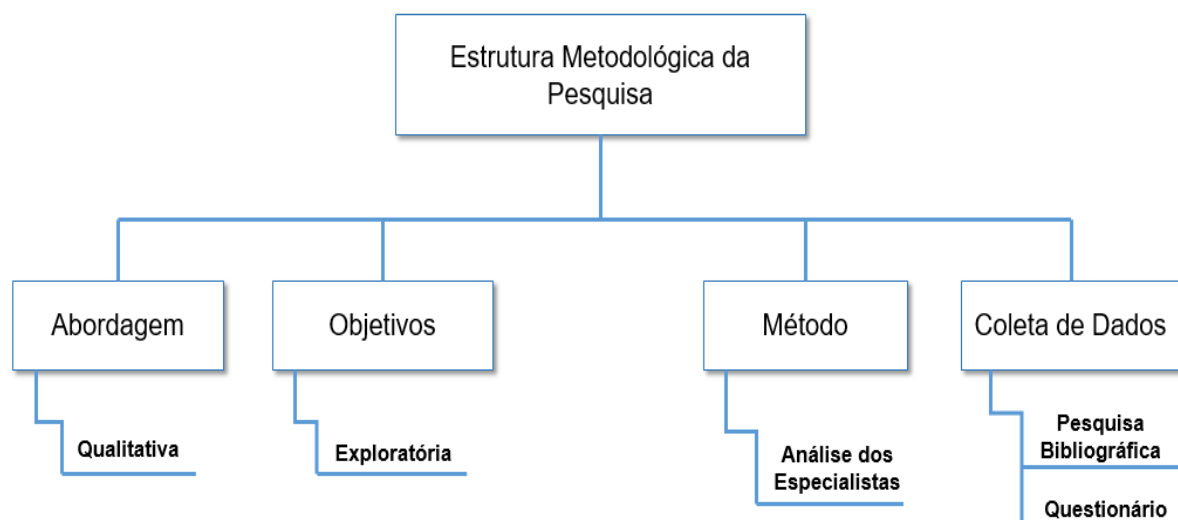
Neste capítulo está descrita a metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho, contemplando as estruturas de pesquisa associadas aos temas referentes a este estudo. O estudo foi desenvolvido sustentado por dois pilares de pesquisa. O primeiro, foi a realização de uma revisão bibliométrica da literatura para selecionar um grupo de artigos escolhidos entre periódicos que referenciavam seus temas às alternativas para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida. Foram selecionados 163 artigos, nesta primeira fase. A partir desta seleção foi realizada uma revisão sistemática da literatura para identificar dentre estes 163 artigos, aqueles que continham discussões de assuntos referentes a Economia Circular sendo utilizados nas tratativas para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida. Desta maneira foram escolhidos 18 artigos que continham estas características, e a partir deste grupo, através da análise de conteúdo, foi desenvolvido um questionário semiestruturado.

3.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA DA PESQUISA

A definição da estrutura metodológica desta pesquisa, caracterizou as ferramentas necessárias para levar adiante as bases de sustentação deste estudo. Esta caracterização é representada por uma pesquisa qualitativa, exploratória, tipificada quanto a sua natureza como uma pesquisa aplicada, desenvolvida a partir de uma pesquisa bibliométrica e sistemática que forneceu subsídios para uma análise de especialistas, utilizando-se de um questionário semiestruturado.

A abordagem foi uma pesquisa qualitativa respondida por especialistas, utilizando-se de um objetivo de carácter exploratório, para focalizar os aspectos relacionados com as alternativas de destinação para disposição de pás de turbinas eólicas em final de vida útil.

Figura 18 - Representação da Estrutura Metodológica da Pesquisa



Fonte: O Autor

3.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão de literatura é definida, como um meio sistemático de coletar e sintetizar as pesquisas existentes (TRANFIELD, DENYER & SMART, 2003). A revisão de literatura desempenha um papel importante no embasamento para todos os tipos de pesquisa. (SNYDER, 2019).

Uma revisão sistemática é descrita como uma maneira de sintetizar os resultados de pesquisas de uma forma sistemática, transparente e reproduzível e tem sido referenciada como a regra de ouro entre as revisões (SNYDER, 2019). Uma revisão sistemática pode ser explicada como um método e processo de revisão para identificação e avaliação crítica de uma pesquisa relevante, assim como para coletar e analisar dados da referida pesquisa (LIBERATI *et al.*, 2009). O objetivo de uma revisão sistemática é a identificação de todas as evidências empíricas que estejam incluídas em critérios pré-especificados, na direção de obter respostas para as perguntas de pesquisas ou para definir suas hipóteses (SNYDER, 2019).

Esta pesquisa utilizou o método de revisão sistemática da literatura para identificar alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida. A análise de conteúdo é documental e infere conhecimento pela codificação e categorização de dados para selecionar os artigos apropriados no desenvolvimento do modelo conceitual (BARDIN, 1986).

A revisão de literatura é definida, como um meio sistemático de coletar e sintetizar as pesquisas existentes. (TRANFIELD, DENYER & SMART, 2003). A revisão de literatura desempenha um papel importante no embasamento para todos os tipos de pesquisa. (SNYDER, 2019).

Uma revisão efetiva e bem conduzida como método de pesquisa, cria um embasamento sólido para o avanço do conhecimento, facilitando o desenvolvimento da teoria (SNYDER, 2019).

Tendo como compromisso realizar uma revisão bibliométrica da literatura de modo a proporcionar as melhores evidências de práticas e informações em qualquer disciplina, esta passa a ser um objetivo fundamental na pesquisa para as comunidades profissionais e acadêmicas (TRANFIELD, DENYER & SMART, 2003).

Por outro lado, uma revisão sistemática difere das tradicionais revisões narrativas por adotar processos científicos que sejam transparentes e replicáveis, o que em outras palavras, através do detalhamento de tecnologias na intenção de minimizar tendências usando pesquisas de literaturas exaustivas de estudos publicados e não publicados, proporciona um caminho de verificação para a tomada de decisão dos revisores, suas conclusões e procedimentos (TRANFIELD, DENYER & SMART, 2003).

Conhecimento prévio e relevante da literatura é essencial para todas as disciplinas e todos os projetos de pesquisa. Independentemente da disciplina, o autor ao ler um artigo, começa por descrever a pesquisa anterior, mapear e tomar contato com a área da pesquisa, para ganhar motivação com a intenção de estudar e justificar o desenvolvimento das questões desta pesquisa e suas hipóteses (SNYDER, 2019).

De acordo com Snyder (2019, p. 337), este posicionamento é normalmente referenciado como “Revisão da Literatura”, ou “Estrutura Teórica” ou ainda “Pesquisa de Base”. Entretanto, para que uma Revisão da Literatura possa vir a ser uma metodologia de pesquisa adequada, assim como em qualquer outra pesquisa, deve seguir os passos adequados para ações tomadas de modo a assegurar que a pesquisa é correta, precisa e confiável. Assim como em todas as pesquisas, o valor acadêmico de uma pesquisa depende do que foi realizado e o que foi encontrado, associados à clareza de um relatório (SNYDER, 2019).

A partir da definição de um método para realizar a revisão bibliométrica, pode-se atingir resultados considerados válidos para conclusões que contribuem para o entendimento da questão de pesquisa colocada. Um método é definido por:

É o conjunto de atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo – conhecimentos válidos e verdadeiros – traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista. (MARCONI & LAKATOS 2010, p.65).

As pesquisas bibliográficas envolvem consultas às publicações científicas relativas ao campo de conhecimento de interesse do pesquisador (*literature search*) ou ao problema específico que ele tenta responder (*literature review*) (MARCONI & LAKATOS, 2010). Como complemento, visa desenvolver uma pesquisa relacionada a um conhecimento existente, que constitui a base de sustentação de toda atividade acadêmica de pesquisa, não importando a qual disciplina ela se refere (SNYDER, 2019). Uma revisão da literatura pode ser descrita, de forma ampla, como uma maneira sistemática de coletar e sintetizar pesquisas anteriores. (TRANFIELD, DENYER & SMART, 2003).

Nesta revisão bibliométrica foram buscadas as alternativas para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida que estão em discussão pelo meio acadêmico. Este estudo não ficou limitado somente às alternativas consideradas sustentáveis, nem tampouco só as alternativas de descarte das pás. Considerou-se também possibilidades de reutilização em mercados secundários e alternativas de descarte consideradas não ambientalmente corretas, ou ainda, alinhadas com políticas usuais de sustentabilidade. Para tanto foi feita uma busca por artigos alinhados com os objetivos do trabalho considerando somente artigos publicados na Língua Inglesa, publicados na última década (2010 – 2020). A metodologia utilizada nesta pesquisa será explanada na próxima seção.

A partir do levantamento realizado em bases de dados relevantes para este tema e através de filtros com palavras chaves, ao final da seleção, foram encontrados 18 artigos publicados, que tem como foco uma avaliação da utilização de resíduos de pás de turbinas eólicas após seu término de vida útil. Utilizou-se como critério de seleção dos artigos, fundamentos de Economia Circular, em conjunto com pesquisas em relação às tratativas de destinação para pás, que estavam disponíveis nestes artigos, sem, no entanto, caracterizar sua seleção pela efetiva aplicação destes conceitos, mas sim como termo de avaliação do seria considerado sustentável ou não.

Desta forma realizou-se uma revisão da literatura, através de uma análise bibliométrica. Revisão de literatura é descrita como uma forma sistemática de coletar e sintetizar pesquisas anteriores sobre o assunto que se pretende estudar (SNYDER, 2019). Uma revisão bibliométrica analisa uma grande quantidade de pesquisas

publicadas através da utilização de ferramentas estatísticas, revelando assim tendências e citações e/ou citações de citações de um assunto em particular, por ano, país, autor, periódico, método, teoria ou problema de pesquisa (PAUL & CRIADO, 2020).

Relativamente aos métodos de revisão de literatura tradicional, a análise bibliométrica apresenta critérios objetivos que podem avaliar o desenvolvimento de uma pesquisa em um campo de atividade e agir como uma ferramenta valiosa para medir a qualidade e a produtividade das pesquisas (APARICIO, ITURRALDE & MASEDA, 2019). Adicionalmente, métodos bibliométricos oferecem processos sistematizados e replicáveis que podem melhorar o entendimento da disseminação do conhecimento dentro de determinado campo de conhecimento e pode explicitar lacunas e oportunidades que possam contribuir para o avanço de determinada disciplina (APARICIO, ITURRALDE & MASEDA, 2019). De acordo com Zupic & Čater (2015), revisões bibliométricas introduzem um processo de revisão sistemática, transparente e reproduzível, que permite uma melhor descrição, avaliação e monitoração de uma pesquisa publicada.

Revisões bibliométricas tem sido conduzida em diversas áreas de pesquisa incluindo gerenciamento, economia, inovação, empreendedorismo e negócios internacionais (APARICIO, ITURRALDE & MASEDA 2019).

Nesta direção, buscou-se três parâmetros para o aprofundamento deste estudo, através de revisão da bibliométrica:

- Os volumes de resíduos a serem gerados dentro de sua relevância para a pesquisa por conta das dimensões destes componentes, pelo seu peso e pelas dificuldades logísticas para sua movimentação. Estas dificuldades encontram-se não somente no peso e nas dimensões destes componentes, mas também na localização geográfica dos parques eólicos que, via de regra, encontram-se em locais remotos na zona rural, normalmente em condições de difícil acesso.

- As possibilidades de descarte dos resíduos gerados, caracterizadas como ambientalmente aceitos. Nesta situação, os volumes citados anteriormente chegarão a milhões de toneladas/ano nas próximas décadas, o que dificulta sobremaneira a implementação de processos de acondicionamento da matéria prima para processamento posterior caso o descarte exija. Em situação ideal, este acondicionamento deveria ser realizado na origem da instalação da turbina, portanto em locais afastados e ermos.

- A alternativa de exploração de um mercado secundário em função do descomissionamento de turbinas não por terem atingido seu final de vida em serviço, mas pelo fato dos parques onde estes equipamentos estão instalados terem sido submetidos a um processo de repontenciamento prematuro em relação a expectativa de vida útil das turbinas originalmente lá instaladas.

A seguir estão representados os resultados da revisão bibliométrica desenvolvida para este estudo de alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida, considerando-se 163 artigos pesquisados.

Para a revisão bibliométrica de artigos referentes à pesquisa sobre Economia Circular Aplicada em Pás de Turbinas Eólicas após seu Final de Vida Útil, foram escolhidas 5 bases de dados: *ScienceDirect*, *Scopus*, *ProQuest*, *Emerald Insight* e *Taylor&Francis*. Foram realizadas consultas somente em artigos científicos publicados em periódicos, objetivando uma concentração em artigos de engenharia em conjunto com artigos com foco no meio ambiente. Como elemento de filtro, também se limitou o período de pesquisa a partir do ano 2000.

Como passo inicial foram definidos dois conjuntos de interesse com as respectivas palavras-chave:

- Aspectos vinculados à Energia Eólica – (1.a) *Wind Turbine Blades*, (2.a) *Wind Energy*, (3.a) *Blades Disposal*, (1.b) *Wind Power*, (2.b) *Wind Turbines*, (3.b) *Blades Failures*, (4.b) *Composite Blades*.

- Aspectos vinculados à Economia Circular – (4.a) *Circular Economy*, (5.a) *Recycling*, (6.a) *Circularity*, (5.b) *End of Life*, (6.b) *Reuse*, (7.b) *Recover*, (8.b) *Clean Environment*.

Estes dois conjuntos de palavras-chaves geraram 25 combinações que foram agrupadas em dois grupos separados, sendo um grupo constituído de 3 palavras para o assunto “Energia Eólica” (1.a; 2.a & 3.a), combinadas com três palavras para o assunto “Economia Circular” (4.a; 5.a & 6.a). O segundo grupo é constituído por quatro palavras associadas a “Energia Eólica” (1.b; 2.b; 3.b & 4.b), combinadas com quatro palavras associadas a “Economia Circular” (5.b; 6.b; 7.b & 8.b). Estes grupos de palavras serviram para as pesquisas em busca de artigos que representassem o objetivo deste trabalho, e estão dispostos da maneira a seguir:

- Grupo (a) com 9 combinações sem repetição – (1.a & 4.a); (2.a & 5.a); (3.a & 6.a); (1.a & 5.a); (2.a & 6.a); (3.a & 4.a); (1.a & 6.a); (2.a & 4.a) e (3.a & 5.a).

- Grupo (b) com 16 combinações sem repetição – (1.b & 5.b); (2.b & 6.b); (3.b & 7.b); (4.b & 8.b); (1.b & 6.b); (2.b & 7.b); (3.b & 8.b); (4.b & 5.b); (1.b & 7.b); (2.b & 8.b); (3.b & 5.b); (4.b & 6.b); (1.b & 8.b); (2.b & 5.b); (3.b & 6.b) e (4.b & 7.b).

Quadro 3 - Combinações de palavras-chaves

Conjuntos de Palavras-chave			
1.a	Wind Turbine Blades	Circular Economy	4.a
2.a	Wind Energy	Recycling	5.a
3.a	Blades Disposal	Circularity	6.a
1.a	Wind Turbine Blades	Recycling	5.a
2.a	Wind Energy	Circularity	6.a
3.a	Blades Disposal	Circular Economy	4.a
1.a	Wind Turbine Blades	Circularity	6.a
2.a	Wind Energy	Circular Economy	4.a
3.a	Blades Disposal	Recycling	5.a
Grupo (a)			

Conjunto de Palavras-chave			
1.b	Wind Power	End of Life	5.b
2.b	Wind Turbines	Reuse	6.b
3.b	Blades Failures	Recover	7.b
4.b	Composite Blades	Clean Environment	8.b
1.b	Wind Power	Reuse	6.b
2.b	Wind Turbines	Recover	7.b
3.b	Blades Failures	Clean Environment	8.b
4.b	Composite Blades	End of Life	5.b
Grupo (b)			

Conjunto de Palavras-chaves			
1.b	Wind Power	Recover	7.b
2.b	Wind Turbines	Clean Environment	8.b
3.b	Blades Failures	End of Life	5.b
4.b	Composite Blades	Reuse	6.b
1.b	Wind Power	Clean Environment	8.b
2.b	Wind Turbines	End of Life	5.b
3.b	Blades Failures	Reuse	6.b
4.b	Composite Blades	Recover	7.b
Grupo (b)			

Fonte: O Autor

Das 25 combinações pesquisadas nas cinco bases de dados citadas, foram obtidos um total de 125 subgrupos de artigos. Foram considerados somente os artigos publicados nos periódicos constantes das bases. Foi considerado como número significativo, na composição de duas palavras chaves listada no quadro 3, aquela que gerou um máximo 30 indicações. Das 25 combinações, 15 apresentaram mais de 30 artigos.

Para estes casos voltou-se a revisão bibliográfica e acrescentou-se as palavras *Assessment*, *Evaluation*, *Blades*, *End-of-life*, *Disposal*, *Circularity*, de maneira individual e cumulativa, até que se atingisse um número de indicações menor ou igual a 30 artigos. Para cada caso foi usado uma quantidade diferente de palavras chaves, dependendo do resultado alcançado para a quantidade de artigos apresentados por cada base de dados consultada. Como resultado, foram acessados 2.896 artigos, considerando-se todos os 25 subgrupos nas cinco bases pesquisadas.

Através de uma análise de cada um dos artigos conclui-se que, diversos artigos que não representavam o interesse primordial desta pesquisa ou ainda artigos sem o foco necessário para contribuir com este estudo.

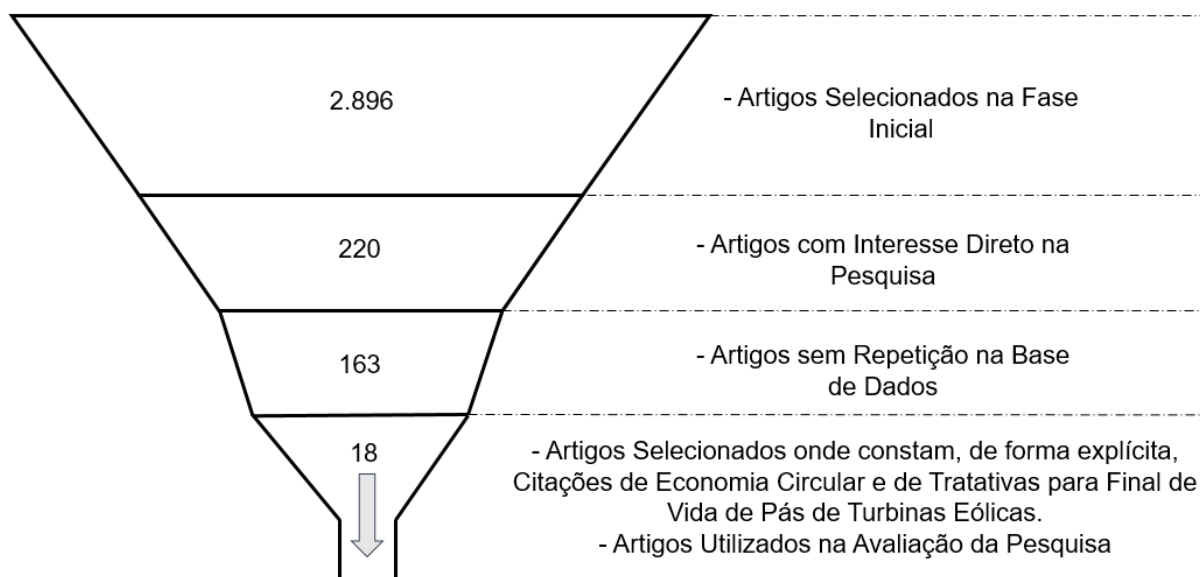
Após a seleção, levando em conta estes atributos, o resultado apontou para 220 artigos considerados pertinentes, sendo 106 artigos na base de dados *ScienceDirect*, 57 na *Scopus*, 39 na *ProQuest*, 10 na *Taylor&Francis* e 8 na *Emerald Insight*. Dos 220 artigos selecionados, 57 deles apresentaram-se como repetidos em duas ou mais bases de dados consultadas.

Feito o descarte das repetições, sobraram 163 artigos que, selecionados, foram utilizados para uma avaliação mais detalhada de seu conteúdo.

Foi realizada uma análise nestes 163 artigos, considerando citações que mencionavam nos textos, ideias e conceitos de Práticas de Economia Circular e de Tratativas para Final de Vida de Pás de Turbinas Eólicas, concomitantemente. Desta maneira, foram identificados 18 artigos que continham estas características, de maneira explícita.

A figura 19, demonstra a sequência de filtros que representa a forma como foram selecionados os artigos acessados nas bases de dados pesquisadas a partir das combinações possíveis das palavras chaves escolhidas.

Figura 19 - Seleção de artigos para análise sistemática.



Fonte: O Autor

3.3 ANÁLISE DOS ESPECIALISTAS

Esta pesquisa também envolveu uma coleta de informações com especialistas (OLIVEIRA NETO *et al*, 2018). A abordagem foi uma pesquisa qualitativa, quando foi utilizado um objetivo de carácter exploratório, para focalizar os aspectos relacionados com as alternativas de destinação para disposição de pás de turbinas eólicas em final de vida útil.

Através da análise da tipificação do assunto deste trabalho como “*alternativas disponíveis para destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas em final de vida*”, esta área de atividade aparentou ser como pouco conhecida e de desenvolvimento relativamente recente. A duração da vida útil destes componentes, assim como as quantidades a serem geradas para descarte em razão do final da vida destas pás que deverá ocorrer ao longo das próximas décadas e a destinação a ser dada a estes componentes, dizem respeito somente ao conhecimento intrínseco de profissionais especialistas que atuam ou atuaram neste tipo de negócio. E nem todos demonstraram grande interesse em desenvolver soluções para esta situação. A pesquisa de campo, segundo definição de Marconi & Lakatos (2010), é utilizada com o objetivo de conseguir informações e/ou conhecimento acerca de determinado problema para o qual se procura uma resposta, ou de uma hipótese, que se queira comprovar, ou, ainda de descobrir novos fenômenos ou as relações entre eles. Desta forma foi utilizado um questionário com afirmações que pudessem observar as fronteiras desta pesquisa.

3.3.1) Elaboração do Questionário

Para a coleta de dados foi utilizado um questionário semiestruturado tendo como foco a qualificação e a familiaridade dos respondentes em relação ao assunto da pesquisa (OLIVEIRA NETO *et al*, 2018). O questionário foi desenvolvido com base nas alternativas para destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida encontradas na revisão sistemática realizada.

Com base em Marconi & Lakatos (2010, p. 184), onde o questionário é um “instrumento de coleta de dados, constituído por uma série ordenada de perguntas, que devem ser respondidas por escrito sem a presença do entrevistador”, foi

preparado o material e distribuído para um grupo de especialistas atuantes na área de geração de energia elétrica através da força dos ventos.

Os pontos considerados foram as questões que estavam baseadas em assertivas e não em perguntas. Também as afirmações foram subdivididas em 6 grupos, conforme a pertinência do assunto em discussão:

- Aspectos Gerais
- Reuso/Redistribuição
- Remanufatura
- Reciclagem
- Recuperação de Energia
- Disposição

Esta pesquisa também envolveu a coleta de informações com especialistas. Os questionários foram distribuídos para especialistas, que foram escolhidos entre profissionais que fazem parte do círculo de relacionamento do autor. Estas escolhas obedeceram a um equilíbrio entre três áreas de atuação dentro do grupo de respondentes, todas no âmbito do negócio de geração eólica. Estes especialistas atuam em: fornecedores de peças para indústria eólica (preferencialmente pás), fabricantes de turbinas eólicas e/ou empresas usuárias/operadoras de parques eólicos. Como critério de seleção dos respondentes, considerou-se a experiência de cada profissional baseado na função exercida pelo especialista, a formação técnica do respondente (preferencialmente engenharia), o tempo de trabalho na função atual e o tamanho da empresa em que atuam.

Após a construção da base teórica e a formulação do questionário da pesquisa, este foi enviado, via e-mail, para 22 especialistas das diversas áreas de atuação no segmento de geração eólica. Destes, 14 especialistas, todos brasileiros, responderam ao questionário. Estes especialistas atuam em empresas multinacionais produtoras de turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores, em seus fornecedores de peças (principalmente de pás), em empresas de instalação destas turbinas ou na operação e manutenção dos parques eólicos no Brasil, EUA e Europa. Dos 14 respondentes, 11 atuam no Brasil e 3 no exterior (EUA e Europa). Os respondentes foram identificados nesta pesquisa pelos códigos de E1 a E14.

As respostas foram atribuídas em uma escala de Likert de 1 a 5, com a seguinte configuração: 1) discorda totalmente; 2) discorda parcialmente; 3) não concorda, nem discorda; 4) concorda parcialmente; 5) concorda totalmente. Esta escala foi útil para agrupar as opiniões e entender a visão geral dos entrevistados. Os

especialistas tiveram a oportunidade de argumentar suas respostas com base em experiências adquiridas no setor de energia eólica. Na abordagem da escala Likert, as respostas eram obrigatórias (de 1 a 5), enquanto os comentários ficaram como opcionais.

Os questionários foram montados no programa *Google Forms* disponível gratuitamente na Internet. No anexo 1 está uma cópia do questionário na forma em que foi enviado para os respondentes.

Na sequência, estão apresentadas no quadro 4, as informações sobre tempo de experiência e segmento de atuação da empresa em que cada especialista atua.

Quadro 4 - Segmento de atuação e tempo de experiência profissional na função

Respondente	Tempo de Experiência (em anos)	Segmento de Atuação da Empresa
E1	7	Fornecedor de peças para Indústria Eólica - Pás
E2	8	
E3	20	
E4	6	Fabricante de Turbinas Eólicas
E5	8	
E6	14	
E7	9	
E8	9	
E9	15	
E10	7	Usuários/Empresas de Manutenção e Operação de Parques Eólicos (Terceirizados)
E11	9	
E12	13	
E13	15	
E14	9	

Fonte: O Autor

Neste questionário, em cada afirmação só é possível apontar uma das alternativas apresentadas. Este método para pesquisa, em geral qualitativa, não tem uma estruturação formal (NAKANO, 2012). Portanto, a estruturação do questionário desta pesquisa partiu de uma configuração com afirmações que deveriam ser avaliadas conforme uma escala de Likert de cinco posições. A história da construção deste tipo de escala de mensuração está ligada ao trabalho de Rensis Likert publicado em 1932 onde este autor realizou uma redução no número efetivo de pontos de escolhas, visto que, inicialmente, o sistema era contínuo (VIEIRA & DALMORO, 2008).

O questionário é constituído de afirmações estruturadas com base nas alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida útil, constantes nos 18 artigos relacionados na pesquisa bibliométrica realizada. O objetivo foi o de

mapear as linhas de pensamento que estão presentes nos meios de atuação desta atividade. A estrutura do questionário é composta de 35 afirmações, nas quais os respondentes devem colocar sua opinião sobre a questão elaborada. Estas respostas são obrigatórias. As respostas de posicionamento sobre as afirmações seguem o seguinte critério:

	1	2	3	4	5	
Discordo Totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

Para cada afirmação, ficou aberta a possibilidade da inclusão de comentários sobre o tema da afirmação, sendo este opcional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados das opiniões dos especialistas pesquisados sobre as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida.

Após cada grupo do questionário apresentado aos especialistas, está colocada a discussão referente aos resultados obtidos. As discussões em relação ao estudo aqui desenvolvido foram baseadas em dois pontos fundamentais para o desenrolar desta pesquisa. O primeiro foi o levantamento das alternativas de descarte discutidas nos artigos que fizeram parte da revisão da literatura que resultou em uma seleção de 18 trabalhos contendo assuntos relacionados à destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas em final de vida em serviço. Em seguida, tomando como ponto inicial as alternativas relatadas nestes 18 artigos estão colocadas as opiniões dos especialistas colhidas no questionário desenvolvido para tanto.

Estes assuntos foram agrupados conforme um conjunto de conceitos e informações contidos em cada uma de suas perspectivas. Desta maneira este agrupamento teve como base os seguintes tópicos: Situação do Mercado Futuro; Atuação Governamental; Resultados Financeiros/Custos de Destinação; Preocupação com o Meio Ambiente; Responsabilidades para com a Destinação; e Desenvolvimento de Processos para Destinação. A correlação direta entre os assuntos levantados nos artigos e os grupos de assertivas que compõe o questionário através das respostas e comentários, estão comparadas e discutidas conforme os já citados anteriormente grupos:

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 4.1 Aspectos Gerais; | 4.4 Reciclagem; |
| 4.2 Reuso/Redistribuição; | 4.5 Recuperação de Energia |
| 4.3 Remanufatura; | 4.6 Disposição |

No grupo 4.1 Aspectos Gerais foram colocadas 10 afirmações subdivididas em 3 subgrupos. O primeiro referente às Características Genéricas dos Equipamentos e de Mercado com 3 afirmações. O segundo, contendo Afirmações Referentes à Pás com uma Visão de Sustentabilidade, também com 3 afirmações. E o terceiro subgrupo com Afirmações Referentes à Legislação e Visão Governamental. Para os outros grupos foram colocadas 5 afirmações cada sobre o tema central de cada grupo.

Do total das 35 questões, foram recebidos 229 comentários, obtendo-se, em média, 6,54 comentários por cada assertiva.

Tabela 3: Quadro Resumo das Respostas Obtidas nos Questionários

AFIRMAÇÕES CONSTANTES NO QUESTIONÁRIO - Respostas conforme Escala de Likert																																				
Discordo Totalmente • • • • • Concordo Totalmente																																				
1 2 3 4 5																																				
Respondentes	Q4.1	Q4.2	Q4.3	Q4.4	Q4.5	Q4.6	Q4.7	Q4.8	Q4.9	Q4.10	Q5.1	Q5.2	Q5.3	Q5.4	Q5.5	Q6.1	Q6.2	Q6.3	Q6.4	Q6.5	Q7.1	Q7.2	Q7.3	Q7.4	Q7.5	Q8.1	Q8.2	Q8.3	Q8.4	Q8.5	Q9.1	Q9.2	Q9.3	Q9.4	Q9.5	
E1	3	5	5	3	5	3	5	5	5	4	2	2	3	5	5	5	5	5	3	2	5	5	5	5	5	3	5	4	2	4	5	5	1	5	5	
E2	5	4	4	5	5	5	5	5	2	4	2	2	1	2	4	2	1	5	3	2	5	5	1	4	5	4	5	3	2	3	2	2	1	5	1	
E3	5	5	5	2	2	5	5	5	4	4	1	1	5	5	5	5	5	3	5	2	5	5	5	5	5	3	3	5	4	5	5	3	4	4	5	
E4	5	1	5	3	4	3	5	5	3	4	1	3	3	5	5	5	5	3	3	5	4	2	4	4	4	2	5	3	3	5	4	3	1	2	4	
E5	5	2	1	1	5	5	5	5	5	5	1	1	5	5	5	5	5	3	5	5	3	5	5	5	5	3	5	5	3	5	5	5	3	5	5	
E6	5	5	5	4	5	5	5	5	3	5	1	1	5	5	3	5	5	4	4	3	3	5	3	5	4	4	4	5	3	3	5	5	1	5	4	
E7	5	5	4	4	5	5	4	5	5	3	2	2	2	2	2	5	3	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	4	5	1	5	4	
E8	4	4	3	2	5	3	3	5	4	4	5	3	4	4	3	5	4	3	3	2	3	5	5	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	4	5	
E9	5	5	4	5	5	2	4	5	1	5	1	1	2	5	4	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5	1	2	4	4	5	4	5	5	5	5	
E10	5	4	3	5	5	5	3	5	2	5	2	2	5	5	5	5	5	3	5	2	5	5	3	5	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
E11	4	3	4	5	5	2	4	4	4	4	2	1	2	5	4	4	3	3	3	2	2	4	4	5	4	3	5	3	4	4	5	5	4	3	3	
E12	4	4	5	4	4	2	4	5	3	5	3	3	3	5	5	5	3	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	3	3	3	4	4	5	3	
E13	4	5	5	4	5	4	4	5	2	4	2	4	4	4	4	2	2	4	5	4	5	4	4	5	5	1	4	5	5	5	5	5	1	4	5	
E14	4	5	4	4	5	3	5	5	3	5	2	2	4	2	4	5	3	4	4	3	2	3	1	1	1	5	4	2	5	5	5	5	3	2	2	5

Fonte: O Autor

A Tabela 3 mostra o resultado atribuído por cada respondente para cada uma das afirmações constantes do questionário. Os valores atribuídos para as respostas são os correspondentes segundo o grau de concordância descrito na escala Likert, definida para esta avaliação.

4.1 ASPECTOS GERAIS

Neste primeiro grupo, foram oferecidas 10 assertivas, que dizem respeito às condições atuais de mercado em que se encontram as atividades de implantação, operação e manutenção de parques eólicos. As assertivas focam também aspectos de sustentabilidade em relação as atividades de tratamento de resíduos de pás de turbinas eólicas após seu término de vida útil e apresentam-se afirmações em relação à posição de órgãos governamentais e sobre legislações específicas sobre estes temas.

O crescimento da taxa de implantação de parques eólicos em todo o mundo é uma realidade incontestável, como consequência, o mercado irá experimentar um aumento exponencial destas instalações nas próximas décadas.

Oito especialistas (E2, E3, E4, E5, E6, E7, E9 e E10) concordaram totalmente que haverá aumento exponencial da taxa de implantação de parques eólicos nas próximas décadas. Os oito especialistas destacaram também o repotenciamento de parques instalados como fator chave para o aumento de novas instalações e um respondente citou um crescimento significativo de instalações *offshore*, onde o tamanho das turbinas é maior que os equipamentos *onshore*. Cinco especialistas concordaram parcialmente (E8, E11, E12, E13 e E14), sendo que E13 acredita em haverá uma onda de repontenciamento de parques eólicos existentes que deverá ser mais intensa que instalações de novos parques. E12 afirmou que este aumento está ligado ao crescimento da economia mundial, e que dependem das políticas em relação ao petróleo e dos custos de produção de energia eólica. Entretanto, dois especialistas (E1 e E8) argumentaram que a expansão de energia solar pode desacelerar o crescimento de parques eólicos.

As instalações de turbinas eólicas têm sua vida limitada por condições de sua utilização.

Sete especialistas (E1, E3, E6, E7, E9, E13 e E14) concordaram totalmente que a vida útil de turbinas eólicas é limitada por condições de utilização. Na opinião destes sete especialistas, a vida útil da turbina eólica depende da agressividade do ambiente na sua operação e da vida útil de seus componentes sob condições de trabalho agressivas, citando especificamente componentes rotativos e sistemas elétricos. Quatro respondentes concordaram parcialmente (E2, E8, E10 e E12),

ressalvando à afirmação apresentada, citando que a vida útil da turbina é definida pela engenharia do fabricante do equipamento. E8 e E10 comentaram sobre a qualidade da manutenção e a maturidade do projeto, como aspectos que também influenciam na durabilidade de uma turbina eólica. Entretanto, dois especialistas (E4 e E5) discordaram que a vida útil de turbina seja limitada somente por condições de utilização, enfatizando que a vida útil é determinada pela característica do projeto sendo que o tempo de vida deve ser baseado na taxa de retorno do equipamento quando em operação – *payback*. Para um dos especialistas (E11) esta afirmação é irrelevante.

Entre os componentes principais de uma turbina eólica (Torre, Nacelle, Hub e Pás), as pás representam a maior dificuldade para a sua disposição ao final da vida útil.

Foi abordado que pás são os componentes de turbinas eólicas que apresentam as maiores dificuldades para disposição em final de vida. Seis respondentes (E1, E3, E4, E6, E12 e E13) concordaram totalmente com esta assertiva. E1 citou a complexidade logística como elemento que dificulta o descarte. E12 e E13 citaram que para torres existem processos convencionais de reciclagem, uma vez que são fabricadas em aço, ficando as dificuldades por conta da desmontagem e transporte. No que diz respeito às pás os processos de reciclagem ainda não estão definidos. Cinco especialistas (E2, E7, E9, E11 e E14) concordaram parcialmente, afirmando que existe uma diferença substancial nas destinações para pás e torres, sendo as torres mais fácil para administrar sua destinação. Entretanto E8 e E10 consideraram indiferente, citando somente as pás como sendo componentes válidos para esta assertiva. E5 discordou completamente, afirmando que estes componentes não são os principais pontos de desgaste de uma turbina eólica em serviço.

Os materiais residuais das pás representam uma preocupação para os operadores do sistema de geração de energia para os próximos anos (entre 05 e 10 anos).

Para a afirmação de que os resíduos de pás são motivos de preocupação para os operadores de parques eólicos nos próximos anos, obteve-se como resposta de quatro respondentes (E2, E9, E10 e E11) que concordaram totalmente. Cinco especialistas (E6, E7, E12, E13 e E14) concordaram parcialmente sendo que E7 afirmou que deveriam surgir empresas especializadas em descarte destes

componentes. Dois a consideram indiferente (E1 e E4) por considerarem já ser uma preocupação atual. Em contrapartida, dois especialistas (E3 e E8) discordaram parcialmente, citando que a maioria dos parques estão em sua meia vida, portanto não motivam este tipo de preocupação em prazos abaixo de 10 anos e que “esta preocupação é função do grau de maturidade do proprietário do parque” (E8). Um respondente (E5) discordou totalmente, sem emitir comentários.

Esta preocupação, deve ser compartilhada com os fabricantes das turbinas, assim como, com os fornecedores das pás.

Onze especialistas (E1, E2, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E13 e E14) concordaram totalmente que a preocupação com a destinação de materiais residuais de pás de turbinas eólicas após seu final de vida deva ser compartilhada entre os operadores do sistema de geração, os fabricantes de turbinas eólicas e os fornecedores das pás. Dois respondentes (E4 e E12) concordaram parcialmente considerando que apesar de concordarem, alegaram que os custos a serem gerados referentes ao descarte, normalmente, não está considerado no custo do produto por parte, tanto dos fornecedores das pás, quanto dos fabricantes das turbinas eólica. Isto, independentemente se o destino dos resíduos tem um endereçamento ambientalmente sustentável ou não. Um respondente (E3) discordou parcialmente dizendo que os fabricantes e fornecedores dos equipamentos de geração não são responsáveis pelo descarte do produto final. O comprador da turbina (comercializador da energia) deve ser responsável pelo descarte do seu ativo ao final de vida do equipamento. A única preocupação que fica exposta é que como fabricante de turbinas eólica, sem um descarte adequado, a geração eólica deixa de ser um produto gerador de energia verdadeiramente limpa, perdendo seu apelo de produto ambientalmente correto em questões de sustentabilidade.

As atividades de descarte sustentável dos materiais residuais das pás devem fornecer um resultado financeiro positivo.

Seis respondentes (E2, E3, E5, E6, E7 e E10) concordaram que as atividades de descarte sustentável devem ter um resultado financeiro positivo. Na opinião dos seis especialistas, o lucro é fator chave para que existam interessados nestes processos. Um respondente (E13), concordou parcialmente, argumentando que se não existir um resultado positivo as pás serão descartadas em aterros sanitários para sempre. Quatro especialistas (E1, E4, E8 e E14) consideraram indiferente e que o resultado não precisa ser necessariamente positivo, mas deve assegurar um impacto

ambientalmente neutro. Três especialistas (E9, E11 e E12) discordaram parcialmente, afirmando que o resultado deve, preferencialmente, cobrir os custos, caso contrário os custos deverão ser absorvidos pelas empresas geradoras de energia.

Governo e Entidades Governamentais devem desenvolver e implementar legislação específica para direcionar adequadamente o descarte destes materiais residuais com o objetivo da proteção ambiental.

A interferência de governos na elaboração de legislação específica para descarte ambientalmente sustentável de pás de turbinas eólicas, foi apoiada por sete dos especialistas (E1, E2, E3, E4, E5, E6 e E14) que enfatizaram o papel do Estado em proteger o meio ambiente e que esta interferência deve ser através de incentivos e imposições para garantia da segurança jurídica. Cinco respondentes (E7, E9, E11, E12 e E13) concordaram parcialmente afirmando que além de desenvolver legislação específica para as destinações, o governo deve incentivar um descarte sustentável. Entretanto, dois respondentes (E8 e E10) a consideraram indiferente, argumentando que a responsabilidade deveria ser da cadeia de valor do negócio de geração de energia eólica.

O descarte dos materiais residuais das pás deve considerar, obrigatoriamente, um tratamento ambientalmente seguro.

Treze especialistas (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E12, E13 e E14) concordaram totalmente que o descarte deve considerar, obrigatoriamente, um tratamento ambientalmente seguro. E1 afirmou que “sem dúvida deve objetivar um impacto ambiental neutro”. Somente um respondente (E11) concordou parcialmente.

Deve haver incentivos inclusos na legislação, para que as atitudes de descarte ambientalmente seguro e sustentável sejam devidamente adotadas.

A afirmação de que devem existir incentivos governamentais inclusos na legislação para que as atitudes de descarte ambientalmente seguro e sustentável de pás sejam devidamente adotadas, dividiu as opiniões de forma equitativa. Três especialistas (E1, E5, E7) concordaram totalmente com a necessidade de incentivos, inclusive opinaram pela necessidade da inclusão de penalidades pelo não cumprimento da legislação, alavancando desta forma o endereçamento dos resíduos para um descarte sustentável. Três respondentes (E3, E8 e E11) concordaram parcialmente afirmando que os incentivos não podem onerar o descarte e que devem ser progressivos até que os volumes se mostrem financeiramente sustentáveis. Quatro especialistas (E4, E6, E12 e E14) consideraram indiferente a afirmação

expondo que em um primeiro momento pode ser, mas que estas atitudes deveriam ser um processo natural, sem incentivos e que só concordam se forem adotadas duras penalidades. Três respondentes (E2, E10 e E13) discordam parcialmente alegando que é necessário desenvolver descartes economicamente viáveis no aspecto financeiro, e não se utilizar de incentivos governamentais. E9 discorda totalmente. “Não deve haver incentivos governamentais”.

Leis que incentivem o tratamento e o descarte ambientalmente seguros deverão ser desenvolvidas e implementadas nos próximos 5 anos (2020 a 2025), partindo ou não das autoridades governamentais estabelecidas.

A obrigatoriedade do descarte ambientalmente sustentável de pás de turbinas eólicas e o desenvolvimento de uma legislação específica com inclusão de incentivos para este descarte deverá ser estabelecida e implementada nos próximos 5 anos. Seis especialistas (E5, E6, E9, E10, E12 e E14) concordaram totalmente com a afirmação. E12 comentou que quanto mais cedo for iniciada a implementação de legislações nesta direção melhor, e que este tipo de implementação demanda muito tempo. Sete especialistas (E1, E2, E3, E4, E8, E11 e E13), concordaram parcialmente, afirmando que seria desejável, mas que para desenvolver atitudes de descarte ambientalmente seguras é necessário muito esforço e dedicação e não deverão acontecer neste curto espaço de tempo. Um respondente (E7) considerou indiferente sem tecer nenhum comentário.

4.1.1 Discussões sobre Aspectos Gerais

As discussões a respeito do grupo “Aspectos Gerais” apresentam-se sob três subdivisões:

a) Características Genéricas dos Equipamentos e de Mercado.

Na categoria “Características Genéricas dos Equipamentos e de Mercado” existe uma concordância parcial entre os dados e informações colhidas a partir dos artigos selecionados e as opiniões colhidas dos entrevistados. Via de regra, os artigos citam um crescimento exponencial das instalações de novos parques eólicos com sua consequente geração de resíduos ao final de sua vida útil. Como citações, temos “desde 1999 a produção de energia eólica tem crescido trinta vezes” (YAZDANBAKHSI *et al.*, 2018). Também Liu & Barlow (2017) cita que a capacidade instalada cresceu de 7.600 MW em 1998 para 364.270 MW em 2014 (GWEC, 2015)

e projetam uma quantidade de aproximadamente 2,0 Mio de toneladas de resíduos de pás a serem descartados em 2050. Os especialistas consultados concordaram com esta projeção, mas argumentam que o advento da energia solar fotovoltaica pode desacelerar esta curva de crescimento.

Quanto a vida útil das pás ambas as fontes concordam com uma perspectiva entre 20 e 25 de utilização (MARSH, 2017).

Estas considerações baseiam-se nas características deste tipo de atividade e refletem o que está acontecendo no mundo, em relação a geração de energia. Existe uma preocupação generalizada com relação a sustentabilidade desta atividade, por parte dos governos e entidades não governamentais, demonstrando ser necessário uma atitude positiva para preservação dos recursos naturais disponíveis e para salvaguardar nosso meio ambiente. Esta preocupação está refletida tanto nos artigos pesquisados, quanto nas respostas dadas pelos especialistas consultados.

Estas considerações estão representando as perspectivas de Situação de Mercado Futuro, Atuação Governamental, Preocupação com o Meio Ambiente e a Responsabilidade para com a Destinação destes Componentes.

b) Afirmações Referentes a Pás Através de uma Visão de Sustentabilidade.

No subgrupo chamado de “Afirmações Referentes a Pás Através de uma Visão de Sustentabilidade”, tanto os artigos consultados quanto os especialistas participantes da pesquisa, concordam que os resíduos de pás são motivo de preocupação. Desta forma, um processo sustentável é necessário para administrar o final de vida de turbinas eólicas para maximizar os benefícios ambientais da energia dos ventos (JENSEN & SKELTON, 2018).

Como elemento de incerteza neste assunto, fica a dúvida do que fazer para atender aos requisitos que garantam processos ambientalmente seguros. A princípio, os estudos demonstrados nos artigos escolhidos para esta pesquisa vão na direção de desenvolvimento de alternativas de processos para destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas, sem ater-se a definições pragmáticas de destinação, comparando entre si, as alternativas citadas que poderiam indicar um caminho a ser seguidos pelos participantes da cadeia de valor deste mercado.

Esta característica fica demonstrada no posicionamento dos especialistas pesquisados que definiram, via suas respostas e comentários, que o mercado não está tomando nenhuma posição afirmativa para contemplar requisitos de sustentabilidade, a não ser descartar pás descomissionadas em aterros sanitários.

Como ressalva a este comportamento, existem países que proibiram esta prática e nestes locais a solução tem sido a incineração, que também representa uma agressão potencial ao meio ambiente por geração de resíduos de queima gasosos e sólidos que devem merecer atenção para sua destinação, por parte de toda a cadeia de valor envolvida.

c) Afirmações Referentes a Legislação e Visão Governamental

Para o caso de “Afirmações Referentes a Legislação e Visão Governamental”, o assunto foi discutido pelos especialistas dividindo as opiniões entre ter ou não incentivos e/ou penalidades. Dentro dos artigos, foram citados que o descarte tem três caminhos principais - aterros sanitários, incineração e reciclagem, sendo a opção de aterros sanitários a menos apropriada e já tendo sido banida em alguns países (JENSEN, 2018a). Este assunto, quando discutido pelos especialistas, dividiu as opiniões entre ter ou não incentivos e/ou penalidades nas legislações pertinentes ao descarte de resíduos de pás de turbinas eólicas. A única iniciativa concreta localizada nesta pesquisa em relação a esta situação foi a “EU Landfill Directive – Council Directive 1999/31/EC de abril de 1999, que foi somente citada por Yang et al., (2012) em um dos artigos pesquisados como Práticas Atuais na Indústria, mas não foi explorada por nenhum dos artigos em relação ao seu conteúdo, sua extensão de aplicabilidade e sua obrigatoriedade de utilização. Quanto aos especialistas consultados, estes se mostraram alheios a esta diretiva, apresentando um desconhecimento em relação ao seu conteúdo.

Este é um assunto de relevância maior que deve servir, inclusive de oportunidade para desenvolvimento de estudos por parte do meio acadêmico. Como demonstrado neste trabalho, em pouco tempo volumes para descarte de pás de turbinas eólicas deveram atingir quantidades tais que, sua administração deverá se tornar problemática.

4.2 REUSO/REDISTRIBUIÇÃO

Neste grupo, são consideradas como destinação de resíduos de pás de turbinas eólicas em final de vida, a reutilização das pás em equipamentos de menor potência, ou ainda redirecionadas para instalações com solicitações mecânicas menores às daquelas para a qual estas pás tenham sido dimensionadas, desde que

caracterizado sua sanidade através de inspeção apropriada e de que seja assegurada uma confiabilidade de performance nesta nova condição de trabalho.

A reutilização de pás de turbinas eólicas através de seu redirecionamento para equipamentos de menor potência é uma alternativa tecnicamente viável e em uso atualmente.

Apenas um especialista (E8) concordou totalmente com a assertiva que a alternativa de redirecionamento das pás ou a aplicação em segundo uso é viável técnica e comercialmente, afirmando que existem diversos exemplos nos EUA, que exportam pás usadas para mercados de segunda mão para países ainda no início do ciclo de vida de energia eólica, principalmente na África. Um especialista (E12) considerou indiferente alegando que esta alternativa de sobrevida para as pás deve ter um tempo de vida útil limitada e precisará ser descartada muito breve após sua instalação secundária. Sete especialistas (E1, E2, E7, E10, E11, E13 e E14) discordaram parcialmente da afirmação em função da grande variedade de modelos, de fabricantes e aplicações existentes no mercado, além disso o custo da recuperação para reutilização será um ponto chave, necessitando inspeção e eventual reparo em campo. E1 considerou que o custo de logística envolvido na mudança de local de instalação só viabilizaria para um número muito pequeno de casos. Cinco especialistas discordaram totalmente (E3, E4, E5, E6 e E9) afirmando que a logística para reutilização inviabilizaria esta possibilidade. E3 e E9 julgaram que o reuso de pás após o término de sua vida útil não é viável, porque a fadiga determina seu final de vida.

Os custos de redirecionamento de pás de turbinas eólicas para equipamentos de menor potência nominal tendem a um equilíbrio financeiro positivo.

Apenas um especialista (E13) concordou parcialmente que os custos de redirecionamento de pás para equipamentos de menor potência tendem a um equilíbrio financeiro positivo, afirmando que caso seja tecnicamente possível os custos seriam somente de desmontagem e logística, além da revisão para verificação da sanidade das peças. Três especialistas (E4, E8 e E12) consideraram indiferente a afirmação apresentada argumentando que poderia caracterizar uma sobrevida da peça, mas que logo ela teria que ser descartada. Cinco respondentes (E1, E2, E7, E10 e E14) discordaram parcialmente, sendo que E2 afirmou que não existe uma única resposta, e que depende dos critérios de projeto de cada modelo e das

solicitações mecânicas e térmicas do local da instalação. Cinco especialistas (E3, E5, E6, E9 e E11) discordaram totalmente e afirmaram que os custos de instalação somados aos riscos de quebra prematura não viabilizariam essa alternativa. E9 afirmou que “pás não são utilizáveis após o tempo de vida útil”.

A determinação da vida útil de uma pá redirecionada para sua utilização em equipamentos de menor potência nominal é uma limitação para sua utilização.

A caracterização da vida útil de uma pá de turbina eólica redirecionada para utilização em equipamentos de menor potência nominal é uma limitação para sua utilização foi considerada como uma alternativa válida com quatro respondentes (E3, E5, E6 e E10) concordando totalmente com esta assertiva, por já terem atingido o número de ciclos máximo suportáveis para resistência à fadiga. Três respondentes (E8, E13 e E14) concordaram parcialmente afirmando que, considerando-se o reopontenciamento de parques eólicos, existem muitas turbinas que ainda não atingiram seu prazo nominal de vida útil (20 anos). Citaram ainda que existem parques que operaram por menos de cinco anos e que devido a incentivos fiscais, já estão passando pelo processo de reopontenciamento e que geram e gerarão turbinas em estado de seminovas. Três respondentes (E1, E4 e E12) consideraram indiferente a afirmação, citando que pode ser que sim, se estiver claro qual a nova vida útil do equipamento em questão e quais os custos envolvidos para caracterizar um negócio atraente. Três respondentes (E7, E9 e E11) discordaram parcialmente, alegando que pás usadas de turbinas eólicas não devem ser utilizadas em equipamentos similares por já estarem com sua performance comprometida. Um especialista (E2) discordou totalmente, apenas podendo ser usada com inspeções adequadas, com monitoramento via telemetria remota, sem especificar uma vida útil.

O campo de aplicação para o caso de redirecionamento de pás de turbinas eólicas em equipamentos de menor potência é muito menor que a oferta destes componentes.

Nove respondentes (E1, E3, E4, E5, E6, E9, E10, E11 e E12) concordaram totalmente com a afirmação que as disponibilidades de pás para reuso é muito maior que a demanda de mercado. E1 acredita que a oferta de pás descartadas será maior que as novas instalações de menor potência. E10 citou o movimento de “retrofit” de turbinas menores como sendo uma tendência forte de mercado, com turbinas menores sendo reformadas com pás maiores que as originais para maior geração de

energia, gerando mais sobras. Dois respondentes (E8 e E13) concordaram parcialmente da afirmação. Três especialistas (E2, E7 e E14) discordaram parcialmente citando o desenvolvimento de mercados secundários para turbinas como sendo uma alternativa em crescimento.

As dificuldades logísticas para um redirecionamento de pás na direção de sua utilização em turbinas de menor capacidade dificultam sobremaneira sua operacionalização.

A afirmação que as dificuldades logísticas para a reutilização de turbinas eólicas descomissionadas dificultam sua operacionalização dividiu as opiniões e teve seis respondentes (E1, E3, E4, E5, E10 e E12) concordando totalmente, enquanto cinco especialistas (E2, E9, E11, E13 e E14) concordaram parcialmente, ponderando que depende do contexto, que para situação de troca de equipamentos em projetos de repotenciamento, a logística pode ser otimizada, viabilizando a operação. Por sua vez, (E6 e E8) consideraram indiferente dizendo que a demanda por energia se sobrepõe ao custo logístico. Um respondente (E7) discordou parcialmente dizendo que “se pensarmos em uma segunda onda de implantação de geradores”, a otimização da logística viabilizaria a redistribuição de turbinas usadas.

4.2.1 Discussões sobre Reuso/Redistribuição

Para a situação de utilização de turbinas eólicas seminovas destinadas para mercados secundários, existem poucas citações nos artigos pesquisados. A sensação é de descaso para com esta possibilidade. Foram encontradas citações em Jensen & Skelton (2018a), Marsh (2017), Ortegon, Nies & Sutherland (2013) e Beauson *et al.* (2016).

Este tema levantou diversas dúvidas em relação às possibilidades de Reuso ou Redistribuição de pás de turbinas eólicas seminovas ou de segunda mão, por parte dos entrevistados. O que se percebe é que não existe interesse imediato nestas oportunidades, ou que as prioridades que se apresentam inibem as iniciativas nesta direção

Existe uma discordância em relação a reutilização de pás ou ainda ao redirecionamento de turbinas em meia vida. Estes equipamentos que sobram são normalmente originados de projetos de repontenciamento de parques eólicos para um

melhor aproveitamento do potencial de geração. Foram levantados pontos como falta de viabilidade técnica e comercial neste reaproveitamento.

Os artigos pesquisados fizeram poucas citações destas alternativas, algumas de forma divergente dos respondentes. Entre outros benefícios, a redistribuição desenvolve valores para novos mercados porque itens utilizados em um determinado mercado podem ser coletados, retrabalhados, testados e reinstalados para revenda em outros mercados para diferentes grupos de consumidores (BEAUSON, NIES & SUTHERLAND, 2016).

Turbinas eólicas de gerações antigas são reformadas e revendidas para servirem pequenas comunidades na África (MARSH, 2017).

O monitoramento do tempo de vida ou testes de fadiga nas pás podem se tornar necessários para assegurar a segurança deste componente reutilizado (JENSEN & SKELTON, 2018). Na verdade, este mercado secundário já é uma realidade nos dias atuais. O que fica perceptível, através das respostas dos especialistas, é que o mercado de geração de energia eólica não tem olhado para esta possibilidade de destinação, com o interesse que este segmento possa representar em um futuro próximo.

Este é um mercado que se mostra promissor, afinal o mundo é carente de energia. Principalmente países em desenvolvimento que necessitam de energia barata desde seu custo de implantação da geração até o valor a ser cobrado do consumidor final. A carência de disponibilidade de energia elétrica, mais ainda em locais afastados de centros urbanos. Com certeza, esta oportunidade possa servir de alternativa para minorar as carências em relação a este insumo.

4.3 REMANUFATURA

Neste terceiro grupo, deve ser considerada a realocação de pás para outros usos, diferentes daqueles para os quais, estas foram designadas inicialmente, considerando-se sempre o seu término de vida útil. Faz-se isto através de diferentes cadeias de valor, tais como equipamentos urbanos de arquitetura, reservatórios para peixes, pontes para acesso de pedestres, abrigos para ônibus, parques infantis, etc.

A utilização de pás de turbinas eólicas, após seu final de vida útil, para aplicações em diferentes cadeias de valor deve ser estimulada.

Onze especialistas (E1, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E12 e E14) concordaram totalmente que a reaplicação das pás em diferentes cadeias de valor deva ser estimulada. Apenas um especialista (E11) concordou parcialmente, enquanto dois respondentes (E2 e E13) discordaram parcialmente afirmando que esta reaplicação deve ser estimulada desde que o impacto ambiental seja neutro. Existem aplicações em nichos específicos, mas que utilizam poucos itens e não são representativos quando comparados aos volumes de resíduos gerados.

As alternativas de utilização de pás de turbinas eólicas após seu final de vida útil devem fazer parte integrante da cadeia de suprimentos destes componentes.

Seis especialistas (E1, E3, E4, E5, E6 e E9) concordaram totalmente que as alternativas de utilização de pás de turbinas eólicas após seu final de vida útil devem fazer parte integrante da cadeia de suprimentos destes componentes. Conforme E1 “quem fabrica e quem usa deve se responsabilizar pelo seu descarte seguro ou sua utilização”. Um respondente (E8) concordou parcialmente. Cinco respondentes (E7, E10, E11, E12 e E14) consideraram irrelevante a afirmação, dizendo que talvez possa ser utilizada e que depende muito da situação do componente. Um especialista (E13) discordou parcialmente e um (E2) discordou totalmente, sem emitirem comentários.

A responsabilidade da implementação das opções disponíveis no mercado de utilização de pás de turbinas eólicas após seu final de vida útil deve ser do usuário final (Operador do Parque Eólico).

Três respondentes (E1, E2 e E7) concordaram totalmente que a responsabilidade de implementação de opções disponíveis no mercado para utilização sustentável de pás deve ser do usuário final (Operador do Parque Eólico), por ser o proprietário do bem. E1 enfatizou que apesar disto “todos os agentes e o governo deveriam ser responsáveis pelo desenvolvimento de alternativas”. Cinco respondentes (E6, E9, E12, E13 e E14) concordaram parcialmente, E12 comentou que no momento não consegue ver com quem o operador do parque eólico possa compartilhar esta responsabilidade. Caso o parque seja renovado talvez este possa repartir a responsabilidade com o fornecedor dos equipamentos de geração de energia. E13 sugeriu que o operador do parque tenha o apoio dos fabricantes. Seis respondentes se posicionaram de forma indiferente (E3, E4, E5, E8, E10 e E11), sugerindo que esta responsabilidade seja compartilhada com o restante da cadeia de valor do negócio, o que propiciaria ganhos de escala e soluções consistentes.

Acrescentaram ainda que empresas de outros segmentos deveram participar deste mercado em um futuro próximo.

Os custos associados à necessária adaptação das pás a serem utilizadas em aplicações consideradas como remanufatura, é um elemento dificultador para o desenvolvimento destas aplicações.

Quatro especialistas (E3, E9, E10 e E13) concordaram totalmente que custos de adaptação de pás para uma utilização alternativa dificulta a aplicabilidade desta opção, e que deve ser a maior dificuldade a ser enfrentada, por não existir, ainda, nenhuma aplicação economicamente viável. Quatro especialistas (E6, E7, E12 e E14) concordaram parcialmente, mas deve existir um esforço na direção do equilíbrio financeiro da alternativa escolhida. Seis respondentes (E1, E2, E4, E5, E8 e E11) consideraram indiferente esta afirmação. E1 disse ainda ser “prematureo afirmar que o custo de adaptação seja alto, mas caso o impacto ambiental seja neutralizado, esta alternativa pode adquirir um valor econômico compensador”.

A aceitação destas aplicações desenvolvidas deve enfrentar diversas resistências por parte de novos usuários, dificultando desta maneira sua aplicabilidade.

A assertiva que expõe que a aceitação de aplicações alternativas para pás em final de vida deve enfrentar diversas resistências por parte de novos usuários obteve a concordância total de quatro especialistas (E4, E5, E7 e E9). Estes afirmaram que existe uma baixa viabilidade técnica neste tipo de destinação, vinculando sua aplicabilidade ao fator econômico - “A solução precisa ser economicamente viável”. Dois especialistas (E12 e E13) concordaram parcialmente, afirmando que para casos de novos clientes esta possibilidade possa ser utilizada. Para uma situação de repotenciamento de parque eólico acreditam que o reuso seja mais praticável. Dois respondentes (E6 e E14) consideraram esta afirmação indiferente. Seis especialistas (E1, E2, E3, E8, E10 e E11) discordaram parcialmente afirmando que novos usuários necessitarão de alternativas para descarte das pás quando estas atingirem o final de suas vidas. Afirmaram também que novos usuários finais, normalmente não tem informações técnicas suficientes nem conhecimento específico sobre as características dos materiais utilizados em seus equipamentos. “Para motiva-los seria necessário a disseminação de estudos detalhados para estas aplicações” (E8). Acrescentaram ainda, que caso as soluções apresentadas nesta direção se mostrarem economicamente viável as resistências serão minimizadas.

4.3.1 Discussões sobre Remanufatura

Na remanufatura, novos conceitos de aproveitamento de pás descartadas, demonstrou-se como alternativas ainda em desenvolvimento baseado na criatividade de projetistas e arquitetos, apresentando ainda um resultado incipiente em relação à utilização da quantidade de resíduos a ser gerados em um futuro próximo.

A remanufatura é uma alternativa futura para destinação dos resíduos de pás de turbinas eólicas. As iniciativas citadas nos artigos pesquisados levam em conta iniciativas de aproveitamento em desenvolvimento, estando, a maioria delas por conta da criatividade das possibilidades de utilização. Neste item também é citado a questão da responsabilidade pela destinação das pás após seu término de vida útil. Para o assunto tratado pelos artigos pesquisados, apenas é citado o que poderia ser feito com os resíduos e não quem deveria ser responsável por sua operacionalização.

Este assunto deixa em dúvida quanto a caracterização destas responsabilidades. Considerando-se a opinião dos especialistas, nota-se uma divisão de orientações no sentido da responsabilização sobre os destinos dos resíduos gerados pelo término da vida útil das pás.

Uma aplicação potencial está em usar as pás de turbinas eólicas como pontes ou como mobiliário urbano ou ainda como equipamentos para instalações de parques de diversão para crianças (JENSEN & SKELTON, 2018).

Existem projetos arquitetônicos que se utilizam de seções de pás utilizadas como abrigos de parada de ônibus e bancos de praças na Holanda (MARSH, 2017). Estruturas marítimas e instalações de arte também fazem parte das alternativas em desenvolvimento (MARSH, 2017). Também são citados tanques para peixes (CHERRINGTON *et al.*, 2012).

Estas aplicações necessitam de retrabalho em suas formas para serem viabilizadas. Os especialistas consideraram estas soluções como tentativas válidas, mas enfatizaram a importância dos custos de adaptação para sua utilização, demonstrando que o mercado deve enfrentar resistências quanto sua aplicabilidade. Pode-se afirmar também pelas respostas apresentadas e pelos comentários colocados que existe uma tendência de repartir estas responsabilidades pelos diferentes elos da cadeia de valor do processo de geração de energia eólica. Estes participantes seriam os fabricantes de pás, os fabricantes das turbinas e os produtores

de energia, responsáveis pelos parques eólicos. Os respondentes apresentaram também uma baixa familiaridade com estas alternativas.

Enquanto a possibilidade de reaproveitamento de equipamentos geradores eólicos de utilização secundária enfrenta o descaso generalizado por parte da cadeia de valor deste negócio, existe um desenvolvimento em curso de aplicações interessantes em arquitetura urbana. Estas aplicações apresentam-se como heterodoxas e com impacto visual e de utilização fora do comum. A sensação é que estas aplicações tendem a chamar mais a atenção do entorno em que elas estão instaladas, do que representar efetivamente uma das soluções alternativas viáveis no que diz respeito ao seu volume de destinação. De qualquer maneira não se deve descartar estas possibilidades. Afinal a aparência inusitada destas aplicações pode ser a geradora de uma sensação de bem-estar no ambiente da sua instalação.

4.4 RECICLAGEM

Neste grupo avalia-se a possibilidade da reciclagem dos resíduos, onde fica evidente a necessidade de um acondicionamento adequado dos materiais a serem processados, para atender às condições e requisitos dos processos a que o material deva ser submetido. Este acondicionamento, via de regra, se constitui em processos mecânicos e/ou químicos para possibilitar o transporte e manipulação destes resíduos em sistemas de reaproveitamento do material oriundo do descarte das pás. Entre os processos utilizados destacam-se, operações de trituração, moagem, peletização, ou de tratamentos químicos como a pirólise, a solvólise e a dissolução em leito fluidizado, que propiciam um acondicionamento necessário para a operacionalização da reciclagem nas suas mais diversas alternativas estudadas atualmente.

O reaproveitamento de resíduos de matéria prima usada na fabricação de pás de turbinas eólicas via reciclagem, se constitui na maneira mais apropriada de descarte sustentável à disposição atualmente.

Sete respondentes (E1, E2, E3, E7, E9, E10 e E13) concordaram totalmente que o reaproveitamento de resíduos da matéria prima usada na fabricação de pás de turbinas eólicas via reciclagem se constitui na maneira mais apropriada de descarte sustentável existente atualmente. E13 comentou que a afirmação fica mais significativa para materiais compostos. Dois respondentes (E4 e E12) concordaram parcialmente. E12 citou que não deveria ser a única. Três especialistas (E5, E6 e E8)

consideraram irrelevante a afirmação e dois (E11 e E14) discordaram parcialmente, com E14 comentando que o reaproveitamento em outras funções seja mais economicamente viável.

O volume previsto para os próximos 20 anos deve ser motivo de preocupação por parte dos diferentes setores da atividade de geração de eletricidade através da ação dos ventos.

Dez especialistas (E1, E2, E3, E5, E6, E7, E8, E9, E10 e E12) concordaram totalmente com a frase afirmando que os vários setores desta atividade terão preocupações em relação aos volumes de pás para descarte nos próximos 20 anos, enfatizando que haverá um volume importante neste período devendo existir empresas especializadas neste tipo de atividade e reforçando a afirmação de que em breve teremos empresas interessadas nestes resíduos. Dois respondentes (E11 e E13) concordaram parcialmente. E4 e E14 discordaram parcialmente.

As dificuldades de transporte destes componentes desde seu local de utilização original (parque eólico) até o ponto de reciclagem são considerações importantes para a tomada de decisão quanto a sua destinação.

Seis respondentes (E1, E3, E5, E7, E8 e E9) concordaram totalmente com a assertiva onde é citado que as dificuldades de transporte das pás de turbinas eólicas para reciclagem desde o local de sua instalação original (parque eólico), até o local de reciclagem são considerações importantes para a tomada de decisão quanto a sua destinação. Foi afirmando que o custo logístico pode inviabilizar a operação. E5 citou que os casos que ele presenciou de pás descartadas, foi utilizado o recorte do componente para redução do custo de transporte. Quatro especialistas (E4, E11, E12 e E13), concordaram parcialmente, com E12 comentando que embora difícil, deveria ser considerado algum tipo de separação, corte em partes menores ou outros processos para facilitar a logística. Dois respondentes (E6 e E10) consideraram a afirmação irrelevante. E10 afirmou que deve ser uma preocupação, mais hoje em dia já existem métodos relativamente baratos para o corte e trituração das pás que podem ser utilizados nos parques eólicos o que pode diminuir consideravelmente os custos de logística. Dois especialistas (E2 e E14) discordam totalmente. E14 citou a possibilidade da criação de estações de reciclagem móveis que se deslocam até o parque eólico.

As formas de utilização consideradas para reciclagem citadas no quadro referente a este quesito, devem ser objeto de atenção por parte de toda a cadeia de suprimentos.

Oito respondentes concordaram totalmente que as alternativas para reciclagem devem ser objeto de atenção de toda a cadeia de valor. E1 afirmou que todos os agentes devem se preocupar com as formas de reciclagem dos materiais residuais das pás. E7 disse “até que surjam empresas especializadas interessadas nestes processos”. Cinco respondentes (E2, E4, E8, E9 e E12) concordaram parcialmente. E12 comentou que o ideal seria que os fabricantes de pás, os fabricantes de turbinas eólicas e os fornecedores de matérias primas para pás pensassem, através de suas engenharias, em soluções de novos materiais e processos, se possível reutilizando os resíduos das pás em uso para a fabricação de novas pás. Um especialista (E14) discordou totalmente.

Um modelo de integração da cadeia de suprimentos deve ser implantado para viabilizar processos de reciclagem para material residual de pás de turbinas eólicas.

Oito especialistas (E1, E2, E3, E5, E7, E9, E10 e E13) pesquisados concordaram totalmente com a assertiva que deveria existir um modelo de integração da cadeia de valor com foco na reciclagem de resíduos. Somente E1 citou que “seria uma maneira de simplificar o processo e padronizar o custo envolvido”. Cinco respondentes (E4, E6, E8, E11 e E12) concordaram parcialmente com a assertiva. E12 comentou que o reuso deveria ser considerado em qualquer segmento de produção. Apenas um respondente (E14) discordou totalmente.

4.4.1 Discussões sobre Reciclagem

Das alternativas para destinação de pás de turbinas eólicas, a reciclagem é a que fornece maior número de possibilidades. Desde aditivos para concreto, passando por reforço em resinas poliméricas, bases de estradas, elementos de isolamento térmica e acústica, filamentos para impressão 3D entre outras, as possíveis aplicações se multiplicam.

Os estudos de alternativas são avaliados em relação aos processos necessários para acondicionamento do material a ser reciclado para cada aplicação determinada. Métodos mecânicos de acondicionamento para reciclagem consistem

em operações sucessivas de moagem para redução dos materiais em fragmentos com alguns milímetros de comprimento (BEAUSON *et al.*, 2016).

A reciclagem térmica, através da pirólise promove uma despolimerização a altas temperaturas em ausência de oxigênio, propiciando a recuperação das fibras do material composto (KALKANIS *et al.*, 2019).

Outra alternativa é a combustão em leito fluidizado. Existe também a possibilidade de processamento químico, que através de reagentes químicos que promove uma dissolução do material a ser reciclado para a recuperação das fibras de vidro ou de carbono (KALKANIS *et al.*, 2019). Para o caso da combustão em leito fluidizado, os gases gerados a partir desta queima, também podem ser utilizados como recuperação da energia contida. Estes gases contêm alto poder calorífico.

Quando se avalia a posição dos especialistas, existe um alinhamento muito grande entre o que se encontra nos artigos pesquisados e as opiniões dos respondentes, principalmente em relação a importância da reciclagem como alternativa de destinação dos materiais compostos.

Como está demonstrado nos artigos pesquisados, os processos estudados como sendo caracterizados de reciclagem, tomaram uma grande parte da atenção dos pesquisadores que levaram a frente estes estudos. Os resultados demonstram o interesse nestes processos que são apresentados como alternativas para o descarte dos resíduos de pás de turbinas eólicas. Os itens faltantes nestes estudos são: uma avaliação dos custos operacionais decorrentes dos processos estudados, o capital necessário para as instalações das usinas de processamento destes resíduos, o desenvolvimento técnico dos equipamentos necessários para a operação e a destinação final dos produtos resultantes destes processos de reciclagem entre outros. Para resumir, abre-se a possibilidade de desenvolvimento de um plano de negócios estruturado para cada alternativa apresentada, mostrando estudos de viabilidade técnica e comercial para sua efetiva implantação em escala industrial.

Existe também a necessidade de caracterização técnica destes resíduos, que não foi identificada nos artigos pesquisados. Esta caracterização envolve, entre outros a forma de acondicionamento dos resíduos gerados, se a granel ou não, qual a granulometria adequada para cada processo, qual sua composição química média, sua densidade, seu potencial energético, suas características térmicas, etc.

Desta maneira pode-se antever um espectro de oportunidades de desenvolvimento muito grande contido nesta alternativa de reciclagem.

4.5 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

O próximo grupo diz respeito a possibilidade de queima de resíduos para recuperação de energia. Esta alternativa está associada às dificuldades naturais do processo de combustão, uma vez que estamos tratando de materiais termofixos, que representam o grande conteúdo das matérias primas utilizadas na fabricação de pás de turbinas eólicas.

A queima de resíduos moídos e/ou triturados, peletizados ou não, pode ser considerado um destino viável para o material de pás de turbinas eólicas após seu final de vida útil.

A queima de resíduos moídos e/ou triturados para recuperação de energia é um destino viável para material das pás, dividiu as opiniões. Três respondentes (E2, E7 e E14) concordaram totalmente, citando também a pirólise como processo viável. Quatro especialistas (E4, E6, E8 e E12) concordaram parcialmente. E12 comentou que, em condições ideais as pás deveriam sair dos parques eólicos trituradas. Quatro respondentes (E1, E3, E5 e E11) consideraram a afirmação indiferente, levantando a questão da poluição gerada, assim como da necessidade de locais apropriados para esta queima. Três (E9, E10 e E13)) discordaram totalmente. E10 afirmou que uma pá é composta de 30% de resina e 70% de fibra de vidro, portanto o nível de resíduos em uma queima seria muito grande com baixa possibilidade de recuperação da energia contida na resina polimérica. E13 citou o custo da operação de queima que seria proibitivo, muito em função do controle necessário das emissões resultantes deste processo. O resultado do balanço energético seria negativo.

As sobras da queima dos resíduos de pás de turbinas eólicas após seu final de vida, (sobras sólidas e gasosas) se constituem em um entrave para a implantação deste processo.

Sete respondentes (E1, E2, E4, E5, E10, E11 e E12) concordaram totalmente com a afirmação que as sobras sólidas e gasosas da queima destes resíduos são um entrave para a implantação do processo de queima, citando que a queima, provavelmente, geraria gases tóxicos. Cinco respondentes (E6, E7, E8, E13 e E14) concordaram parcialmente, sem comentários relevantes. Um respondente (E3) considerou indiferente e um (E9) discordou parcialmente, sem também colocar nenhum comentário a respeito.

Existe a necessidade de desenvolvimento de todo o fluxo de processo para viabilizar a queima destes resíduos. Este aspecto representa um inibidor de iniciativas nesta direção.

A afirmação de que existe a necessidade de desenvolvimento de todo o fluxo de processos para viabilizar a queima destes resíduos, representa um inibidor de iniciativas nesta direção, teve a concordância total de seis especialistas (E3, E5, E6, E7, E10 e E13). Três respondentes (E1, E9 e E12) concordaram parcialmente com a assertiva citada, afirmando que esta solução teria que ser economicamente viável para quem fosse se utilizar dela. Quatro respondentes consideraram irrelevante a afirmação. E8 comentou que dependerá do ganho financeiro que este processo possa gerar, seja na geração de energia ou no pagamento por parte dos responsáveis pelo produto. Um respondente (E14) discordou parcialmente, citando que o maior inibidor da utilização da queima para recuperação de energia seja o elevado custo do processo.

Neste momento, o desenvolvimento de processos de queima de resíduos de pás não é prioridade, em função do grau de dificuldade associado a este processo.

Três especialistas (E10, E13 e E14) concordaram totalmente que o desenvolvimento do processo de queima não é uma prioridade neste momento. Quatro especialistas (E3, E7, E9 e E11) concordaram parcialmente, afirmando não ser uma prioridade, por conta do impacto ambiental gerado pela queima. Cinco respondentes (E4, E5, E6, E8 e E12) consideraram indiferente. Nesta opção E12 comentou que “em tese há de se pensar em todas as alternativas, acredito que no final a solução passará por diversos tipos de destinações para pás”. Dois especialistas (E1 e E2) discordaram parcialmente, citando que toda alternativa é prioritária na direção de um caminho sustentável e que outros tipos de resíduos são atualmente dispostos em aterros sanitários e os resíduos gerados pela queima poderiam receber o mesmo tratamento, aumentando a viabilidade desta alternativa.

A viabilidade econômica da implantação desta destinação indica para a direção da necessidade de maior maturidade desta forma de utilização dos resíduos.

Nove respondentes (E1, E3, E4, E5, E7, E9, E10, E13 e E14) concordaram totalmente que para o atingimento da viabilidade econômica da queima é necessária uma maior maturidade deste processo, com E1 afirmando que, apesar dos processos

de queima serem bastante desenvolvidos, resíduos de pás diferem dos materiais já utilizados, tais como bagaço de cana, gases de alto forno e aciaria, etc. E13 comentou que é necessário um maior desenvolvimento de processos na queima propriamente dita e na utilização dos resíduos. Três respondentes concordaram parcialmente. Cinco respondentes (E2, E6, E8, E11 e E12) consideraram indiferente, sem realizar nenhum comentário.

4.5.1 Discussão sobre Recuperação de Energia

Nos artigos pesquisados foi percebido falta de maturidade suficiente para a possibilidade de utilização de parte dos resíduos servirem de combustível. Isto fica demonstrado nos artigos que citam as possibilidades de depuração e separação destes resíduos a partir de seus componentes principais, mas não explora a possibilidade de destinação destes resíduos para atuarem como combustível em reatores, fornos e retortas com o aproveitamento da energia contida nestes. Na discussão de queima de resíduos de pás para recuperação de energia os especialistas pesquisados também consideraram, através de suas respostas e comentários, que a viabilidade técnica e comercial desta opção ainda não atingiu suficiente desenvolvimento e que existem outras alternativas mais convenientes a disposição no mercado. Esta posição se alinha as considerações encontradas nos artigos pesquisados.

Apesar do bom potencial para recuperação de energia, dentro do conceito de economia circular, os processos apresentados nos artigos ainda precisam ser desenvolvidos em escala industrial. Em se falando de queima para reaproveitamento energético apresentam-se alguns processos para tratamento dos resíduos tendo como resultado um dos componentes constituídos de material combustível com capacidade de queima para reaproveitamento de seu conteúdo energético.

Um deles é em base de decomposição térmica em leito fluidizado onde se queima a matriz de resina, gerando gás combustível e recupera-se as fibras de vidro, utilizadas como reforço estrutural (KALKANIS *et al.*, 2019). Outro é um processo de conversão com a extração de óleo combustível do material composto através de reator pressurizado a 300 bar e a uma temperatura entre 200-325°C. O resultado é um extrato oleoso com alto poder calorífico (40 MJ/kg), semelhante ao biodiesel (JENSEN & SKELTON, 2018). Pode-se também usar um processo de dissolução com ácido

nítrico para a dissolução do material composto original. Estes processos estão em fase de desenvolvimento em laboratório.

Como já comentado, estas alternativas não são novidade como processos existentes, mas não tem sua utilização em escala industrial desenvolvida. Faltam as definições características de aplicabilidade e viabilidade técnica em escala de produção, assim como sua apresentação como processos consagrados tecnicamente, com custos, resultados e matérias primas resultantes decorrentes das reações a que são submetidas, claramente definidas e com todos os parâmetros envolvidos configurados. Desta maneira, poderá despertar interesse comercial por parte da cadeia de valor, ou ainda desenvolver caminhos para o surgimento de empresas interessadas em investir neste campo.

4.6 DISPOSIÇÃO

Por último, temos as possibilidades de incineração e/ou a de deposição de resíduos em aterros sanitários. Para incineração as consequências decorrentes deste processo exigem a administração dos restos resultantes da queima. O descarte destes componentes em aterros sanitários, o que é considerada a prática mais comum atualmente.

A alternativa de incineração de resíduos de pás apresenta limitações quanto sua utilização em processos de descarte ambientalmente sustentável.

Oito especialistas (E1, E3, E5, E6, E10, E11, E13 e E14) concordaram totalmente que a incineração dos resíduos de pás apresenta limitações quanto a ser um processo ambientalmente sustentável. E1 afirmou que “a queima pode gerar resíduos tóxicos que deverão ser controlados”. Quatro especialistas (E4, E7, E8 e E9) concordaram parcialmente com a afirmação. Um respondente (E12) considerou a afirmação indiferente, comentando que, provavelmente, o custo envolvido no processo possa ser um problema. Somente E2 discordou parcialmente, sem emitir nenhum comentário.

A ausência de retorno financeiro direto positivo, como resultado do processo de incineração de resíduos de pás, inibe as iniciativas nesta direção.

Oito especialistas (E1, E5, E6, E7, E9, E10, E11 e E13) concordaram totalmente que a ausência de retorno financeiro positivo deve inibir as iniciativas de incineração de resíduos de pás. Um respondente (E12) concordou parcialmente.

Quatro especialistas (E3, E4, E8 e E14) consideraram indiferente. E8 afirmou que não necessariamente será inibidor desde que existam legislações com prazos escalonados para o cumprimento da regulamentação, facilitando a implementação de práticas sustentáveis. Um respondente (E2) discordou parcialmente, sem comentários.

O descarte de pás de turbinas eólicas em final de vida nos aterros sanitários demonstra-se como a alternativa mais viável para realidade atual.

Dois especialistas (E9 e E10) concordaram totalmente que o descarte de pás em aterros sanitários se constitui como a alternativa mais viável atualmente, afirmando que, infelizmente esta é a realidade, considerando que este é um ponto crítico em relação a uma energia “limpa”. Três respondentes (E3, E11 e E12) concordaram parcialmente, comentando que acreditam que seja melhor que incinerar, afirmando também que para alguns países esta prática já é inaceitável. Dois respondentes (E5 e E8) consideraram indiferente a afirmação, comentando que se apresenta como a alternativa mais fácil para realidade atual, mas não necessariamente a mais viável e com certeza, não a mais viável economicamente. Um respondente (E14) discordou parcialmente afirmando que seria a alternativa mais viável para o usuário do equipamento (ou o de menor custo), mas não necessariamente para a sociedade devido ao impacto ambiental que pode causar. Seis respondentes (E1, E2, E4, E6, E7 e E13) discordaram totalmente contestando este processo por afronta aos conceitos de sustentabilidade. Consideraram ainda que tornará inviável pela alta demanda prevista para os próximos anos.

Os custos associados a esta forma de destinação fazem parte de uma preocupação par o futuro, uma vez que não existe retorno financeiro positivo nesta prática.

Oito especialistas (E1, E2, E5, E6, E7, E9, E10 e E12) concordaram totalmente com a afirmação que diz que os custos associados ao descarte de pás de turbinas eólicas em final de vida em aterros sanitários fazem parte de uma preocupação para o futuro, uma vez que não existe retorno financeiro positivo nesta prática. E1 comentou que este ponto não é o mais importante, sendo, na sua opinião, a sustentabilidade como mais importante que os custos. E12 afirmou que a despeito dos custos, a prática de mercado continuará se utilizando dos aterros sanitários para o descarte das pás de turbinas eólicas em final de vida. Três respondentes

concordaram parcialmente, sem colocar comentários a respeito. Um (E11) considerou a afirmação irrelevante. Dois especialistas (E4 e E14) discordaram parcialmente.

Esta solução não é ambientalmente sustentável, gerando um passivo ambiental que deverá onerar nosso futuro nos aspectos econômicos, ambiental e social.

Oito respondentes (E1, E3, E5, E8, E9, E10, E13 e E14) concordaram totalmente que o descarte em aterro sanitário não é ambientalmente sustentável, gerando um passivo que deverá onerar o futuro com impactos econômicos, ambiental e social. O descarte de pás em aterros sanitários não é uma solução ambientalmente sustentável na opinião destes oito especialistas pesquisados. Três especialistas (E4, E6 e E7) concordaram parcialmente que esta alternativa de destinação de pás gera um passivo ambiental, com consequências para futuras gerações. Dois respondentes (E11 e E12) consideraram a afirmação irrelevante. A única opinião distinta foi expressa por E2, que argumentou que os materiais descartados são inertes e eventualmente poderiam servir para abrigo de vida selvagem, mesmo sendo descartados em seu local de origem.

4.6.1 Discussão sobre Disposição

Para disposição foram considerados dois processos que, por conta das circunstâncias atuais de desenvolvimento dos processos de destinação dos resíduos encontram-se entre os mais utilizados.

A incineração dos resíduos gera gases provenientes da combustão que não são aproveitados para recuperação da energia, e necessitam de tratamento adequado para serem lançados na atmosfera. Somente os resíduos sólidos (cinzas) são normalmente reaproveitados na indústria cimenteira como carga de forno por conter altas porcentagens de sílica e cálcio, dois componentes principais na fabricação de cimento (MARSH, 2017). A incineração é considerada como o caminho mais comum para a destinação de resíduos de pás (JENSEN & SKELTON, 2018).

De outra forma, o descarte em aterros sanitários é considerado a pior alternativa utilizada, por não atender aos requisitos básicos de uma operação ambientalmente sustentável. Inclusive é afetada por fatores locais, tais como legislações proibindo sua prática (JENSEN & SKELTON, 2018). Assim como nos artigos pesquisados os respondentes do questionário apresentado na pesquisa,

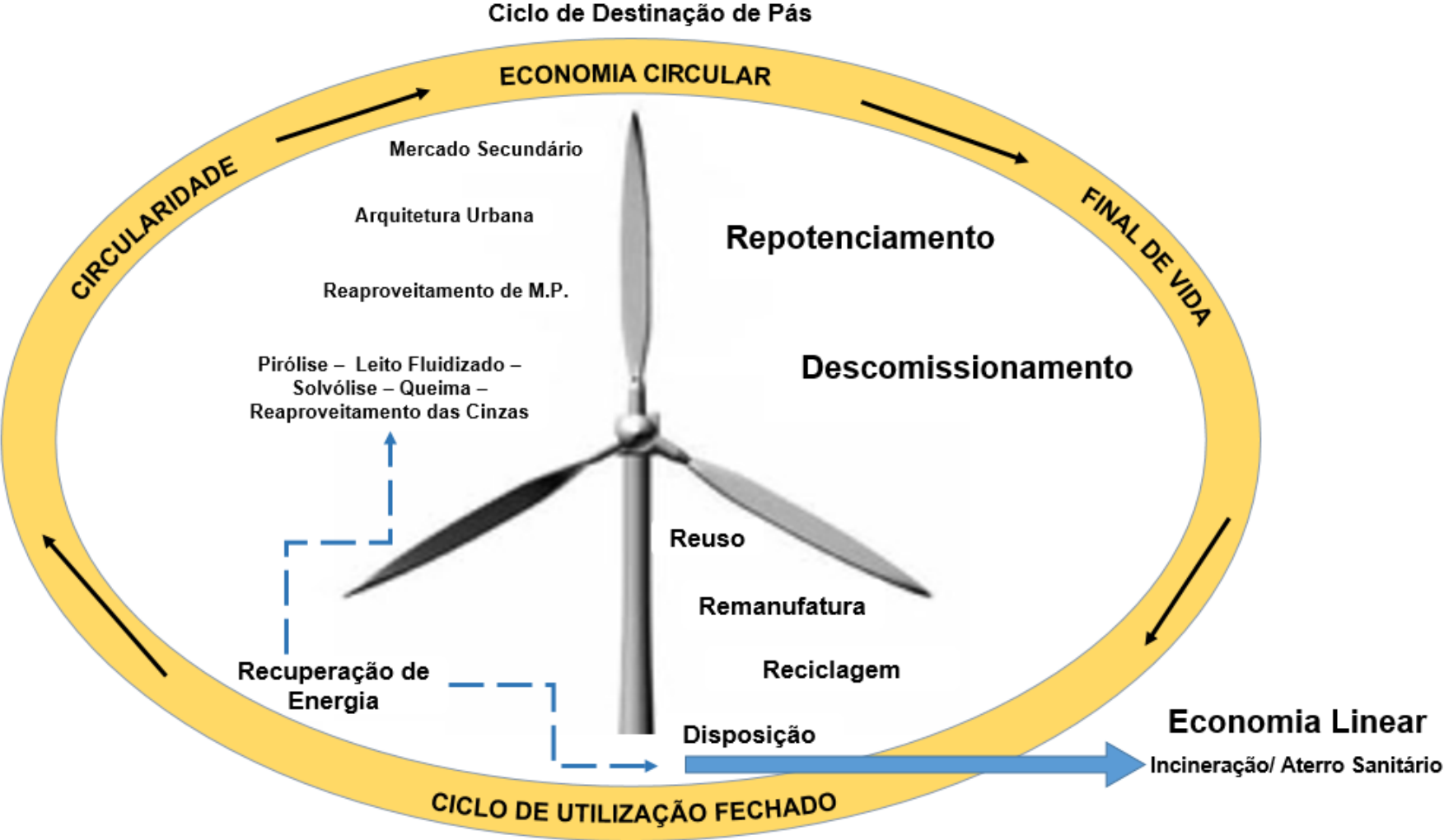
seguem alinhados quanto o descarte de resíduos de pás através de incineração ou de disposição em aterros sanitários. Apesar de terem considerado o processo de descarte em aterros sanitários inapropriado, os especialistas concordam com os artigos pesquisados, onde fica descrito que esta alternativa é a mais utilizada atualmente (YANG *et al.*, 2012).

Desta maneira, até os dias de hoje estas duas alternativas são as mais utilizadas pelos responsáveis para o descarte dos resíduos de pás de turbinas eólicas em final de vida. Esta condição só deverá tomar outro encaminhamento quando da implementação de legislações específicas que, ou penalizem descartes não sustentáveis, ou que venham a garantir incentivos e/ou vantagens financeiras que culminem em uma solução ambientalmente aceitável.

4.7 CICLO DE DESTINAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

A figura 19 apresenta as possibilidades de destinação para pás de turbinas eólicas em final de vida. A representação está marcada por três quadrantes: o terço superior direito, com as possibilidades de Repotenciamento ou Descomissionamento, o terço inferior apresentando as formas de destinação e o terço superior esquerdo com as alternativas para destinação dos resíduos.

Figura 20: Ciclo de Destinação de Resíduos de Pás de Turbinas Eólicas em Final de Vida



Fonte: O Autor

O terço superior direito, quando define a possibilidade de Repotenciamento, remete ao Reuso localizado no terço inferior, que, por sua vez, indica para o Mercado Secundário localizado no terço superior esquerdo da figura. Esta alternativa caracteriza uma operação que atende aos pressupostos de uma Economia Circular.

Para o caso de Descomissionamento, estão representadas quatro possibilidades, todas alocadas no terço inferior da figura. Remanufatura endereça para possibilidades de utilização das pás descomissionadas em instalações de Arquitetura Urbana como indicado no terço superior esquerdo. Para a Reciclagem, apresentada no terço inferior, o caminho natural é o de Reaproveitamento da Matéria Prima representada no terço superior esquerdo através dos processos de Pirólise, Queima ou Dissolução em Leito Fluidizado, Solvólise, Queima e Reaproveitamento das Cinzas. Da mesma forma que a possibilidade de Repotenciamento, com o Reuso em Mercados Secundários, estas duas alternativas também atendem aos requisitos de uma Economia Circular, atuando em um ciclo fechado de utilização de materiais.

Para a circunstância de Recuperação de Energia, a interpretação pode tomar dois caminhos distintos: o primeiro quando o resultado da Queima ou Dissolução Química em Leito Fluidizado, reaproveita os gases gerados na queima ou do extrato líquido resultante da dissolução, para aproveitamento do poder calorífico contido nestes resíduos. Além disso, faz-se também o encaminhamento dos resíduos sólidos (cinzas) utilizados como agregante em fornos cimenteiros. Nestas situações, esta alternativa pode ser considerada como atendendo aos requisitos de uma Economia Circular. Por outro lado, quando os resíduos são parcialmente aproveitados somente pela utilização dos gases gerados para utilização do seu poder calorífico ou ainda, só com o aproveitamento das cinzas resultantes da incineração ou da dissolução sem o aproveitamento energético, este processo assume uma característica de Economia Linear. Estas alternativas estão indicadas no terço inferior da figura com a indicação das setas para as duas situações.

Na última condição, para a alternativa de Disposição, as duas possibilidades (Incineração e Descarte em Aterro Sanitário) indicam na direção de um ciclo aberto de utilização de matéria prima, característica de uma Economia Linear.

5 CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que existe uma preocupação com a quantidade e a destinação de pás de turbinas eólicas após o término de sua vida em serviço. Esta preocupação está demonstrada tanto nos artigos pesquisados quanto nos resultados dos questionários submetidos aos especialistas que atuam no mercado de geração de energia eólica. Os resultados obtidos denotaram que esta pesquisa alcançou o seu objetivo, que foi consolidar as alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas após sua vida útil.

À partir das respostas e comentários recebidos dos especialistas consultados, ficou claro que, na prática as empresas atuantes neste segmento de mercado não tem disposição para investimento de tempo e dinheiro para o desenvolvimento de destinações sustentáveis para pás de turbinas eólicas em final de vida, sem a garantia de um retorno financeiro líquido positivo. As empresas participantes de mercados de geração de energia, assim como outras empresas privadas de capital intensivo, voltadas para equipamentos de infraestrutura, colocam seus objetivos em crescimento, resultados financeiros, avanços tecnológicos, domínio de mercado diante da concorrência, entre outros. Sem os devidos incentivos e/ou regulamentações, dificilmente tomaram atitudes independentes para atenuar impactos ambientais. Mormente na situação deste mercado em que as tecnologias dos equipamentos são muito recentes e os problemas técnicos e operacionais apresentam-se de forma avassaladora.

Para esta situação, na maioria dos casos, o comportamento destas empresas é a de espera para avaliação dos caminhos que devam ser seguidos, aguardando a imposição de diretivas definidas por órgãos oficiais ou ainda da implantação de algum incentivo financeiro que possa compensar os custos decorrentes de uma tomada de decisão na direção da sustentabilidade. Outra circunstância é a convicção, por parte do mercado, de que qualquer processo de descarte envolvendo reciclagem ou disposição ambientalmente segura tenha um resultado financeiro positivo. Portanto, o mercado espera o surgimento de alternativas que possam contemplar as expectativas deste segmento de negócios em relação aos requisitos necessários para um descarte ambientalmente sustentável. Enquanto estas circunstâncias não são resolvidas, a prática de descarte em aterros sanitários continua prevalecendo como comportamento geral.

Quando se foca na sociedade, a falta de definições para as alternativas de descarte de pás de turbinas eólicas em final de vida, que respeitem o meio ambiente, colocam em risco o equilíbrio ecológico, gerando focos de poluição atmosférica e do solo, através de seus resíduos gasosos e de restos de processos de descarte de materiais que compõem estes itens dos equipamentos de geração de energia. Nestas circunstâncias faz-se necessário a intervenção da sociedade civil, através de seus órgãos de controle, para geração e implementação de políticas que garantam um descarte ambientalmente seguro. É necessário o desenvolvimento de legislações pertinentes a este tema, de forma a regulamentar estas atividades de descarte para minimizar os riscos e possíveis prejuízos para a sociedade.

Como demonstram os resultados da pesquisa realizada com os especialistas atuantes em áreas correlatas às atividades inerentes à geração de energia através da força dos ventos, a preocupação com o descarte ambientalmente sustentável se apresenta como real, mas não aponta para nenhuma direção aceitável ambientalmente de forma pragmática. Não fica caracterizado como prioridade do setor de energia eólica.

Como contribuição desta pesquisa para a ciência, fica uma consolidação das alternativas de destinação de pás de turbinas eólicas em final de vida com a exploração destes assuntos em artigos sobre este tema, que estão sendo levados em conta por meios acadêmicos através de periódicos consagrados como fontes de pesquisas confiáveis e significativas. Estes assuntos estão condensados neste trabalho e representa uma visão ampla das possibilidades de descartes disponíveis e em desenvolvimento. Fica também um pequeno panorama do que o mercado considera pertinente a ser levado em conta com referência a uma atitude na direção de uma Economia Circular, objetivando um comportamento ambientalmente saudável.

Olhando para as empresas que atuam na atividade de geração de energia eólica fica a contribuição de esclarecer que, apesar da geração de energia ser absolutamente renovável, ela não pode ser considerada sustentável de per si. Portanto, existe a necessidade de desenvolvimento de destinações de resíduos gerados a partir do fluxo de valor da cadeia de produção que tenham como meta soluções ambientalmente aceitáveis. Da mesma forma apresenta as alternativas disponíveis em desenvolvimento para que possam ser avaliadas na direção de ganhos ambientais, sociais e econômicos.

Para a sociedade como um todo, este trabalho apresenta o que pensa a academia sobre este tema e alerta para a possibilidade de termos que enfrentar uma situação de acúmulo de resíduos que podem tornar-se um empecilho ambiental como muitos outros que já enfrentamos atualmente. Serve de alerta para as partes interessadas para que os membros destas comunidades possam se precaver com relação às consequências danosas de uma administração de resíduos deficiente que podem tornar-se uma fonte poluidora.

Esta pesquisa está limitada às destinações para as pás decorrentes de seu final de vida em serviço. Não considerou os resíduos gerados durante o processo de fabricação das pás, tais como materiais oriundos de rebarbação, normais no processo de laminação das fibras de vidro com agregante constituído por resinas poliméricas, assim como das peças rejeitadas durante seu processo de fabricação por defeitos ou acidentes. Não olhou para outras composições típicas de pás de turbinas eólicas como os componentes reforçados com fibra de carbono como elemento estrutural de reforço. Também não considerou a utilização de madeira balsa, comumente utilizada para estruturação do perfil da pá, e que certamente gera resíduos que devem ser considerados. Também não se preocupou com os elementos metálicos que compõe a pá, tais como os parafusos prisioneiros fabricados em aço laminado, para fixação da pá no rolamento de posicionamento, normalmente denominado como rolamento de *pitch*. Da mesma forma não considerou as instalações de fiação de cobre para controle e alívio de eventuais descargas elétricas atmosféricas, consideradas ocorrências comuns quando em serviço.

Por fim, existem diversas possibilidades de desenvolvimento de pesquisas relacionadas com o tema principal deste estudo. Como explorado ao longo deste trabalho as alternativas de destinação para pás nas condições descritas são muitas e suas aplicações necessitam do empenho de esforços em diversas direções. Como recomendação para pesquisas futuras, entre as muitas possíveis, poderia ser sugerido o desenvolvimento de um plano de negócios que viabilizasse a implantação de processos de descarte a partir da reciclagem de resíduos de pás tendo como início de processo a pá descartada colocada no chão, no parque eólico após sua desmontagem. Este plano deveria prever qual o processo de movimentação desta pá, qual o tipo de acondicionamento que deveria ser utilizado, transformando a pá em resíduo granulado ou em placas, como seria processado este acondicionamento e qual o destino a ser dado para este material. Qual a(s) matéria(s) prima final(is) que

se pretende produzir e qual a melhor forma de processamento a ser utilizado. Fazer um plano de negócios considerando custos operacionais, investimentos instalações necessárias e finalmente qual o mercado a ser atingido.

Tendo como base orientativa a pesquisa realizada com os especialistas atuantes no mercado de geração de energia elétrica, poderia ser desenvolvido um estudo com profissionais envolvidos em processos de descarte de materiais compostos com semelhança tecnológica com o material utilizado nas pás de turbinas eólicas (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer), para ouvir o posicionamento da parcela deste universo voltada para descarte de material residual. Este estudo poderia ser sobre a característica ambiental decorrente da disposição destes resíduos em aterros sanitários ou ainda descartados para serem processados por incineração. Estes dois processos não são considerados como pertencentes a uma formatação dentro dos conceitos de uma Economia Circular.

Da mesma forma, poderiam ser desenvolvidos estudos na direção do aumento de vida útil destes componentes, uma vez que não foi identificado nenhuma citação para o aumento da longevidade de pás de turbinas eólicas.

Estas possibilidades podem despertar o interesse de empreendimentos que venham a propiciar ganhos ambientais econômicos e sociais, minimizando os impactos nocivos de geração de resíduos não deterioráveis por processos naturais.

REFERÊNCIAS

ALBERS, H.; GREINER, S.; SEIFERT, H.; KÜHNE, U. Recycling of Wind Turbine Rotor Blades – fact or fiction. **DEWI Mag** v. 34, p. 32-41. 2009.

APARICIO, G.; ITURRALDE, T.; MASEDA, A. Conceptual structure and perspectives on entrepreneurship education research: A bibliometric Review. **European Research on Management and Business Economics**. País Basco, Espanha v. 25, p. 105-113. Abril, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2019.04.003>>.

ARIAS, F., 2016. Assessment of Present/Future Decommissioned Wind Blade Fiber-Reinforced Composite Material in the United States. **Independent Study Report**. Supervisor: Lawrence C. Bank. City College of New York.

AWEA – Wind Power Outlook. **American Wind Energy Association**. Disponível em: <http://www.awea.org/documents/reports/Outlook_2010.pdf>. 2010.

BAKKER, C.; WEVER, R.; TEOH, C.; DE CLERCQ, C. Designing cradler-to-cradler products: a reality to check. **International Journal of Sustainable Engineering**. V. 3, p.3 -8. 2010.

BARDIN, L. El Analisis de Contenido. Madrid. Ediciones Akal, Spain.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.07.009>>.

BEHRENS, A.; GILJUN, S.; KOVANDA, J.; NIZA, S. The Material Basis of the Global Economy: Worldwide Patterns of Natural Resource Extraction and their Implications for Sustainable Resource use policies. **Ecological Economics**. V. 64, p444-453. 2007.

BLOOMBERG GREEN. **Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills**. Fotos de Benjamin Rasmussen. Fevereiro 2020. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blade-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills?srnd=green>.

BOCKEN, N. M. P.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategy for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, Delft, Holanda, v. 33, n. 5, p. 308-320. Abril, 2016. Disponível em:< <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>>.

BOULDING, K. E. The economics of the coming Spaceship Earth. In: JARRETT, H. (Editor). Environmental Quality in a Growing Economy: **Essays from the Sixth RFF Forum**. John Hopkins University Press, Baltimore USA, p 3-14. 1966.

BP- BRITISH PETROLEUM STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. Jun. 2018, 67th ed., 2018. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>>.

BRAUNGART, M.; BONDESEN, P.; KÄLIN, A.; GLABER, B. **Specific Public Goods for Economic Development: With a Focus on Environment**. In: British Standards Institution (Editores). **Public Goods for Economic Development, Compendium of Background** papers, United Nations Industrial Development Organization, Viena, Austria, 2008.

CAINENG, Z.; QUN, Z.; GUOSHENG, Z.; BO, X. Energy Revolution: From a fossil era to a new era. **Natural Gas Industry**, Beijing, China, v. 3, p. 1-11, Jul. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001>>.

CHERRINGTON, R.; GOODSHIP, V.; MEREDITH, J.; WOOD, B. M.; COLES, S. R.; VUILLAUME, A. Producer Responsibility: defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. **Energy Policy**. Coventry, Reino Unido, Grã-Bretanha, v. 47, p. 13-21. Maio 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.076>>.

DE DECKER, K. A. World Made of Rotor Blades. **No Tech Magazine**. Fevereiro, 2015.

DUFLOU, J. R.; DENG, Y.; VAN ACKER, K.; DEWULF, W. Do Fiber-Reinforced Polymer Composites Provide Environmentally Benign Alternatives? A Life-Cycle-Assessment-Based Study. **MRS Bulletin - Materials for Sustainable Development**. Leuven, Bélgica, v. 37, p. 374-382. Abr. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1557/mrs.2012.33>>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the Circular Economy**, v. 1, p. 02 e 22. Cowes, Reino Unido Grã-Bretanha. 2013.

ETIPWIND – EUROPEAN TECHNOLOGY & INNOVATION PLATAFORM ON WIND ENERGY. **How Wind is Going Circular: Blade recycling**. ETIPWind Executive Committee. 2019. Disponível em: <https://etipwind.eu/publications/>.

EUROSTAT- EUROPEAN COMMISSION. **Glossary: Tonnes of Oil Equivalent (toe)**. 2005. Disponível em: < [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Tonnes_of_oil_equivalent_\(toe\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Tonnes_of_oil_equivalent_(toe))>.

FARIAS, L. M.; SELLITO, M. A. Uso da Energia ao Longo da História: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n.17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

FIGGE, F.; THORPE, A. S.; GIVRY, P.; CANNING, L.; FRANKLIN-JOHNSON E. Longevity and Circularity as Indicator of Eco- Efficient Resource Use in the Circular Economy. **Ecological Economics**. Marseille, França, v. 150, p. 297-306. Maio, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.030>>.

FLIZIKOWSKI, J.; BIELINSKI, K. Technology and Energy Source Monitoring: control, efficiency and optimization. **IGI Global**. ISBN 9781466626645. 2013.

FRANKLIN-JOHNSON E.; FIGGE, F.; CANNING, L. Resource duration as a managerial indicator for circular economy performance. *Journal of Cleaner Production* v. 133, p. 589-598. Marseille, França. 2016.

GALLAGER, J.; BISWAJIT, B.; BROWNE, M.; KENNA, A.; MCCORMACK, S.; PILLA, F.; STYLES, D. Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. **Journal of Industrial Ecology**. Dublin, Irlanda, v. 23 n^o 1, p. 133-140. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/jiec.12703>>.

GREEN, D. I. Pain-cost and Opportunity-cost. **The Quartely Journal of Economics**. Londres, UK. v. 8, n. 2, p. 218-229, Janeiro, 1894. Disponível em: <<http://www.jstor.com/stable/1883711>>.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Annual Report Market Update 2014**. Disponível em: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf>.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Annual Report Market Update 2018**. Disponível em: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2018_Report_LR.pdf>.

HARDEE, C. Improving wind blade manufacturability. **Wind Systems**, p. 26-30.

HOPEWELL, J.; DVORACK R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**. V. 364, p. 2115-2126. 2009.

HUNT, H.; WANNER, C.; HENSLEY, J. U.S. **Wind Industry Annual Market Report – Year Ending 2015**. American Wind Energy Association (AWEA). Washington DC, USA, 2016.

IACMI – 2016. Preliminary Technology Roadmap: Phse 1. **Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovations**.

JENSEN, J. P. Evaluating the Environmental Impacts of Recycling Wind Turbines. **Wind Energy**, Aalborg, Dinamarca, v. 22, p. 316-326. Setembro, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/we.2287>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/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.

KALKANIS, K.; PSOMOPOULOS, C. S.; KAMINARIS, S.; IOANNIDIS, P.; PACHOS, P. Wind turbine blade composite materials – End of life treatment Methods. **Energy Procedia**, Athens, Greece, v. 157, p. 1136-1143, Setembro, 2018. Disponível em: <<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>>.

LAI, J.; HARJATI, A.; MCGINNIS, L.; ZHOU, C.; GULDBERG, T. An Economic and Environmental Framework for Analyzing Globally Sourced Auto Parts Packing System. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, p. 1632-1642. 2008.

LARSEN, K. Recycling Wind Turbine Blades. **Renewable Energy Focus**. v. 9, n. 7, p. 70-73. 2009.

LEFREUVRE, A.; GARNIER, S.; JACQUEMIN, L.; PILLAIN, B.; SONNEMANN, G. Anticipating in-use Stocks of Carbon Fibre Reinforced Polymers and Related Waste Generated by the Wind Power Sector until 2050. **Resources, Conservation & Recycling**, Talence, France, v. 141, p. 30-39, Outubro, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.008>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>>.

LIEDER, M.; RACHID, A. Toward circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, Estocolmo, Suécia, v. 115, p. 36-51, Dezembro, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>>.

LEONTIF, W. The Economy as a Circular Flow. **Structural Change and Economic Dynamics**, Londres, UK, v. 2, n. 1, p. 181-212.

LIU, P.; BARLOW, Y. Wind Turbine Blade Waste in 2050. **Waste Management**, Cambridge, Reino Unido Grã-Bretanha, v. 62, p. 229-240, Fevereiro 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>>.

LONDON ENVIRONMENTAL INVESTMENT FORUM, 2012, Londres, Reino Unido Grã-Bretanha. **Remanufacturing and Recommerce**. Mar, 2012. Disponível em: <<http://www.mountain-cleantech.ch/pdf/THE-LEIF-BRIEF-Remanufacturing-and-Recommerce-March-2012.pdf>>.

MALTHUS, T. R. An Essay on the Principle of Population. 1798.

MANTELLI, A.; LEVI, M.; TURRI, S.; SURIANO, R. Remanufacturing of End-of-Life Glass-fiber Reinforced Composites via UV-assisted 3D Printing. **Rapid Prototyping Journal**, Milão, Itália. Julho, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2019-0011>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.10.002>>.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. **North Point Press**, New York, NY. 2002.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, G.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. W. The Limits to Growth. **Universal Books**, New York. 1972.

NAKANO, D. N. **Métodos de Pesquisa Adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. In: MIGUEL, P. A. C. (Coord.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.242>>.

OLIVEIRA NETO, G. C.; PINTO, L. F. R.; AMORIM, M. P. C.; GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. A Framework of Actions for Strong Sustainability. **Journal of Cleaner Production**. São Paulo, Brasil, v. 196, p. 1629-1643, Junho, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.067>>.

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, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022>>.

PAUL, J.; CRIADO, A. R. The Art of Writing Literature Review: What do we know and what do we need to know? **International Business Review**. San Juan, Porto Rico, USA, v. 29, p. 101-107. Junho 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.busrev.2020.101717>>.

RAHIMIZADEH, A.; KALMAN, J.; FAYAZBAKSH, K.; LESSARD, L. Recycling of Fiberglass Wind Turbine Blades into Reinforced Filaments for Use in Additive Manufacturing. **Composites Part B**. Montreal, Canadá, v.175, p. 101-107. Julho, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107101>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>>.

SUSCHEM – EUROPEAN TECHNOLOGY PLATAFORM FOR SUSTAINABLE CHEMISTRY. **Polymer Composites Circularity – White Paper**. SusChen Material Working Group. 2018.

STAHEL, W. R. **The Utilization Focused Service Economy: Resource efficiency**. In: ALLENBY, B. R., RICHARDS, D.J. (Editores). **The Greening of Industrial Ecosystems**. National Academy Press, Washington D.C., p. 178-190. 1994.

STEINHILPER, R. Remanufacturing: The Ultimate Form of Recycling. 1998.

STRASSER, S. Waste and Want: a Social History of Trash. **Henry Holt**. 2000

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.039>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME: **Global Environmental Outlook 5: Environment for the Future We Want**. UNEP, Nairobi. 2012.

VERT, M.; DOI, Y.; HELLWICH, K.; HESS, M.; HODGE, P.; KUBISA, P., RINAUDO, M.; SCHUÉ, F. Terminology for biorelated polymers and application. **Pure applied Chemistry**. V. 84, p. 377-410. 2012.

VIEIRA, K. M.; DALMORO, M. XXXVI Encontro da ANPAD – Associação dos Programas de Pós-Graduação em Administração. Rio de Janeiro 6 a 10 de Setembro de 2008. Dilemas na Construção de Escalas Tipo Liekert: o Número de Itens e a Disposição Influenciam no Resultado? 2008.

WINDEUROPE – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Accelerating Wind Turbine Blade Circularity**. WindEurope, CEFIC – European Chemical Industry Council, EuCIA – European Composites Industry Association. Maio 2020. Disponível em: <https://wbcsd.org>.

WWEA - WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. **World Wind Energy Report 2010**. Alemanha. 2011.

WU, M. S.; JIN, B. C.; LI, X.; NUTT, S. A Recyclable Epoxy for Composite Wind Turbine Blade. **Advance Manufacturing: Polymer & Composites Science**. Los Angeles, CA, USA, v. 5:3, p. 114-127, Julho 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/20550340.2019.1639967>>.

YANG, Y.; BOOM, R.; IRION, B.; VAN HEERDEN, D.J.; KUIPER, P.; de WIT, H. Recycling of Composite Materials. **Chemical Engineering and Processing: Process Identification**. Delft, Holanda, v. 51, p. 53-68, Outubro 2011. Disponível em: <<https://doi.org/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, 2017. Disponível em: < <https://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.005>>.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organization Research Methods**, v. 18, n.3, p. 429-472. 2015.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO AOS ESPECIALISTAS PARA “PESQUISA SOBRE AS ALTERNATIVAS DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS ASSOCIADAS AO FINAL DE VIDA ÚTIL DESTES COMPONENTES”

Pesquisa sobre as alternativas de utilização de resíduos de pás de turbinas eólicas associadas ao final de vida útil destes componentes

O objetivo desta pesquisa é estudar o universo de alternativas disponíveis para reaproveitamento das pás de turbinas eólicas ao atingirem seu final de vida útil.

Esta é uma pesquisa acadêmica para Mestrado em Engenharia de Produção.

Fica garantido o sigilo da origem das informações recebidas assim como dos dados pessoais e profissionais dos respondentes.

Como base teórica para este levantamento, considera-se como término de vida útil de uma pá, sua obsolescência técnica, seu colapso por acidentes naturais ou de operação, sua deterioração mecânica por fadiga ou sua degenerescência por razão de seu tempo de instalação, com ou sem uso.

Todos os motivos citados devem caracterizar a inviabilidade da continuidade da utilização da pá, para o qual ela foi originalmente designada.

Não fazem parte desta pesquisa, resíduos originados de restos de processos de manufatura, componentes rejeitados durante este processo por defeitos de origem, componentes danificados durante o transporte para montagem final no parque eólico ou mesmo acidentes ocorridos durante sua montagem e que caracterizem o descarte da pá em questão.

Nesta pesquisa, subdividiu-se os temas em cinco diferentes grupos, denominados “Destinos”, a saber: Reuso/Redistribuição; Remanufatura; Reciclagem; Recuperação de Energia; Incineração/Aterro Sanitário. A estes “Destinos” estão associados as “Formas de Utilização”.

Com base nos possíveis “Destinos” associadas à “Forma de Utilização” mostrados no quadro a seguir, esta pesquisa pretende mapear o que está sendo feito atualmente e em quais direções as destinações das pás possam seguir nos próximos anos.

* Required

Destinação de Resíduos

Quadro Resumo da Destinação de Resíduos de Pás de Turbinas Eólicas	
Destino	Forma de Utilização
Reuso/Redistribuição	Reutilização em Turbinas Menores
Remanufatura	Utilização como Mobiliário Urbano
	Pontes Tanques para Peixes
Reciclagem	Aditivo para Indústria Cimenteira
	Reforço de Resinas Poliméricas
	Base de Estradas
	Fabricação de Asfalto
	Isolação Térmica e Acústica
	Fabricação de Madeira Artificial
	Filamentos para Impressão 3D
Recuperação de Energia	Dormentes para Ferrovias
	Adição em Concreto
	Utilização em Instalações de Arquitetura
Incineração/Aterro Sanitário	Material Industrial para enchimento
	Queima para Recuperação de Energia
Incineração/Aterro Sanitário	Incineração
	Descarte em Aterro Sanitário

Adaptado a partir de Ellen MacArthur Foundation, 2013 Towards the Circular Economy, vol. 1 Terminology 24-25

Quantidade de Resíduos

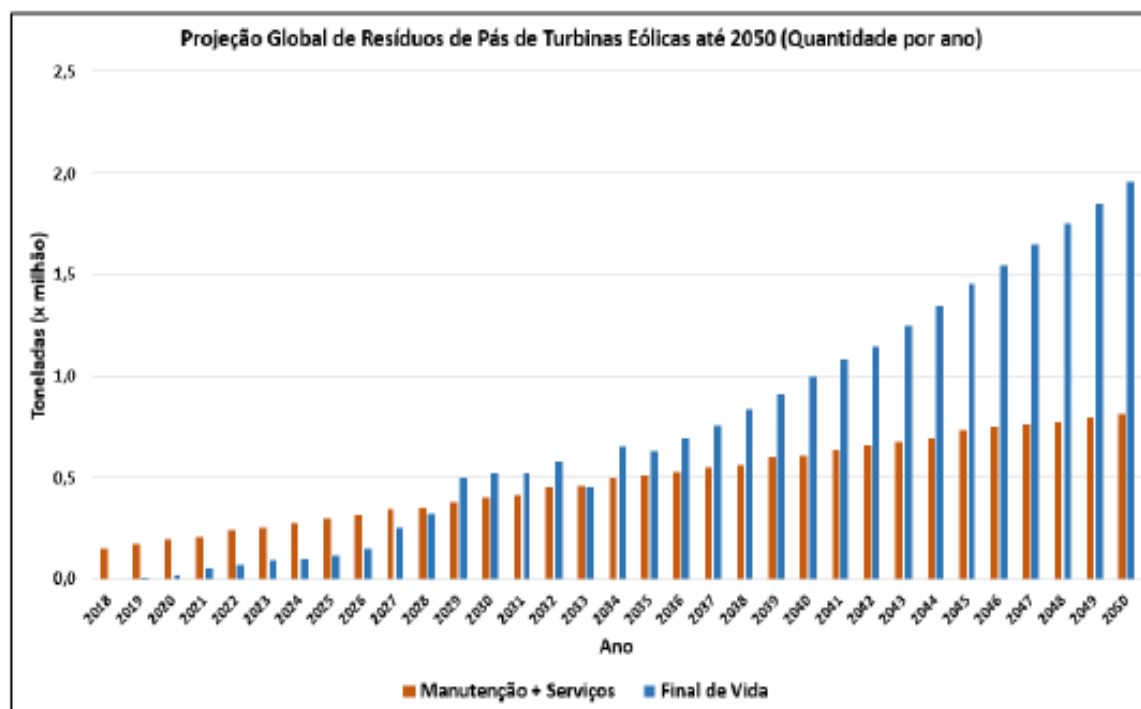
Como indicadores de quantidade de resíduos a ser processada, toma-se como base, artigos listados em base de dados reconhecidos.

Não é interesse desta pesquisa discutir a acuidade dos dados apresentados nem das quantidades em peso dos resíduos de pás a serem gerados pelo final da sua vida útil, nas próximas décadas.

Somente como referência, temos as curvas de crescimento da quantidade de resíduos em peso gerados a partir de duas situações distintas: Resíduos de Manufatura + Serviços e Resíduos Decorrentes do Final da Vida Útil destes Componentes.

Estas curvas cobrem o período entre 2018 até 2050, e são baseadas nas projeções de crescimento de geração de energia elétrica, a partir de turbinas eólicas (representadas em MW) e na expectativa de vida útil das pás, consideradas em 20 anos de uso.

Projeção Global De Resíduos



Fonte: Liu, P, Barlow, C.Y. 2017. Wind Turbine Blade Waste in 2050. Waste Management 62 (2017) 229-240

Dados profissionais e da empresa pesquisada

1. Segmento de atuação da empresa

2. Tempo que ocupa o cargo (em anos)

3. Formação escolar

4. Porte da empresa (Número de funcionários)

Mark only one oval.

- Até 10 funcionários
- De 10 a 100 funcionários
- De 100 a 1000 funcionários
- Acima de 1000 funcionários
- Outros

5. Cargo que ocupa na Empresa

6. Tempo na Função Profissional Corporativa

Temas,
Questões
e
Afirmações

A participação nesta pesquisa é realizada através da escolha de uma opção que melhor qualifica sua opinião em relação a afirmação descrita. Não existe nenhuma afirmação absolutamente correta e o objetivo principal é colher a opinião dos participantes sobre os temas colocados. Escolha somente uma das alternativas e que deverá ser aquela que melhor represente sua opinião sobre o assunto abordado. Esta pesquisa contém 35 afirmações, subdivididas em 6 grupos distintos conforme descrito na introdução.

Sinta-se à vontade para fazer quaisquer comentários pertinentes aos assuntos abordados.

Os resultados deverão ser aplicados conforme a distribuição a seguir:

- Discordo totalmente - (1)
- Discordo parcialmente - (2)
- Não concordo, nem discordo - (3)
- Concordo parcialmente - (4)
- Concordo totalmente - (5)

Aspectos
gerais

Neste primeiro grupo são feitas 10 assertivas que dizem respeito às condições atuais em que se encontram as atividades de implantação, operação e manutenção de parques eólicos. As assertivas focam, principalmente, aspectos de sustentabilidade em relação as atividades de tratamento dos resíduos de pás de turbinas eólicas após seu término de vida útil.

7. 4.1 - O crescimento da taxa de implantação de parques eólicos em todo o mundo é uma realidade incontestável. Iremos experimentar um aumento exponencial destas instalações nas próximas décadas. *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

8. Comentários

9. 4.2 - As instalações de turbinas eólicas tem sua vida útil limitada por condições de sua utilização. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

10. Comentários

11. 4.3 - Entre os componentes principais de uma turbina eólica (Torre, Nacelle, Hub e Pás), as Pás e as Torres representam a maior dificuldade para sua disposição ao final de sua vida útil. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

12. Comentários

13. 4.4 - Os materiais residuais das pás representam uma preocupação para os operadores do sistema de geração de energia para os próximos anos (entre 05 e 10 anos). *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

14. Comentários

15. 4.5 - Esta preocupação, deve ser compartilhada com os fabricantes das turbinas, assim como, com os fornecedores das pás. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

16. Comentários

17. 4.6 - As atividades de descarte sustentável dos materiais residuais das pás devem fornecer um resultado financeiro positivo. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

18. Comentários

19. 4.7 - Governo e Entidades Governamentais devem desenvolver e implementar legislação específica para direcionar adequadamente o descarte destes materiais residuais com o objetivo da proteção ambiental. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

20. Comentários

21. 4.8 - O descarte dos materiais residuais das pás deve considerar, obrigatoriamente, um tratamento ambientalmente seguro. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

22. Comentários

23. 4.9 - Deve haver incentivos inclusos na legislação, para que as atitudes de descarte ambientalmente seguro e sustentável sejam devidamente adotadas. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

24. Comentários

25. 4.10 - As atitudes citadas nas duas afirmações anteriores deverão ser desenvolvidas e implementadas nos próximos 5 anos (2020 a 2025), partindo ou não das autoridades governamentais estabelecidas. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5		
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

26. Comentários

Reuso/Redistribuição

Neste grupo são consideradas como destino, a reutilização das pás em equipamentos de menor potência, ou ainda redirecionadas para instalações com solicitações mecânicas menores às daquelas para a qual estas pás tenham sido dimensionadas, desde que caracterizado sua sanidade através de inspeção apropriada e de que seja assegurada a confiabilidade de performance nesta nova condição de trabalho.

27. 5.1 - A reutilização de pás de turbinas eólicas através de seu redirecionamento para equipamentos de menor potência é uma alternativa tecnicamente viável e em uso atualmente. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5		
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

28. Comentários

29. 5.2 - Os custos de redirecionamento de pás de turbinas eólicas para equipamentos de menor potência nominal tendem a um equilíbrio financeiro positivo. *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

30. Comentários

31. 5.3 - A determinação da vida útil de uma pá redirecionada para sua utilização em equipamentos de menor potência nominal é uma limitação para sua utilização. *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

32. Comentários

33. 5.4 - O campo de aplicação para o caso de redirecionamento de pás de turbinas eólicas em equipamentos de menor potência é muito menor que a oferta destes componentes. *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

34. Comentários

35. 5.5 - As dificuldades logísticas para um redirecionamento de pás na direção de sua utilização em turbinas de menor capacidade dificultam sobremaneira sua operacionalização. *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

36. Comentários

Remanufatura

Para este terceiro grupo, deve ser considerada a realocação das pás para outros usos, diferentes daqueles para as quais foram designadas, considerando-se sempre o término da vida útil destas. Faz-se isto através de diferentes cadeias de valor, tais como equipamentos urbanos, reservatórios para peixes, pontes para acesso de pedestres, etc.

37. 6.1 - A utilização de pás de turbinas eólicas, após seu final de vida útil, para aplicações em diferentes cadeias de valor deve ser estimulada. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Concordo Totalmente

38. Comentários

39. 6.2 - As alternativas de utilização de pás de turbinas eólicas após seu final de vida útil devem fazer parte integrante da cadeia de suprimento destes componentes. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Concordo Totalmente

40. Comentários

41. 6.3 - A responsabilidade da implementação das opções disponíveis no mercado de utilização de pás de turbinas eólicas após seu final de vida útil deve ser do usuário final (Operador do Parque Eólico). *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

42. Comentários

43. 6.4 - Os custos associados à necessária adaptação das pás a serem utilizadas em aplicações consideradas como remanufatura é um elemento dificultador para o desenvolvimento destas aplicações. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

44. Comentários

45. 6.5 - A aceitação destas aplicações desenvolvidas devem enfrentar diversas resistências por parte de novos usuários, dificultando desta maneira sua aplicabilidade. *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo Totalmente

46. Comentários

Reciclagem

Neste grupo avalia-se a possibilidade da reciclagem dos resíduos, onde fica evidente a necessidade de um acondicionamento adequado para atender aos requisitos dos processos a que o material deva ser submetido. Este acondicionamento, via de regra, se constitui em processos mecânicos e/ou químicos para possibilitar o transporte e manipulação em sistemas de reaproveitamento do material oriundo do descarte das pás. Entre os processos utilizados destacam-se, operações de tritura, moagem, peletização, ou tratamentos químicos, como a pirólise, que propiciam um acondicionamento necessário para a operacionalização da reciclagem nas suas mais diversas formas de utilização.

47. 7.1 – O reaproveitamento de resíduos da matéria prima usada na fabricação de pás de turbinas eólicas via reciclagem, se constitui na maneira mais apropriada de descarte sustentável à disposição atualmente. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

48. Comentários

49. 7.2 – O volume previsto para os próximos 20 anos deve ser motivo de preocupação por parte dos diferentes setores da atividade de geração de eletricidade através da ação dos ventos. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

50. Comentários

51. 7.3 – As dificuldades de transporte destes componentes desde seu local de utilização original (parque eólico) até o ponto de reciclagem são considerações importantes para a tomada de decisão quanto a sua destinação. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

52. Comentários

53. 7.4 – As formas de utilização consideradas para reciclagem citadas no quadro referente a este quesito, devem ser objeto de atenção por parte de toda a cadeia de suprimentos. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

54. Comentários

55. 7.5 – Um modelo de integração da cadeia de suprimentos deve ser implantado para viabilizar processos de reciclagem para material residual de pás de turbinas eólicas. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

56. Comentários

Recuperação de Energia

Na sequência, existe a possibilidade da queima de resíduos para recuperação de energia. Esta alternativa está associada às dificuldades naturais do processo de combustão, uma vez que estamos tratando de materiais termofixos, que representa o grande conteúdo das matérias primas utilizadas. Nesta possibilidade, os resíduos da queima passam a ter uma importância suplementar, exigindo uma definição para uma destinação ambientalmente sustentável destes resíduos, dentro dos conceitos de uma Economia Circular.

57. 8.1 – A queima de resíduos moídos e/ou triturados, peletizados ou não, pode ser considerado um destino viável para o material de pás de turbinas eólicas após seu final de vida útil. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

58. Comentários

59. 8.2 – As sobras da queima dos resíduos de pás de turbinas eólicas após seu final de vida (sobras sólidas e gasosas) se constituem em um entrave para a implantação deste processo. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

60. Comentários

61. 8.3 – Existe a necessidade de desenvolvimento de todo o fluxo de processos para viabilizar a queima destes resíduos. Este aspecto representa um inibidor de iniciativas nesta direção. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

62. Comentários

63. 8.4 – Neste momento, o desenvolvimento de processos de queima de resíduos de pás não é prioridade, em função do grau de dificuldade associado a este processo. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

64. Comentários

65. 8.5 – A viabilidade econômica da implantação desta destinação indica para a direção da necessidade de maior maturidade desta forma de utilização dos resíduos. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

66. Comentários

Incineração/Aterro
Sanitário

Por último temos as possibilidades de incineração pura e simples, com suas consequências vindas da administração dos resíduos resultantes da queima, semelhantes às do item anterior. Por outro lado, existe também o descarte destes componentes em aterros sanitários, o que nos parece a prática usual mais comum atualmente. Esta prática afronta os conceitos de sustentabilidade preconizados por diretrizes da Economia Circular e não se sabe por quanto tempo ainda será permitido pelas legislações em vigor.

67. 9.1 – A alternativa de incineração de resíduos de pás apresenta limitações quanto sua utilização em processos de descarte ambientalmente sustentável. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

68. Comentários

69. 9.2 – A ausência de retorno financeiro direto positivo, como resultado do processo de incineração de resíduos de pás, inibe as iniciativas nesta direção. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

70. Comentários

71. 9.3 – O descarte de pás de turbinas eólicas em final de vida nos aterros sanitários demonstra-se como a alternativa mais viável para a realidade atual. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

72. Comentários

73. 9.4 – Os custos associados a esta forma de destinação fazem parte de uma preocupação para o futuro, uma vez que não existe retorno financeiro positivo nesta prática. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

74. Comentários

75. 9.5 – Esta solução não é ambientalmente sustentável, gerando um passivo ambiental que deverá onerar nosso futuro nos aspectos econômico, ambiental e social. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

76. Comentários

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms