

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE: UMA REVISÃO DA LITERATURA¹

MATEUS SANT'ANNA DE SOUSA GOMES², VIRGÍNIA APARECIDA DA SILVA
MORIS³, ANDRÉA OLIVEIRA NUNES²

1 Apresentado no Congresso de Energias Renováveis da UFSCar: 23 a 26 de maio de 2017 – Sorocaba-SP, Brasil

2 Universidade Federal de São Carlos, Engenharia de Produção, Sorocaba, Brasil.

E-mail: mateussg@msn.com, andreaoliveira_n@hotmail.com

3 Professor Dr. Universidade Federal de São Carlos, Engenharia de Produção, Sorocaba, Brasil.

E-mail: vimoris@ufscar.br

RESUMO

O fornecimento de produtos e serviços à sociedade contribui para um vasto número de impactos ambientais. Os impactos ambientais incluem emissões de poluentes no meio ambiente e o consumo de recursos naturais, assim como outros impactos, como a ocupação de terra urbana, etc. A avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma técnica para avaliar os impactos ambientais de um determinado produto ou sistema. O objetivo deste artigo é realizar uma revisão sistemática da existente literatura de ACV da energia eólica *offshore*. A triagem de aproximadamente 430 artigos de avaliação de impactos ambientais da energia eólica *offshore*, resultou em 18 artigos sobre avaliação de ciclo de vida. O artigo apresenta uma visão geral dos principais parâmetros considerados nestes estudos. Este estudo concluiu que o grande número de estimativas de ACV para energia eólica *onshore*, não se reflete na energia eólica

offshore. Entretanto, em comparação com estudos realizados, pode-se notar que os parâmetros e resultados utilizados pela indústria *offshore*, são muito similares aos da indústria *onshore*.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida, Energia eólica offshore, Revisão bibliométrica sistemática.

OFFSHORE WIND ENERGY LIFE CYCLE ASSESSMENT: A REVIEW OF LITERATURE

ABSTRACT

Providing society with products and services contributes to a large number of environmental impacts. Environmental impacts include emissions of pollutants into the environment and the consumption of natural resources, as well as other impacts, such as urban land use, etc. Life cycle assessment (LCA) is a technique for assessing the environmental impacts of a particular product or system. The objective of this paper is to conduct a systematic review of the existing LCA literature of offshore wind energy. The screening of approximately 430 articles that assesses the environmental impacts of offshore wind energy resulted in 18 articles. The article presents an overview of the main parameters considered in these studies. This study concludes that the large number of LCA estimates for onshore wind energy is not reflected in the offshore wind energy. However, in comparison with previous studies, it can be noted that the parameters and results used by the offshore industry are very similar to those of the onshore industry.

Keywords: Life cycle assessment, Offshore wind energy, Systematic bibliometric review.

INTRODUÇÃO

O rápido crescimento da demanda energética global e a busca por alternativas no fornecimento energético com baixa emissão de gases poluentes estão impulsionando a busca por fontes de energia renováveis. Devido ao potencial para redução de gases causadores do efeito estufa, o interesse por fontes de energia renováveis tem crescido nos últimos anos (DOLAN; HEATH, 2012). Fontes consideradas limpas e com abundantes quantidades de recursos, vem recebendo grande atenção pelo mundo. Dentre essas fontes, destaca-se a energia eólica, que nos últimos anos obteve taxas de crescimento sem precedentes na história

(SUN; HUANG; WU, 2012). De acordo com Global Wind Energy Council (GWEC) (2016), entre 2011 e 2015 a capacidade mundial instalada de energia eólica aumentou de 238 GW para 433 GW, isso representou um aumento de aproximadamente 82%.

A energia eólica pode ser dividida em basicamente dois tipos de aplicação, *onshore* e *offshore*, a *onshore* é a conversão do movimento dos ventos terrestres em energia elétrica e a *offshore* é o mesmo método, porém aplicado para os ventos marítimos. A energia eólica iniciou-se no segmento *onshore* e atualmente apresenta um movimento de transição para o segmento *offshore* (MARKARD; PETERSEN, 2009), vantagens como a disponibilidade de espaço, ventos mais fortes e constantes, baixo impacto visual e sonoro (ESTEBAN et al., 2011), impulsionam a exploração desta fonte energética. Devido a estas atrativas vantagens do segmento *offshore*, espera-se que nos próximos anos a energia eólica *offshore* torne-se a maior fonte de energia elétrica no mundo (PERVEEN; KISHOR; MOHANTY, 2014).

Embora a energia eólica seja amplamente conhecida como uma fonte de energia limpa, na perspectiva de uma análise de ciclo de vida ela apresenta questões prejudiciais ao meio ambiente, como a emissões de gases poluentes (ARVESEN; HERTWICH, 2012). De acordo com Dolan e Heath (2012), a emissão de gases causadores do efeito estufa por parques eólicos é proveniente das etapas de fabricação dos equipamentos, transporte, instalação dos parques, manutenção e desativação. Estudos empregados sobre avaliação dos impactos da energia eólica demonstram que a energia eólica *offshore* emite uma quantidade menor de gases causadores do efeito estufa do que a energia eólica *onshore* (AMPONSAH et al., 2014; NOORI; KUCUKVAR; TATARI, 2015), de acordo com Noori, Kucukvar & Tatari (2015), conforme a turbina e o tempo do vida de comparação dos parques, as emissões *offshore* podem ser até 50% menores que as *onshore*. Entretanto, o número de estudos na área de ACV para energia eólica *offshore* ainda é muito pequeno (AMPONSAH et al., 2014; RAADAL et al., 2014), dentre as principais contribuições pode-se citar: Jungbluth et al. (2005); Schleisner (2000); Weinzettel et al. (2009).

Muitas revisões da literatura sobre ACV para energia eólica já foram empregadas (ARVESEN; HERTWICH, 2012), entretanto até o presente momento nenhum estudo apresentou um enfoque específico na energia eólica *offshore*. Nesse sentido o presente trabalho tem como objetivo corroborar com a literatura de ACV para parques eólicos *offshore*, apresentando novas pesquisas e análises do atual estado da arte, bem como promover discussões qualitativas. São objetivos específicos dessa pesquisa: (i) apresentar importantes aspectos que ainda não foram tratados em revisões anteriores de ACV para energia eólica; (ii)

avaliar a qualidade dos estudos, bem como as possíveis lacunas; (iii) sugerir direções para futuras pesquisas que venham a ser empregadas sobre impactos ambientais dos parques eólicos *offshore*.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa apresenta uma revisão bibliométrica sistemática (RBS) da literatura de ACV da energia eólica *offshore*, com intuito de compilar uma base de dados para futuras pesquisas que venham a ser empregadas sobre os impactos ambientais de parques eólicos *offshore*. De acordo com Levy & Ellis (2006), a revisão da literatura é um processo que segue sistematicamente três passos: Entrada; Processamento e Saída. O presente trabalho baseou-se no modelo desenvolvido por Conforto, Amaral & Silva (2011), para revisões sistemáticas bibliométricas. A Figura 1 apresenta uma adaptação do modelo para RBS criado por Conforto, Amaral & Silva (2011), com a descrição de suas respectivas etapas de processamento.

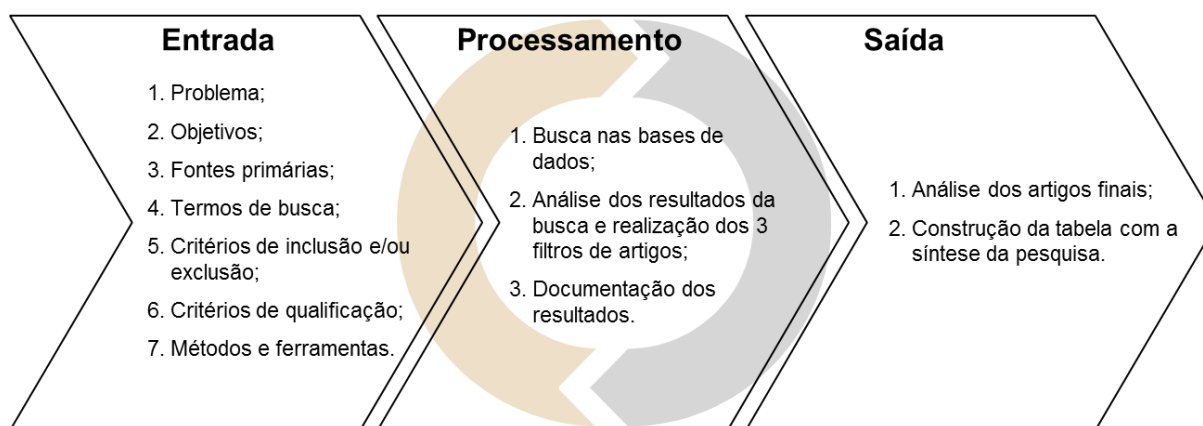


Figura 1: Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática. Adaptado de: (Conforto et al., 2011).

Fase de entrada

Esta fase consiste na estruturação do planejamento da RBS, e é composta por 7 etapas.

Etapa 1: Definição do problema de pesquisa – Quais são os principais impactos ambientais avaliados nas pesquisas sobre ACV da energia eólica *offshore*? Quais são as principais características dos parques eólicos *offshore* levadas em conta nos estudos de ACV?.

Etapa 2: Alinhamento dos objetivos – Identificar trabalhos que abordam a avaliação de ciclo de vida em parques eólicos *offshore*.

Etapa 3: Seleção das fontes primárias de pesquisa – Antes do início da revisão sistemática, realizou-se uma busca com intuito de identificar as palavras-chave que seriam posteriormente utilizadas na RBS para pesquisar os artigos nas bases de dados. Essa busca preliminar contemplou artigos, revisões e livros que tratavam sobre a ACV realizada em parques eólicos *offshore*. Os trabalhos selecionados foram: Arvesen & Hertwich (2012); Dolan & Heath (2012); Rashedi, Sridhar & Tseng (2013); Wagner et al. (2011) e Weinzettel et al. (2009).

Etapa 4: Construção do termo de busca – Refere-se aos termos que serão utilizados para as buscas nas bases de dados. Antes da construção do termo de busca, foram definidas as palavras-chave e a base de dados utilizada nesta pesquisa. A base de dados selecionada para esta revisão foi *ISI Web of Knowledge (WoS)*, pois é uma base de dados que permite acesso a mais de 100 milhões de registros, contém mais de 30.000 periódicos e é acessada por mais de 7.000 instituições acadêmicas (CLARIVATE, 2017). Além disso, o WoS é uma base indexada que permite a exportação de metadados para análises de publicações e citações (IRITANI et al., 2015). As palavras-chave foram selecionadas através das fontes primárias e seu processo de construção seguiu respectivamente três passos: definição, teste e adaptação na base de dados WoS. A Tabela 1 apresenta o termo de busca inserido na base de dados para a RBS: ACV da energia eólica *offshore*.

Tabela 1: Base de dados e termo de busca da RBS. Fonte: Autor.

Base de dados	Termo de busca
<i>ISI Web of Knowledge</i>	("offshore energy" OR "offshore wind" OR "offshore farm") AND ("Life cycle assessment" OR "LCA" OR "Impact" OR "Climate change" OR "greenhouse gases" OR "GHG" OR "gas emission")

Etapa 5: Critérios de Inclusão/Exclusão de publicações – Para obtenção das publicações mais relacionadas com os objetivos da RBS, alguns critérios de inclusão e exclusão foram definidos. A Tabela 2 apresenta os critérios com base no objetivo da RBS.

Tabela 2: Critérios de inclusão e exclusão RBS. Fonte: Autor.

Inclusão	Exclusão
<p>1 - Pesquisas aplicadas ao contexto global;</p> <p>2 - Pesquisas em formato de artigos, pois fornece maior difusão e acessibilidade para a comunidade acadêmica e profissional;</p> <p>3 - Publicado em periódicos;</p> <p>4 - Disponíveis para download de forma completa dentro da base dados da UFSCar;</p> <p>5 - Periódicos que possuem indicador SJR listado no site da SCImago Journal & Country Rank (http://www.scimagojr.com);</p> <p>6 - Estudos que focam na ACV de parques eólicos <i>offshore</i> como um todo;</p> <p>7 - Escritos em inglês.</p>	<p>1 - Acesso parcial ao conteúdo;</p> <p>2 - Disponibilidade apenas online e sem acesso direto pelas bases de dados pré-definidas;</p> <p>3 - Artigos publicados apenas em congressos;</p> <p>4 - Pesquisas que focam nos impactos sonoros, visuais, do ecossistema marinho e dos pássaros.</p> <p>5 - Estudos que focam especificamente na ACV de componentes dos parques eólico <i>offshore</i> (fundações, por exemplo);</p> <p>6 - Estudos que focam apenas no ACV da energia eólica <i>onshore</i>.</p>

Etapa 6: Seleção dos critérios de qualificação – Tem o objetivo de verificar a importância das publicações selecionadas para a pesquisa. Por isso, avaliou-se os objetivos dos trabalhos, o embasamento teórico e as principais contribuições para a literatura. De modo geral, os estudos devem tratar sobre ACV da energia eólica *offshore* em sua fundamentação.

Etapa 7: Métodos e Ferramentas – Esta etapa tratou da definição das ferramentas utilizadas, método de busca e o refinamento da pesquisa. Utilizou-se das seguintes ferramentas para auxiliar o processamento e análise dos resultados: base de dados *ISI Web of Knowledge* para obtenção dos artigos, indicador SJR (<http://www.scimagojr.com>) para verificação dos periódicos, gerenciador de referências Mendeley e o Microsoft *Excel* para trabalhar e sintetizar os resultados e informações.

Fase de processamento

Esta fase consistiu na execução da busca e filtragem dos artigos. O período da pesquisa foi de 1991, ano da instalação do primeiro parque eólico *offshore* do mundo (COLMENAR-SANTOS et al., 2016), até janeiro de 2017. No total foram encontrados 432 artigos na base dados *ISI Web of Knowledge*. Os artigos foram submetidos a três filtros de seleção (refinamento da pesquisa). A Figura 2 mostra uma síntese da filtragem dos artigos dessa revisão, identificando o número de artigos em cada etapa.

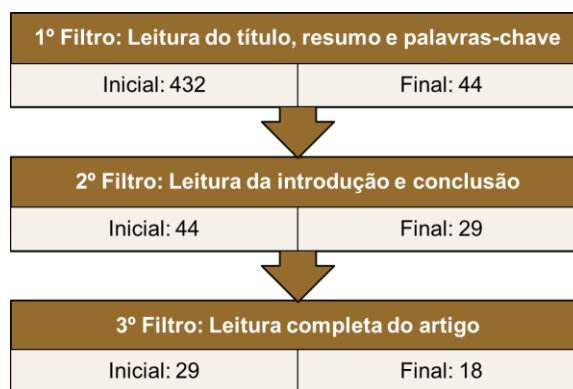


Figura 2: Síntese da filtragem da RBS “ACV da energia eólica *offshore*”. Fonte: Autor.

Pode-se verificar pela Figura 2, que inicialmente foram encontrados 432 artigos na busca, entretanto após o 1º Filtro, a quantidade foi reduzida para 44. Dentre os fatores que contribuíram com a grande redução no número de artigos, pode-se ressaltar a exclusão de trabalho sem disponibilidade de acesso direto pela base da UFSCar. Além do que, a leitura dos títulos, resumo e palavras-chave procedeu dentro da base de dados do WoS e considerando os critérios determinados anteriormente, alguns trabalhos não se tratavam de trabalhos completos ou não estavam disponíveis para *download*. Os critérios de inclusão e exclusão definidos anteriormente na Etapa 5 da Fase de Entradas, foram considerados durante todos os filtros da pesquisa. Com intuito de evitar a exclusão de trabalhos com grande importância para este estudo, os trabalhos que geraram dúvidas quanto ao seu alinhamento com os objetivos da RBS, passaram para o filtro seguinte para que pudessem ter um maior aprofundamento, e quando necessário, levados até o filtro final, garantindo assim, o saneamento de qualquer dúvida. Para o 2º e 3º Filtro criou-se uma planilha em Excel com dados extraídos diretamente da base do WoS. A planilha listava todos os artigos e possuía as principais informações de cada um como autor, ano, título, citações, revista e etc. Em seguida, foram realizados os *downloads* de todos os artigos que foram aprovados pelo 2º Filtro.

Fase de saída

Esta é fase da síntese e análise dos resultados. Nesta fase os 18 artigos selecionados no 3º Filtro da fase anterior foram apresentados em uma tabela com os principais critérios relacionados ao objetivo desta RBS. A Tabela 3 fornece a síntese dos artigos da pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ano de Publicação: O resultado apresentou um crescente interesse nas pesquisas sobre ACV da energia eólica *offshore*. Isso pode ser explicado pelo suave movimento de migração da energia eólica para o mar. De acordo com Köller, Köppel & Peters (2006), não há dúvidas de que o futuro da energia eólica será no mar. Em 2017, somente em janeiro, já houve uma publicação, isso pode representar um número maior de publicação com relação a 2016.

Vida útil do Parque Eólico: A vida útil de operação dos parques *offshore* também foi considerada nesta RBS. Diferente do resultado apresentado na RBS da energia eólica realizada por Dolan & Heath (2012), que encontrou períodos de vida útil que variavam entre 10 e 100 anos para parques eólicos *onshore*, constatou-se neste estudo que os trabalhos de ACV da energia eólica *offshore* possuem um tempo de vida útil com menor variação em comparação com a energia eólica *onshore*, entre 20 e 40 anos. Essa diferença pode ser explicada pelos altos custos de instalação e manutenção dos parques *offshore*, gerando períodos maiores para diluição do investimento (ESTEBAN et al., 2011; MARKARD; PETERSEN, 2009). De acordo com Blanco (2009), as atuais avaliações econômicas da energia eólica geralmente estabelecem tempos de vida útil de 20 anos para parques *onshore* e de 25 a 30 anos para parques *offshore*.

A média da vida útil dos artigos analisados foi de aproximadamente 23 anos. A grande maioria dos trabalhos apresentou um ciclo de vida de 20 anos, entretanto alguns estudos como o de Huang, Gan & Chiueh (2017) e Wagner et al. (2011), consideram dois tempos de vida útil diferentes para um mesmo parque eólico *offshore*. O primeiro período considerado é de 20 anos, essa idade aplica-se aos aerogeradores e seu cabeamento interno. O segundo período considerado é de 40 anos, esta idade aplica-se para o cabeamento marinho, a fundação dos aerogeradores e subestação *offshore*. Outro exemplo com períodos diferentes para um mesmo parque é o estudo de Jungbluth et al. (2005), neste estudo foi realizado a modelagem do inventário de ciclo de vida com dois conceitos para parques eólicos, partes fixas e partes móveis. As fixas, como torre e fundação, tiveram o tempo de ciclo de vida estimado em 40 anos. Já as móveis, como rotor, cabeamento e mecânica, 20 anos. A RBS identificou que o estágio de manutenção dos parques foi o menos explorado na literatura, e alguns estudos assumiram que os impactos provenientes da manutenção não são alterados

quando há mudanças no período da vida útil do parque. Segundo Dolan & Heath (2012), os erros realizados nesta etapa são de pequena magnitude quando comparados com os demais estágios. Estudos como o de Jungbluth et al. (2005), consideraram diferentes períodos de operação para manutenção, 20 e 40 anos, entretanto não reportaram separadamente as emissões provenientes deste estágio.

Autor	Ano	Tecnologia	Vida útil (anos)	Capacidade da turbina (MW)	Nº de turbinas	Distância da costa (km)	Localização	Tipo de estudo	Citações	Impactos
Schleisner	2000	Offshore	20	0,5	10	6	Dinamarca	Empírico	110	4 e 12
Schleisner	2000	Onshore	20	0,5	18	-	Dinamarca	Empírico	110	4 e 12
Weinzettel et al.	2009	Offshore	20	5,0	40	50	Noruega	Teórico	67	1, 2, 4, 16, 18, 19
Weinzettel et al.	2009	Offshore	20	2,0	40	50	Noruega	Teórico	67	1, 2, 4, 16, 18, 19
Jungbluth et al.	2005	Onshore	20/40	0,8	2	-	Suíça	Teórico	65	1, 2, 3, 4, 8, 12, 13, 16, 18, 19, 21
Jungbluth et al.	2005	Offshore	20	2,0	20	3,5	Europa	Teórico	65	1, 2, 3, 4, 8, 12, 13, 16, 18, 19, 21
Peht et al.	2008	Offshore	-	5,0	-	-	Alemanha	Teórico	48	13
Wagner et al.	2011	Offshore	20/40	5,0	12	19,5	Alemanha	Teórico	25	1, 2, 4, 16, 19
Wagner et al.	2011	Offshore	20	5,0	40	19,5	Alemanha	Teórico	25	1, 2, 4, 16, 19
Avessen & Hertwich	2012	Onshore	20	2,5	-	-	Europa/Global	Teórico	20	1, 2, 3, 12
Avessen & Hertwich	2012	Offshore	25	2,5	-	30	Europa/Global	Teórico	20	1, 2, 3 e 10
Wang & Sun	2012	Onshore	20	0,8	116	-	Pais desenvolvido	Empírico	17	13
Wang & Sun	2012	Onshore	20	1,65	185	-	Pais desenvolvido	Empírico	17	13
Wang & Sun	2012	Onshore	20	3,0	100	-	Pais desenvolvido	Empírico	17	13
Wang & Sun	2012	Offshore	20	3,0	100	-	China	Empírico	17	13
Karamanis et al.	2011	Offshore	20	3,0/3,6/5,0	1	-	Grecia	Empírico	12	13
Avessen, Birkeland & Hertwich	2013	Offshore	20	2,5	-	-	Europa/Global	Teórico	10	1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 19
Raadal et al.	2014	Offshore	20	5,0	100	200	Inglaterra	Teórico	7	13
Bouman, Oberg & Hertwich	2016	Offshore	25	5,0	80	-	Bélgica	Teórico	5	1, 2, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 19
Avessen et al.	2014	Offshore	30	5,0	120	-	Europa	Teórico	5	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 19, 21
Reiners, Özdirik & Kaltschmitt	2014	Offshore	20	5,0	80	50	Alemanha	Teórico	2	13
Bonou, Laurent & Olsen	2016	Onshore	20	2,3	20	-	Europa	Teórico	1	1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 19, 21
Bonou, Laurent & Olsen	2016	Onshore	20	3,2	20	-	Europa	Teórico	1	1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 19, 21
Bonou, Laurent & Olsen	2016	Offshore	20	4,0	80	30	Europa	Teórico	1	1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 19, 21
Bonou, Laurent & Olsen	2016	Offshore	25	6,0	80	50	Europa	Teórico	1	1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 19, 21
Eickelkamp	2015	Offshore	20	5,0	12	60	Alemanha	Teórico	0	2 e 4
Huang, Can & Chluh	2017	Offshore	20/40	2,0	52	10	China	Teórico	0	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 17, 18, 21
Mrozinski & Plasecka	2015	Offshore	25	2,0	1	-	Europa	Teórico	0	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 17, 19, 21
Mrozinski & Plasecka	2015	Onshore	25	2,0	1	-	Europa	Teórico	0	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 17, 19, 21
Chiang et al.	2016	Offshore	20	3,0	100	-	Estatos unidos	Teórico	0	13

Tabela 3. Overview dos escopos e premissas dos artigos que passaram nos critérios de seleção da revisão bibliométrica sistemática da ACV da energia eólica offshore. Categorias de impacto: 1 = Acidificação; 2 = Alterações climáticas; 3 = Depredação camada de ozônio; 4 = Demanda de energia acumulada; 5 = Ecotoxicidade terrestre; 6 = Ecotoxicidade água doce; 7 = Ecotoxicidade água marinha; 8 = Esgotamento de recurso mineral e fóssil; 9 = Esgotamento dos recursos hídricos; 10 = Eutrofização de água doce; 11 = Eutrofização de marinha; 12 = Formação de matéria particulada; 13 = Gases causados do efeito estufa; 14 = Ocupação de terra da agricultura; 15 = Ocupação de terra urbana; 16 = Oxidação fotoquímica; 17 = Radiação ionizante; 18 = Toxicidade ambiental; 19 = Toxicidade humana; 20 = Transformação natural da terra; 21 = Uso da terra. Fonte: Autor.

Capacidade e Quantidade de Turbinas: A turbina *offshore* com a menor capacidade nominal analisada neste estudo foi de 0,5 MW, com altura da torre de 40,5 m e diâmetro do rotor de 39 m. O parque *offshore* com a menor capacidade nominal estudado foi o parque proposto por Mroziński & Piasecka (2015), localizado em território europeu, com capacidade de 2 MW e composto por uma única turbina com fundação monopilar (*monopile*). A turbina *offshore* com maior capacidade encontrada foi de 6 MW com altura da torre de 154 m e diâmetro do rotor de 87,7 m (BONOU; LAURENT; OLSEN, 2016). A capacidade média das turbinas encontrada nesta revisão foi de 3,2 MW. Observou-se que nos últimos anos há um crescimento da capacidade das turbinas *offshore*, de 2011 em diante a média da capacidade das turbinas atingiu aproximadamente 3,5 MW, em contrapartida a média das pesquisas realizadas até 2010 era de 2,3 MW. Esse crescimento na capacidade das turbinas pode ser explicado pelo avanço no desenvolvimento da tecnologia *offshore*, de acordo com El-Sharkawi (2015), atualmente existem turbinas com até 140 m de altura e capazes de gerar até 8 MW. O parque *offshore* com maior número de turbinas encontrado foi de Arvesen et al. (2014). É possível constatar ainda, que os trabalhos mais recentes apresentam parques maiores e com maior capacidade instalada, isso pode ser explicado pelo amadurecimento da tecnologia eólica que vem reduzindo cada vez mais os custos de produção e aumentando a capacidade dos equipamentos.

Distância da costa e Localização: A tendência do setor *offshore* é atingir águas cada vez mais profundas, de acordo com Reimers, Özdirik & Kaltschmitt (2014), atualmente já existem parques *offshore* em fase de planejamento com distâncias superiores a 200 km da costa. O parque *offshore* mais distante da costa encontrado, foi planejado a uma distância de 200 km (RAADAL et al., 2014). A grande maioria dos estudos foram realizados nos países europeus, isso pode ser explicado pelo fato de que a energia eólica *offshore* já é amplamente utilizada por grandes economias da Europa. O foco do seu desenvolvimento concentra-se no norte europeu, onde países com grande histórico em desenvolvimento e inovações, como Alemanha e Reino Unido, empregam grandes esforços no desenvolvimento desta tecnologia (ESTEBAN et al., 2011). A Europa foi responsável por cerca de 89% do crescimento mundial de energia eólica *offshore* no ano de 2015, o continente instalou aproximadamente 3.035 MW, isso representou um aumento de 108% em relação a 2014 (GWEC, 2016). A Alemanha é o país que mais se destacou, 4 estudos são focados em parques *offshore* na Alemanha. Essa liderança nos estudos é um reflexo do grande crescimento da utilização da tecnologia eólica *offshore* na matriz energética alemã. Segundo GWEC (2016), em 2015 o país adicionou

2.282,4 MW em sua matriz energética, essa quantidade representa cerca de 75% de toda capacidade que foi instalada no setor em 2015.

Impactos Ambientais: A revisão apresentou 21 diferentes impactos ambientais encontrados nos trabalhos de ACV da energia eólica *offshore*. O impacto mais avaliado pelos pesquisadores foram as alterações climáticas, no total 11 estudos trataram do assunto. Segundo Lenzen & Munksgaard (2002), os estudos de ACV da energia eólica tem um histórico de avaliar principalmente dois tipos de impacto: a emissão de gases causadores do efeito estufa e a demanda de energia acumulada. No caso das estimativas das alterações climáticas os valores dos indicadores são geralmente formados por CO₂, CH₄ e N₂O, entretanto, alguns estudos também consideram SF₆, HFC e PFC (ARVESEN; HERTWICH, 2012). De acordo com os resultados do estudo de Mroziński & Piasecka (2015) a categoria que apresentou o maior impacto ambiental nos parques *offshore* é o “Esgotamento de recurso mineral e fóssil”.

Estudos como o de Arvesen & Hertwich (2012), Jungbluth et al. (2005) e Wagner et al. (2011), demonstraram que o maior impacto ambiental nos parques eólicos *offshore* ocorrem nas etapas de produção dos componentes dos aerogeradores, como fundação, torre, pás e etc. Os estudos demonstraram ainda que a fabricação das fundações é o principal responsável pelo impacto. De acordo com os resultados de Noori, Kucukvar & Tatari (2015), a etapa de transporte dos parques *offshore* também tem impacto considerável, entretanto, ainda assim, é muito inferior ao impacto do transporte nos parques *onshore*. Em comparação com os parques eólicos *onshore* estudados por Arvesen & Hertwich (2012), pode-se concluir que os parques *offshore* apresentam maior impactos percentual nas etapas de operação e manutenção do que os parques *onshore*. Apesar disso, os parques eólicos *offshore* apresentam ao longo do seu ciclo de vida impactos ambientais inferiores aos parques *onshore* (AMPONSAH et al., 2014; NOORI; KUCUKVAR; TATARI, 2015).

CONCLUSÃO

Este artigo revisou 18 estudos diretamente relacionados a ACV de parques eólicos *offshore* e forneceu uma tabela resumida com as premissas e escopos destes artigos. Neste estudo foi evidenciado uma perspectiva de crescimento nos trabalhos na área, e também foi constatado que os dados apresentados são, em grande parte, similares aos utilizados nos ACV da energia eólica *onshore*. Os autores recomendam para futuros trabalhos sobre o tema, a utilização de outras bases de dados indexadas, além do WoS. Foi observado ainda que

diferente do que foi apresentado em outras RBS da energia eólica *onshore*, a maioria dos estudos de ACV da energia eólica *offshore* são teóricos. Portanto, os autores recomendam a utilização de mais dados empíricos sobre ACV de parques *offshore* em novos trabalhos na área.

REFERÊNCIAS

AMPONSAH, N. Y. et al. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.39, p.461–475, nov. 2014.

ARVESEN, A. et al. Life cycle assessment of an offshore grid interconnecting wind farms and customers across the North Sea. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.19, n.4, p.826–837, 2014.

ARVESEN, A.; BIRKELAND, C.; HERTWICH, E. G. The Importance of Ships and Spare Parts in LCAs of Offshore Wind Power. **Environmental Science & Technology**, v.47, n.6, p.2948–2956, 19 mar. 2013.

ARVESEN, A.; HERTWICH, E. G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, n.8, p.5994–6006, out. 2012.

BLANCO, M. I. The economics of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, n.6–7, p.1372–1382, 2009.

BONOU, A.; LAURENT, A.; OLSEN, S. I. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. **Applied Energy**, v.180, p.327–337, 15 out. 2016.

BOUMAN, E. A.; ØBERG, M. M.; HERTWICH, E. G. Environmental impacts of balancing offshore wind power with compressed air energy storage (CAES). **Energy**, v.95, p.91–98, 15 jan. 2016.

CHIANG, A. C. et al. Emissions reduction benefits of siting an offshore wind farm: A temporal and spatial analysis of Lake Michigan. **Ecological Economics**, v.130, p.263–276, 2016.

CLARIVATE - Clarivate Analytics. **Web of Science - Trust the Difference**, 2017. Disponível em: < <https://goo.gl/8UIXH2> >. Acesso em: 14 jun. 2017.

COLMENAR-SANTOS, A. et al. Offshore wind energy: A review of the current status, challenges and future development in Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.64, p.1–18, out. 2016.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. DA. Roteiro para revisão bibliográfica

sistemática : aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolviemnto de Produto - CNGDP 2011**, v.8, n.1998, p.1–12, 2011.

DOLAN, S. L.; HEATH, G. A. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Utility-Scale Wind Power. **Journal of Industrial Ecology**, v.16, p.S136–S154, 2012.

EICKELKAMP, T. Significance of fixed assets in life cycle assessments. **Journal of Cleaner Production**, v.101, p.97–108, 15 ago. 2015.

EL-SHARKAWI, M. A. **Wind Energy - An Introduction**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

ESTEBAN, M. D. et al. Why offshore wind energy? **Renewable Energy**, v.36, n.2, p.444–450, fev. 2011.

GWEC - Global Wind Energy Council. **Global Wind Report 2015**, 2016. Disponível em: < <https://goo.gl/XZS RNt> >. Acesso em: 03 fev. 2017.

HUANG, Y.-F.; GAN, X.-J.; CHIUEH, P.-T. Life cycle assessment and net energy analysis of offshore wind power systems. **Renewable Energy**, v.102, Part, p.98–106, mar. 2017.

IRITANI, D. R. et al. Análise sobre os conceitos e práticas de Gestão por Processos: revisão sistemática e bibliometria. **Gestão & Produção**, v.22, n.1, p.164–180, 2015.

JUNGLBLUTH, N. et al. Life Cycle Assessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power (11 pp). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.10, n.1, p.24–34, 2005.

KARAMANIS, D. et al. Wind energy resources in the Ionian Sea. **Renewable Energy**, v.36, n.2, p.815–822, fev. 2011.

KÖLLER, J.; KÖPPEL, J.; PETERS, W. **Offshore Wind Energy - Research on Environmental Impacts**. Berlin: Springer, 2006.

LENZEN, M.; MUNKSGAARD, J. Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications. **Renewable Energy**, v.26, n.3, p.339–362, jul. 2002.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science**, v.9, p.181–211, 2006.

MARKARD, J.; PETERSEN, R. The offshore trend: Structural changes in the wind power sector. **Energy Policy**, v.37, n.9, p.3545–3556, set. 2009.

MROZIŃSKI, A.; PIASECKA, I. Selected Aspects of Building , Operation and Environmental Impact of Offshore Wind Power Electric Plants. **Polish maritime research**, v.22, n.86, p.86–92, 2015.

NOORI, M.; KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Economic Input – Output Based Sustainability Analysis of Onshore and Offshore Wind Energy Systems. **International Journal of Green**

Energy, v.12, n.9, p.939–948, 2015.

PEHNT, M.; OESER, M.; SWIDER, D. J. Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany. **Energy**, v.33, n.5, p.747–759, maio 2008.

PERVEEN, R.; KISHOR, N.; MOHANTY, S. R. Off-shore wind farm development: Present status and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.29, p.780–792, jan. 2014.

RAADAL, H. L. et al. GHG emissions and energy performance of offshore wind power. **Renewable Energy**, v.66, p.314–324, jun. 2014.

RASHEDI, A.; SRIDHAR, I.; TSENG, K. J. Life cycle assessment of 50 MW wind farms and strategies for impact reduction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.21, p.89–101, maio 2013.

REIMERS, B.; ÖZDIRIK, B.; KALTSCHMITT, M. Greenhouse gas emissions from electricity generated by offshore wind farms. **Renewable Energy**, v.72, p.428–438, dez. 2014.

SCHLEISNER, L. Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. **Renewable Energy**, v.20, n.3, p.279–288, 1 jul. 2000.

SUN, X.; HUANG, D.; WU, G. The current state of offshore wind energy technology development. **Energy**, v.41, n.1, p.298–312, maio 2012.

WAGNER, H.-J. et al. Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus. **Energy**, v.36, n.5, p.2459–2464, maio 2011.

WANG, Y.; SUN, T. Life cycle assessment of CO₂ emissions from wind power plants: Methodology and case studies. **Renewable Energy**, v.43, p.30–36, jul. 2012.

WEINZETTEL, J. et al. Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. **Renewable Energy**, v.34, n.3, p.742–747, mar. 2009.