



Grupo de Estudo de Desempenho Ambiental de Sistemas Elétricos-GMA

Impactos ambientais de energias renováveis: uma avaliação da expansão da geração eólica e solar fotovoltaica no Brasil sob uma perspectiva de ciclo de vida

JOÃO GABRIEL GONÇALVES DE LASSIO(1, 2); DENISE FERREIRA DE MATOS(1, 2); DAVID ALVES CASTELO BRANCO(2);
CEPEL(1); PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO DA COPPE/UFRJ(2)

RESUMO

O presente trabalho integra uma pesquisa que objetiva incorporar critérios socioambientais em modelos de planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica no país. Assim, fornece uma observação sobre a cadeia da geração de energia elétrica das fontes eólica e solar fotovoltaica, considerando dois cenários do Plano Decenal de Expansão de Energia 2026, através de uma abordagem de ciclo de vida. Tal abordagem é particularmente interessante para essas fontes uma vez que a maior parte dos seus impactos não está concentrada na etapa de geração de energia, mas distribuída ao longo de toda a cadeia produtiva.

PALAVRAS-CHAVE

Energia Eólica, Energia Solar Fotovoltaica, Planejamento Energético, Impactos Ambientais, Avaliação do Ciclo de Vida.

1.0 - INTRODUÇÃO

À medida que se amplia e aprofunda o entendimento acerca das consequências socioambientais associadas à produção, conversão e uso de energia, uma transição energética global rumo às energias renováveis se torna cada vez mais imperativa. O Brasil integra o conjunto de países em desenvolvimento e propulsores do alargamento da oferta mundial de energia. Somente na última década, o país experimentou um aumento anual médio de mais de 2% na sua oferta interna de energia. Uma evolução semelhante é esperada para os próximos dez anos ((1, (2, (3).

Apesar da matriz de oferta interna de energia ser constituído por uma parcela significativa de fontes renováveis (cerca de 40%), com destaque para a hidroeletricidade e a bioenergia, a sua maior parte (cerca de 60%) é ainda representada pelas fontes não renováveis, com um domínio dos combustíveis fósseis (4,(1, (2). É justamente esse predomínio atual de energia sob a forma de hidrocarbonetos que está vinculado aos desafios relativos tanto ao (re)conhecimento da degradação e dos limites do meio natural quanto aos compromissos internacionais firmados no Acordo de Paris, durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21). Assim, no sentido de contribuir com esforços para a limitação do aumento da temperatura média global em 2°C, em relação aos níveis pré-industriais, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025 (7). No entanto, estimativas apontam que a ampliação da oferta interna de energia está atrelada a um aumento anual de emissões de GEE de 1,9%, totalizando cerca de 470 Mt de CO₂ no final de 2026 ((1).

Diante disso, está previsto um incremento na participação de fontes renováveis na matriz elétrica nacional, a qual já supera hoje a marca de 80%. A expectativa é que essas fontes alcancem o patamar de 87% até meados da metade da próxima década ((1, (2). Entre as tecnologias mais promissoras, destacam-se a eólica e a solar fotovoltaica que apresentaram, dentre as renováveis, as ofertas que mais cresceram, em termos percentuais, no

período de 2016 a 2017. Tal evolução não só ilustra o potencial dessas fontes conquistarem uma parcela importante na matriz elétrica nacional, mas indica também a necessidade de se desenvolver estudos focados nos seus impactos sobre o meio socioambiental que ainda são pouco explorados ((2).

Assim, o presente trabalho integra uma pesquisa que tem por objetivo incorporar critérios socioambientais em modelos de planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica no país. Nesse sentido, a elaboração deste artigo corresponde ao seu ponto de partida na medida em que explora a expansão da geração de energia elétrica a partir de aerogeradores e módulos fotovoltaicos, visando identificar, avaliar e comparar os seus impactos ambientais. Para isso, adotou-se uma abordagem de ciclo de vida em virtude do seu reconhecimento como o instrumento mais adequado pra esse fim. Tal abordagem se revela particularmente interessante para o caso das energias renováveis uma vez que a maior parte de seus impactos não está concentrada na etapa de geração de energia, mas distribuída ao longo de toda a cadeia produtiva. Cabe aqui ressaltar que não se busca questionar o interesse crescente por essas fontes, mas trazer à luz suas implicações ambientais de modo a se antecipar aos desafios potenciais atrelados à expansão da geração de energia elétrica no país.

2.0 - CONTEXTUALIZAÇÃO

Em meio a uma conjuntura que combina a inevitável expansão da demanda de energia e a emergente descarbonização da economia em nível global, as fontes renováveis de energia se revelam como um dos principais pilares da estrutura em torno da qual está se desenvolvendo a revolução energética atual (9). Ao fazerem uso de recursos capazes de se regenerar em curto ou médio prazo, elas se apresentam como uma alternativa aos combustíveis fósseis, permitindo a neutralização das emissões de GEE durante a etapa de geração de energia. Assim, vem naturalmente recebendo grande atenção pelo mundo. Contudo, como todo e qualquer aproveitamento de energia promovido pelo homem, seu aproveitamento tem também implicações ambientais.

De um modo geral, as cadeias produtivas de aerogeradores e módulos fotovoltaicos estão associadas a uma série de danos ou riscos ao meio natural (10). Para citar apenas um exemplo, alguns de seus componentes e subcomponentes são produzidos a partir de metais conhecidos pela designação terras raras. É o caso dos ímãs permanentes de alguns geradores eólicos e materiais semicondutores de células fotovoltaicas. Esses metais requerem processos de extração e refino onerosos, sobretudo, dos pontos de vistas econômico e ambiental (11, 12, 13, (14). Outro aspecto importante se refere à destinação desses equipamentos uma vez finalizada a sua vida útil. Seus resíduos deverão de algum modo ser descartados na natureza ou reintegrados pela cadeia produtiva ((14). No caso das terras raras, menos de 1% do seu conteúdo em produtos são atualmente reciclados (16).

Quando voltamos nosso olhar para o cenário nacional, evidencia-se a necessidade de importar componentes e subcomponentes de aerogeradores e módulos fotovoltaicos. Isso porque o país não dispõe ainda de um parque industrial e tecnológico capaz de produzi-los mais baratos que seus equivalentes importados, de refinar o silício em grau solar e de fabricar células fotovoltaicas (17, 18). Atualmente, a China é a principal fornecedora desses insumos na medida em que se tornou ao mesmo tempo o maior mercado de energia eólica e o maior fabricante e exportador de células fotovoltaicas do mundo (17, 19). Assim, quando comparada com uma produção nacional, a importação de bens de consumo exige uma logística mais extensa e, portanto, onerosa em termos financeiros e ambientais (20).

Portanto, as cadeias produtivas de aerogeradores e módulos fotovoltaicos se revelam não só geradoras de GEE, como impactantes em relação a outros aspectos. Envidar esforços no sentido de mitigar seus impactos ambientais requer, antes de tudo, uma observação sobre o ciclo de vida completo dessas tecnologias. Ou seja, o conjunto de etapas consecutivas nas quais os seus diversos insumos, advindos da natureza ou de outro processo produtivo, experimentam algum tipo de transformação até o descomissionamento de seus empreendimentos e a geração de resíduos. Só assim é possível identificar deslocamentos de impactos que porventura venham a ocorrer entre as etapas e, até mesmo, diferentes zonas geográficas vinculadas a essa cadeia produtiva. Dessa necessidade emerge a abordagem do ciclo de vida, a qual compõe o quadro de ferramentas de gestão ambiental necessário às modernas políticas ambientais e às decisões empresariais voltadas para o consumo e a produção ambientalmente responsáveis (21). Tal ferramenta tem o potencial de auxiliar de modo mais consistente decisões políticas, tecnológicas e estruturais. No que diz respeito ao setor energético, tem sido, sobretudo, empregada na avaliação do desempenho ambiental de diferentes alternativas tecnológicas, de demandas e de ofertas de energia ((14).

3.0 - METODOLOGIA

Para avaliar e comparar os impactos ambientais associados a expansão da geração de energia elétrica a partir de aerogeradores e módulos fotovoltaicos, o presente trabalho lançou mão de uma abordagem de ciclo de vida conforme a estrutura e requisitos metodológicos fornecidos pelas normas ISO 14040 e 14044 (22; 23). Assim, em um primeiro momento, foi conduzida uma avaliação preliminar dos seus desempenhos ambientais para a geração de 1 kWh de energia elétrica dentro de um contexto nacional, fornecendo subsídio para as análises posteriores sobre a expansão da oferta de energia elétrica proveniente dessas tecnologias. Para isso, consideraram-se as seguintes etapas das suas cadeias produtivas: [1] processamento de materiais e produção de componentes, [2] transportes relativos à importação de componentes, [3] montagem de componentes, [4] instalação do parque eólico

e usina solar, [4] operação e [5] descomissionamento e destinação final dos resíduos (ver Figura 1 e Figura 2). Não foram levados em conta os transportes, a conexão com a rede de distribuição e os processos de infraestrutura, a saber, construção de fábricas e produção de equipamentos e veículos utilizados ao longo da cadeia produtiva.

As categorias de impacto selecionadas para a análise correspondem ao potencial de aquecimento global, ecotoxicidade (terrestre, de água doce e marinha), uso do solo, consumo de água e escassez de recursos minerais, as quais estão integradas ao método de cálculo *ReCiPe 2016* ((24). Essa seleção teve como base tanto os temas socioambientais e prioritários para gestão ambiental apontados no Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 (PDE 2026) quanto à necessidade de insumos materiais e energéticos para a produção de componentes e subcomponentes de aerogeradores e módulos fotovoltaicos ((1). As informações referentes aos fluxos de entrada (materiais e energia) e de saída (produtos e resíduos) dos processos de cada etapa da cadeia de geração de energia elétrica foram obtidas através de dados secundários provenientes da base de dados *Ecoinvent 3.4* ((25). Destaca-se que essas informações foram, sempre que possível, modificadas de modo a melhor refletir o contexto brasileiro.

Em seguida, essa análise foi ampliada para dois cenários de expansão da oferta interna de energia nacional, os quais foram estabelecidos pelo PDE 2026 ((1). O primeiro deles corresponde ao cenário de referência no qual a capacidade instalada da geração eólica supera aquela da solar fotovoltaica; enquanto que o segundo cenário corresponde a uma situação inversa devido a uma redução dos custos de investimentos relativos à tecnologia solar fotovoltaica, de 40% a partir de 2023, aumentando a sua contribuição e reduzindo a da opção eólica ((1). De modo a explorar os seus desempenhos ambientais, identificando suas potenciais consequências ambientais, esses cenários foram avaliados considerando a geração de 1 kWh de energia elétrica a partir do par de fontes solar fotovoltaica e eólica durante o período 2020-2026. As avaliações tanto das tecnologias de geração de energia elétrica quanto dos cenários do PDE 2026 foram conduzidas junto ao software *SimaPro 8.5.2*.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de inventário

4.1.1 Aerogeradores

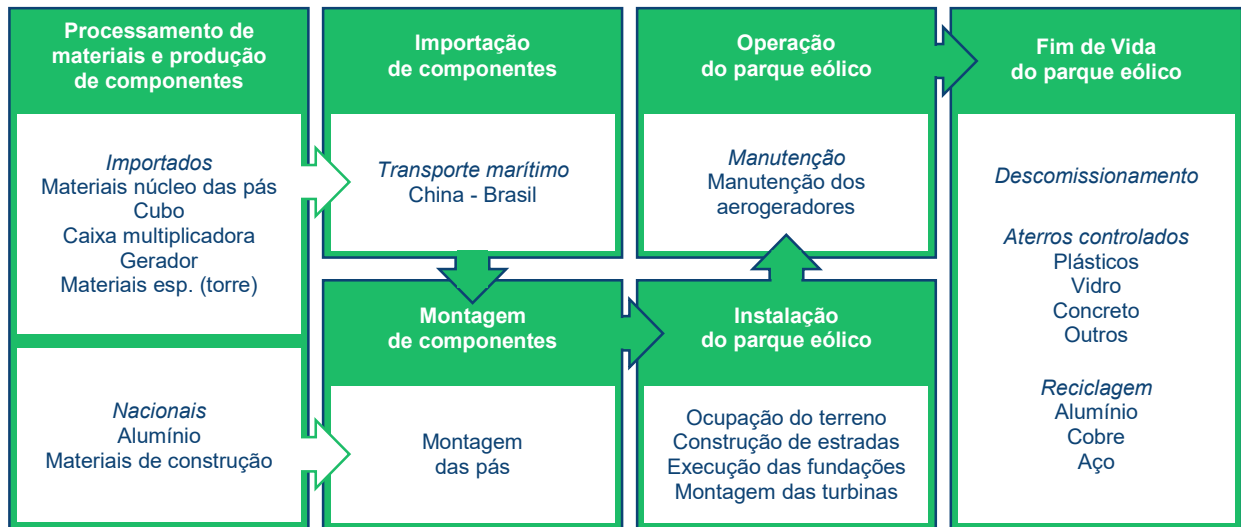
No presente estudo, os aerogeradores foram divididos em 4 componentes principais, a saber, rotor, nacelle, torre e fundações, e partes menores, porém relevantes, denominadas subcomponentes, conforme apresentado na Tabela 1 ((17, (25). No banco de dados *Ecoinvent 3.4*, foram utilizadas como base para o inventário desse sistema as informações relativas a parques eólicos *onshore* no Brasil, cuja capacidade instalada é superior a 3,0 MW, uma vez que usinas desse porte predominam no cenário nacional ((25, (26).

Tabela 1 – Divisão dos aerogeradores em componentes e subcomponentes considerada no estudo ((17, (20,(25)

Componente	Subcomponente	Origem
Rotor	Pás	Importado
	Cubo	Importado
Nacelle	Caixa multiplicadora	Importado
	Gerador	Importado
	Torre	Nacional
	Fundações	Nacional

Assim, no que se refere à cadeia produtiva de aerogeradores, a etapa de Processamento de materiais e produção de componentes corresponde aos processos necessários não só à transformação de materiais, mas também à fabricação de seus componentes e subcomponentes. Com respeito à etapa de Importação de componentes, considerou-se, conforme observado na Tabela 1, que os materiais empregados no núcleo das pás, o cubo, a caixa multiplicadora e cimentos, aditivos e grautes especiais para produção de concreto da torre são provenientes da China ((17, (20). Em seguida, assumiu-se que as pás são fabricadas em solo nacional a partir de insumos materiais importados. O ônus ambiental dessa etapa, denominada Montagem de componentes, está associado a energia demandada por quilograma dos materiais que nela experimentaram algum tipo de transformação ((25, (27). Durante a etapa de Instalação do parque eólico foram levados em conta a ocupação do solo, construção de estradas, escavações, execução de fundações e o consumo de energia elétrica para a montagem das turbinas. Já a etapa de Operação do parque eólico, na qual ocorre a geração de energia elétrica, ficou restrita ao uso de óleo lubrificante para manutenção dos aerogeradores realizada uma vez ao ano ((25). Por fim, na etapa de Fim de Vida foram considerados os processos necessários para o descomissionamento de todo o parque eólico e a destinação dos seus resíduos. Sobre esse aspecto, admitiu-se um cenário de fim de vida no qual 100% dos resíduos de alumínio, cobre e aço é reciclado; enquanto os demais resíduos, constituídos por outros materiais, enviados para aterros controlados ((25) (Figura 1).

Figura 1 – Esquema simplificado da fronteira do ciclo de vida dos aerogeradores e detalhes de sua cadeia produtiva considerados no estudo



4.1.2 Módulos fotovoltaicos

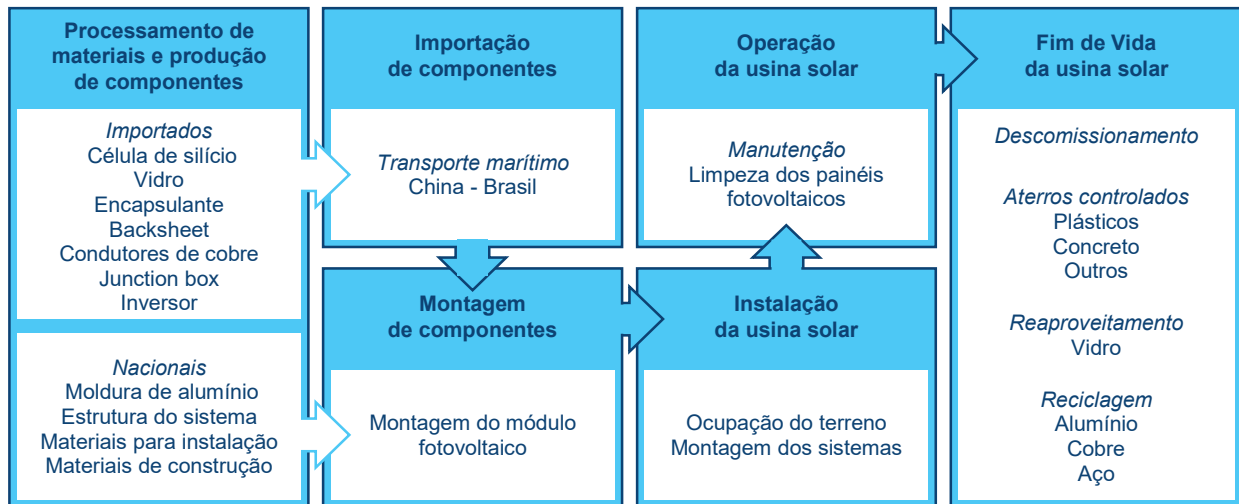
No que diz respeito às usinas solares, foram considerados módulos fotovoltaicos compostos por painéis policristalinos, bem como seus subcomponentes, além de inversores, estrutura do sistema e instalações elétricas, conforme Tabela 2 ((25)). Dentre seus materiais constituintes, se destacam como os mais importantes: célula de silício, alumínio, vidro e condutores de cobre ((18, (28)). No banco de dados *Ecoinvent 3.4*, foram utilizadas como base as informações relativas a usinas solares cuja cobertura geográfica é global ((25)).

Tabela 2 – Divisão dos módulos fotovoltaicos em componentes e subcomponentes considerada no estudo ((18, (25, (28))

Componente	Subcomponente	Origem
Painel	Célula de silício	Importado
	Moldura de alumínio	Nacional
	Vidro	Importado
	Encapsulante	Importado
	Backsheet	Importado
	Condutores de cobre	Importado
	Junction box	Importado
Inversor		Importado
Estrutura do sistema		Nacional
Instalação elétrica		Nacional

Analogamente a cadeia produtiva dos aerogeradores, a etapa de Processamento de materiais e produção de componentes corresponde aos processos necessários não só à transformação de materiais, mas também à fabricação de componentes e subcomponentes dos módulos fotovoltaicos. No que se refere à etapa de Importação de componentes, considerou-se, conforme observado na Tabela 2, que as células de silício, vidro, encapsulante, *backsheet*, condutores de cobre, *junction box* e inversores são provenientes da China ((18, (28)). A etapa de Montagem de componentes corresponde a montagem do módulo fotovoltaico em solo nacional ((18, (28)). Durante a etapa de Instalação da usina solar foram levados em conta a ocupação do solo e o consumo de energia elétrica e combustível para a montagem dos sistemas. Já a etapa de Operação da usina solar, na qual ocorre a geração de energia elétrica, se restringiu ao consumo de água para limpeza dos painéis solares ((25)). Por fim, na etapa de Fim de Vida foram considerados os processos necessários para o descomissionamento da usina solar e a destinação dos seus resíduos. Assumiu-se um cenário de fim de vida no qual o vidro é reaproveitado e 100% dos resíduos de alumínio, cobre e aço é reciclado. Os demais resíduos, constituídos por outros materiais, são enviados para aterros controlados (25) (Figura 2).

Figura 2 – Esquema simplificado da fronteira do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos e detalhes de sua cadeia produtiva considerado no estudo



4.2 Avaliação dos impactos ambientais e interpretação dos resultados

4.2.1 Aerogeradores e módulos fotovoltaicos

Conforme apresentado na Tabela 3, pode-se observar que a maior parte dos impactos ambientais decorridos da cadeia de geração de 1 kWh de energia elétrica a partir de aerogeradores está concentrada na etapa de Processamento de materiais e produção de componentes. Em relação a carga ambiental total do ciclo de vida de aerogeradores, essa etapa é responsável por 72% ($1,26 \cdot 10^{-2}$ kg CO_{2eq.}) dos impactos relacionados ao aquecimento global e responde por 95% ($3,72 \cdot 10^{-1}$ kg 1,4-DCB) da ecotoxicidade terrestre, 98% ($4,44 \cdot 10^{-4}$ kg Cu_{eq.}) da depleção de recursos minerais e 77% ($1,65 \cdot 10^{-4}$ m³) do consumo de água. Por outro lado, as categorias de impacto de ecotoxicidade de água doce e marinha apresentaram maior contribuição da etapa de Fim de Vida. Além disso, cabe destacar a participação significativa da etapa de Importação de componentes na emissão de GEE, a qual corresponde a 22% ($3,92 \cdot 10^{-3}$ kg CO_{2eq.}) do total. Esse último aspecto está relacionado à necessidade de se importar quantidades relevantes, sobretudo, de materiais de construção para as estruturas de concreto armado.

Tabela 3 – Avaliação dos impactos ambientais da geração de 1 kWh de energia elétrica a partir de aerogeradores [Método de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H) ((24), caracterização)]

Categoria de impacto	Unidade	Etapas do ciclo de vida de aerogeradores						Total
		Produção	Importação	Montagem	Instalação	Operação	Fim de Vida	
Aquecimento global	kg CO _{2eq.}	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$5,59 \cdot 10^{-5}$	$4,80 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	$3,72 \cdot 10^{-1}$	$7,99 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$4,70 \cdot 10^{-4}$	$3,61 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-1}$
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-6}$	$8,14 \cdot 10^{-8}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$	$2,99 \cdot 10^{-7}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	$4,16 \cdot 10^{-3}$	$7,82 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$	$4,13 \cdot 10^{-6}$	$4,32 \cdot 10^{-7}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$
Uso do solo	m ² a crop _{eq.}	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-8}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$4,30 \cdot 10^{-4}$
Escassez de rec. minerais	kg Cu _{eq.}	$4,44 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-9}$	$3,48 \cdot 10^{-8}$	$1,79 \cdot 10^{-8}$	$7,79 \cdot 10^{-6}$	$4,52 \cdot 10^{-4}$
Consumo de água	m ³	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$5,76 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$4,01 \cdot 10^{-5}$	$3,57 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$

De modo semelhante, os resultados da avaliação dos impactos ambientais da geração de 1 kWh de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos revelam também um domínio da etapa de Processamento de materiais e produção de componentes, conforme pode ser observado na Tabela 4. Essa etapa é responsável por 98% ($5,59 \cdot 10^{-2}$ kg CO_{2eq.}) dos impactos relacionados ao aquecimento global e responde por 99% da ecotoxicidade terrestre ($1,17$ kg 1,4-DCB), da depleção de recursos minerais ($5,73 \cdot 10^{-4}$ kg Cu_{eq.}) e do consumo de água ($1,69 \cdot 10^{-3}$ m³). Evidencia-se que a maior parte dessas cargas ambientais está atrelada à produção do componente relativo ao painel fotovoltaico, exceto a depleção de recursos minerais cuja contribuição é compartilhada entre a produção de

células fotovoltaicas e a estrutura do sistema. Já a etapa de Instalação da usina solar fotovoltaica se destaca como responsável por 94% ($1,58 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ a crop}_{\text{eq}}$) dos impactos relativos ao uso do solo.

Tabela 4 – Avaliação dos impactos ambientais da geração de 1 kWh de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos [Método de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H) ((24), caracterização)]

Categoria de impacto	Unidade	Etapas do ciclo de vida de módulos fotovoltaicos						Total
		Produção	Importação	Montagem	Instalação	Operação	Fim de Vida	
Aquecimento global	kg CO _{2eq}	$5,59 \cdot 10^{-2}$	$4,98 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-9}$	$6,11 \cdot 10^{-4}$	$5,73 \cdot 10^{-2}$
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	1,17	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-9}$	$6,47 \cdot 10^{-3}$	1,17
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	$2,98 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$1,98 \cdot 10^{-8}$	$3,58 \cdot 10^{-10}$	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$5,40 \cdot 10^{-3}$
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$9,95 \cdot 10^{-7}$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$3,82 \cdot 10^{-8}$	$4,85 \cdot 10^{-10}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$7,66 \cdot 10^{-3}$
Uso do solo	m ² a crop _{eq}	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-7}$	$8,87 \cdot 10^{-7}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-10}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$
Escassez de rec. minerais	kg Cu _{eq}	$5,73 \cdot 10^{-4}$	$3,00 \cdot 10^{-9}$	$2,17 \cdot 10^{-8}$	$3,07 \cdot 10^{-10}$	$1,10 \cdot 10^{-11}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$5,78 \cdot 10^{-4}$
Consumo de água	m ³	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$7,32 \cdot 10^{-7}$	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$8,12 \cdot 10^{-8}$	$1,93 \cdot 10^{-9}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$

De um modo geral, os resultados obtidos se revelam compatíveis com a literatura especializada disponível ((14, (29, (30). Tomando a categoria de impacto de aquecimento global como exemplo, pode-se observar que os seus resultados convergem com os obtidos em outros estudos de 0-30 g CO_{2eq}. ((14), 15 g CO_{2eq}. ((29) e 16 g CO_{2eq}. ((30) para a geração de 1 kWh de energia elétrica a partir de aerogeradores; e 50-75 g CO_{2eq}. ((14), 70 g CO_{2eq}. ((29) e 50 g CO_{2eq}. ((30) a partir de módulos fotovoltaicos. Para os aerogeradores, tal convergência se torna ainda mais evidente se forem descontadas as emissões de GEE ocorridas na etapa de Importação de componentes na medida em que esses estudos refletem a realidade da China e países da Europa. Portanto, apesar de não dominarem nenhuma das categorias de impacto consideradas, a etapa de Importação de componentes está atrelada a uma emissão relevante de GEE no caso dos aerogeradores ((31). Além disso, verificou-se, em ambos os casos, uma contribuição significativa da etapa de Fim de Vida para as categorias de ecotoxicidade de água doce e marinha, a qual se deve, sobretudo, ao inerente descarte de materiais dessas tecnologias de energia renovável ((14). Quando comparamos o desempenho ambiental de cada uma dessas cadeias, podemos observar que os módulos fotovoltaicos se revelam mais impactantes que os aerogeradores na maioria das categorias de impacto consideradas, são elas: aquecimento global, ecotoxicidade terrestre, uso do solo, escassez de recursos minerais e consumo de água. Por outro lado, os aerogeradores dominam as categorias relativas à ecotoxicidade de água doce e marinha (Figura 3).

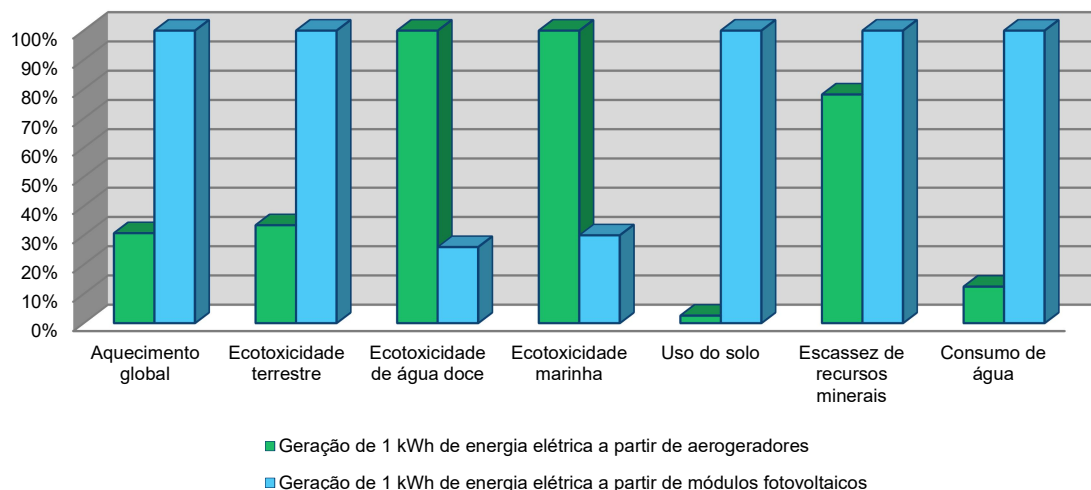


Figura 3 – Comparação dos impactos ambientais da geração de 1 kWh de energia elétrica a partir de aerogeradores e módulos fotovoltaicos [Método de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H) ((24), caracterização)]

4.2.2 Cenários do PDE 2026

Na Tabela 5 estão disponíveis informações dos cenários considerados para a expansão da geração de energia elétrica a partir da dupla de fontes solar fotovoltaica e eólica durante o período 2020-2026. Vale lembrar que o Cenário 1 corresponde ao cenário de referência do PDE 2026 ((1), no qual a capacidade instalada de geração eólica supera aquela da solar fotovoltaica. Já o Cenário 2 corresponde a uma situação inversa devido à redução no custo de investimento da fonte solar fotovoltaica, aumentando sua contribuição e reduzindo a da opção eólica ((1).

Tabela 5 – Informações dos cenários de expansão da geração de energia elétrica considerados

Fontes de geração	Fator de capacidade ((18)	Expansão da capacidade instalada 2020-2026 (MW)		Geração de energia da expansão 2020-2026 (TWh)	
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
Eólica	43%	11.824	10.030	1.481	1.274
Solar fotovoltaica	25%	7.000	10.508	537	705,41

Conforme apresentado na Figura 4, o Cenário 2 se revela como o mais impactante na maioria das categorias de impacto consideradas, são elas: aquecimento global, ecotoxicidade terrestre, uso do solo, escassez de recursos minerais e consumo de água; enquanto que o Cenário 1 se destaca nas categorias de ecotoxicidade de água doce e marinha. A partir desses resultados e considerando que todas as categorias de impacto possuem a mesma relevância ambiental, pode-se inferir que a geração de 1 kWh de energia elétrica proveniente do par de fontes eólica e solar fotovoltaica no Cenário 2, no período 2020-2026, está associada a maiores impactos ambientais quando comparada com a mesma geração de energia elétrica no Cenário 1. Assim, o Cenário 2 apresenta um desempenho ambiental inferior ao Cenário 1. Isso se deve não apenas a carga ambiental associada à etapa de Processamento de materiais e produção de componentes de painéis solares mas também ao menor rendimento – ou seja, a capacidade de gerar energia elétrica durante o mesmo período – da fonte solar fotovoltaica em comparação com a opção eólica.

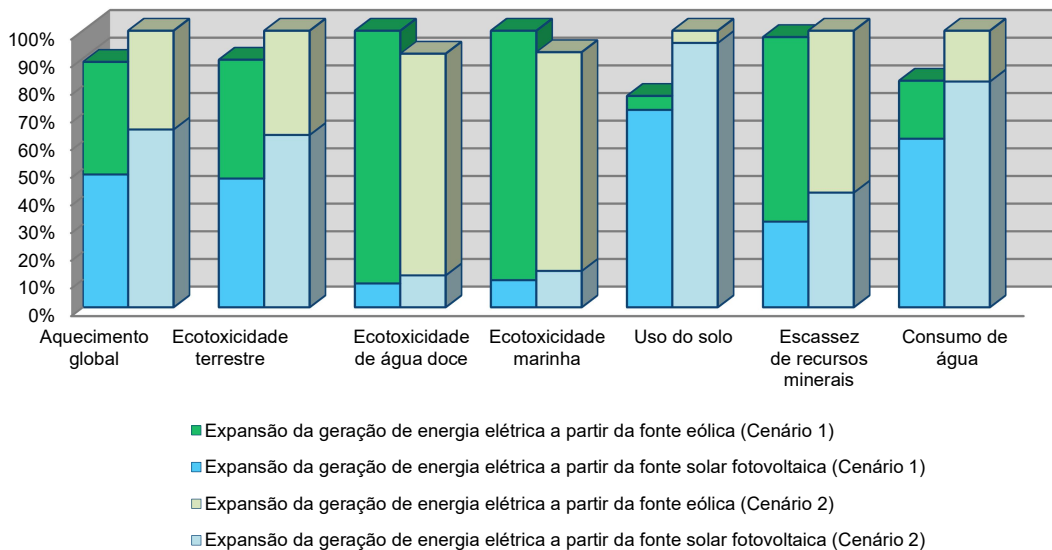


Figura 4 – Comparação dos impactos ambientais dos cenários de geração de energia elétrica da expansão das fontes eólica e solar fotovoltaica [Método de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (H) ((24), caracterização]

5.0 - CONCLUSÃO

Ao explorar os desempenhos ambientais das fontes renováveis mais promissoras para o país em um médio prazo, o presente estudo evidenciou a necessidade de iluminar as consequências ambientais inevitáveis, porém, não intencionais, da revolução energética em curso. Mais especificamente, revelou que a geração de energia elétrica a partir de aerogeradores apresenta menor impacto ambiental global quando comparada com a mesma geração a partir de módulos fotovoltaicos. Consequentemente, a avaliação da expansão da geração de energia elétrica proveniente das fontes eólica e solar fotovoltaica indicou um desempenho ambiental melhor para o cenário com a maior expansão da capacidade instalada da opção eólica. Cabe ressaltar que esse resultado não tem a pretensão de apontar o caminho mais adequado para a matriz energética nacional uma vez que isso depende de outros fatores além do ambiental, como técnicos, locais, econômico-financeiros, de políticas públicas etc.

A partir de uma análise mais profunda dos resultados, é possível inferir também que a ampliação de componentes e subcomponentes de aerogeradores e módulos fotovoltaicos produzidos no país contribuirá para a mitigação das emissões de GEE, tanto na etapa de processamento de materiais e produção de componentes, uma vez que a matriz energética nacional é mais limpa; quanto na etapa de importação. A contrapartida dessa demanda global é o inevitável deslocamento para o território nacional de impactos locais e regionais atrelados à etapa de produção.

Por fim, tendo em vista a escalada sem volta da sustentabilidade como um valor da sociedade, este estudo vem sendo ampliado de modo a abarcar também as suas dimensões econômica e social. Atualmente, novas ideias do pensamento do ciclo de vida estão sendo desenvolvidas visando a consideração dos três pilares da sustentabilidade.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Brasil (2017) Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília: MME/EPE;
- (2) Brasil (2018) Balanço Energético Nacional 2018: Ano Base 2017. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: EPE;
- (3) WCDE (1987) Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. New York: Oxford University Press;
- (4) IEA (2002) Renewable Energy Working Party 2002. Paris: International Energy Agency;
- (5) Yergin, D. (2018) A busca: energia, segurança e a reconstrução do mundo moderno. Rio de Janeiro: Intrínseca;
- (6) Sachs, I. (2005) Da civilização do petróleo a uma nova civilização verde. Estudos Avançados, Vol. 19, No. 55, pp. 197-214;
- (7) Brasil (2016) Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para a consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASILiNDC-portugues.pdf;
- (8) Dias, C. (2017) Modelos de avaliação de desempenho de diferentes tecnologias de geração fotovoltaica: estudo de caso para a Região dos Lagos. 239 f. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro;
- (9) Sachs, I. (2007) A revolução energética do século XXI. Estudos Avançados, Vol. 21, No. 59, pp. 21-38;
- (10) FAPESP (2007) Um future com energia sustentável: iluminando o caminho. São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); Amsterdam: InterAcademy Council; Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências;
- (11) DOE (2011) Critical Materials Strategy. Department of Energy of United States;
- (12) Voncken, J. (2016) The rare earth elements: an introduction. Springer International Publishing;
- (13) Pitron, G. (2018) La guerre des métaux rares: la face cachée de la transition énergétique et numérique. Paris: les liens qui libèrent;
- (14) Laurent, A.; Espinosa, N.; Hauschild, Z. (2018) LCA of Energy Systems. In M. Z. Hauschild et al. (eds), Life Cycle Assessment, Cham: Springer International Publishing.
- (15) Abraham, D. (2015) The Elements of Power: Gadgets, Guns, and the Struggle for a Sustainable Future in the Rare Metal Age. Yale: Yale University Press;
- (16) UNEP (2011) Recycling Rates of Metals: A status report. United Nations Environment Programme (UNEP);
- (17) ABDI (2014) Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI);
- (18) Tolmasquim (2016) Energia Renovável : Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE);
- (19) Sarker, P.; Islam, M.; Paul, A.; Ghosh, S. (2018) Solar Photovoltaic Power Plants: Necessity and Techno-Economical Development. Renewable Energy and the Environment, pp. 41-69;
- (20) ABDI (2018) Atualização do Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). FGV Projetos;
- (21) EC-JRC (2010) General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance, ILCD Handbook: International Reference Life Cycle Data System, Luxembourg: Publications Office of the European Union;
- (22) ISO 14040 (2006) ISO 14.040: Environmental management – Life Cycle Assessment: Principles and framework, Geneva: ISO copyright office;

- (23) ISO 14044 (2006) ISO 14.040: Environmental management – Life Cycle Assessment: Requirements and guidelines, Geneva: ISO copyright office;
- (24) Huijbregts, M.; Steinmann, Z.; Elshout, P.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Hollander, A.; Zijp, M.; Zelm, R. (2016) ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report I: characterization. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment;
- (25) Weidema, B.; Bauer, C.; Hischier, R.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.; Wernet, G. (2013) Overview and methodology. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- (26) ANEEL (2019) Banco de Informação de Geração (BIG). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>;
- (27) Chipindula, J.; Botlaguduru, V.; Du, H.; Kommalapati, R.; Huque, Z. (2018) Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. Sustainability, Vol. 10, No. 2022, pp. 1-18;
- (28) Ramos, C.; Ruiz, E.; Bicalho, F.; Barbosa, J.; Barros, L.; Rabassa, M. (2017) Cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil. Brasília: Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE);
- (29) Aden, N.; Marty, A.; Muller, M. (2010) Comparative Life-cycle Assessment of Non-fossil Electricity Generation Technologies: China 2030 Scenario Analysis. Project Report. CE 268 Civil System and the Environment;
- (30) Kabayo, J.; Marques, P.; Garcia, R.; Freire, F. (2018) Avaliação ambiental de ciclo de vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal. Anais do VI Congresso Brasileiro Sobre Gestão do Ciclo de Vida (GCV 2018), Brasília, pp. 409-414;
- (31) Angelakoglou, K.; Botsaris, P.; GaidajisIssues, G. (2014) Issues regarding wind turbines positioning: A benchmark study with the application of the life cycle assessment approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments, No. 5, pp. 7-18.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



João Gabriel Gonçalves de Lássio é doutorando do Programa de Planejamento Energético da COPPE (PPE/COPPE/UFRJ), mestre em Génie de la Mobilité Durable, especialidade Transport et Développement Durable, pela École Nationale de Ponts et Chaussées (2015), e graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2013). No seu doutorado, se dedica ao estudo sobre a incorporação de aspectos econômicos e sociais na avaliação de ciclo de vida (ACV) de sistemas energéticos. Atualmente, é bolsista do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), onde atua em estudos acerca de indicadores de sustentabilidade e impactos socioambientais gerados ao longo da cadeia produtiva de energia elétrica.



Denise Ferreira de Matos possui graduação em Geografia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (1994) e Mestrado em Estudos Populacionais e Pesquisas Sociais pela Escola Nacional de Ciências Estatísticas - ENCE/IBGE (2006). Atualmente, é doutoranda do Programa de Planejamento Energético da COPPE (PPE/COPPE/UFRJ) utilizando a avaliação de ciclo de vida (ACV) de uma planta heliotérmica para discutir questões de performance ambiental e impactos ambientais deste tipo de projeto. É pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), atuando nos seguintes temas: indicadores de sustentabilidade; impactos socioambientais de fontes renováveis e uso de sistemas de informações geográficas no planejamento de empreendimentos lineares.



David Alves Castelo Branco é professor adjunto do Programa de Planejamento Energético da COPPE (PPE/COPPE/UFRJ). Possui doutorado em Planejamento Energético pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2012). Possui experiência na área de Planejamento Energético, atuando principalmente nos seguintes temas: Mudanças Climáticas, especificamente na realização de inventários de emissões de gases de efeito estufa; tecnologias de baixo carbono; fontes renováveis de energia e avaliação de ciclo de vida (ACV).