



# XICBPE

CONGRESSO BRASILEIRO  
DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

CUIABÁ - MT

11 a 14 de setembro de 2018

## **Análise das ACV aplicadas na avaliação dos sistemas de geração de eletricidade em um contexto internacional e suas novas perspectivas**

### **RESUMO**

Nas últimas décadas, o consumo de energia elétrica e portanto a sua geração aumentou significativamente. Este aumento tem potencializado os efeitos e impactos sobre o meio ambiente. A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é um dos instrumentos de gestão ambiental de iniciativa privada que vem sendo usado para avaliar os sistemas de geração de energia elétrica. O principal objetivo da presente pesquisa é estabelecer o estado atual do uso da ACV na avaliação da geração de energia elétrica. Com base na revisão sistemática de trabalhos desenvolvidos em diferentes regiões do mundo, faz-se uma análise de trabalhos internacionais de ACV aplicados a estes sistemas, considerando-se diferentes fontes geradoras. Neste contexto, são analisados os parâmetros da ACV para determinar as principais diferenças em suas aplicações e determinar pontos fracos no seu desenvolvimento. Também são identificados os aspectos e impactos ambientais mais relevantes do ciclo de vida da geração de eletricidade. Finalmente, são estudadas novas perspectivas e abordagens metodológicas para o uso da ACV na avaliação desta atividade.

**Palavras-chave:** Análise de Ciclo de Vida, Inventário de Ciclo de Vida, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, Sistemas de Geração de Eletricidade.

## ABSTRACT

Over the past decade, energy consumption has increased and consequently has driven the need to increase the amount of energy that is generated. This increase of energy generation has resulted in some adverse environmental impacts. The objective of the research is to conduct a general review of the Life-Cycle Analysis (LCA)<sup>1</sup> with an emphasis on energy generation as well as new approaches of the LCA. Based on systematic review of academic research papers from different world regions, the analysis was done about LCA applied on power plants which use renewable and non-renewable resources. A general context of LCA applied to those kinds of systems was established. Furthermore, the LCA parameters were analyzed to find the main issues about LCA application and identify their weaknesses. The study also identifies the most relevant environmental aspects and impacts of electricity generation life-cycle. Finally, this research reviewed new methodological approaches about LCA usage to assess energy generation.

**Keywords:** Life-Cycle Analysis, Life-Cycle Inventory, Life-Cycle Environmental Assessment, Electricity Power Systems

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia no mundo tem aumentado de forma dramática com conseqüente aumento das emissões de CO<sub>2</sub>. A título de exemplo, entre 1990 e 2008, o consumo de energia aumentou 40%. Em 2010, o 68% da energia utilizada globalmente teve como fonte recursos fósseis (p.e. carvão, gás natural, e petróleo), sendo a geração de eletricidade a responsável por 40% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (IEA, 2010 apud TURCONI, 2013).

A sustentabilidade da geração de eletricidade pode ser analisada desde várias abordagens, uma destas é a abordagem dos efeitos e/ou impactos que podem ser produzidos no meio ambiente (entendido como a interação entre as dimensões biofísica, sócio-política e técnico-econômica) por esta atividade. Um

---

<sup>1</sup> The Life-Cycle Analysis (LCA) is an environmental management instrument of private initiative that can assess electric power generation.

exemplo é que a geração de eletricidade a partir de fontes não renováveis é chave na contribuição de Gases de Efeito Estufa (GEE) em uma escala Global e emissão de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> em escala local (GAGNON, 2002); (TURCONI *et al.* 2013). A emissão destes gases tem como principais efeitos as mudanças climáticas (intensificação dos eventos de precipitação, intensificação do verão e aumento dos riscos das secas, incremento dos furacões e picos dos ventos no trópico, intensificação das secas e as inundações associadas ao fenômeno de *El Niño*, aumento do nível do mar) e são as principais causas da chuva ácida (IPCC, 2001 apud GAGNON, 2002).

Quanto aos sistemas de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, GAGNON *et al.* (2002); FTHENAKIS e KIM (2009) descrevem que o aumento do uso destas fontes gera um aumento na demanda de grandes extensões de terra tanto para instalação de parques eólicos ou painéis solares quanto para cultivos para geração de biocombustíveis. Por outro lado, VARUN (2009) aponta que os impactos no ciclo de vida dos sistemas de energia renovável típicos são importantes quando são comparados, com sistemas convencionais baseados em combustíveis fósseis, para uma escolha racional de fontes de energia. Por esta razão, dentro da abordagem dos impactos ambientais produzidos por estas atividades, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) surge como opção para a avaliação da sustentabilidade, pois como argumenta TURCONI (2013) as ACV's são frequentemente aplicadas como ferramentas de apoio à tomada de decisão para a seleção entre diferentes alternativas que fornecem o mesmo produto ou serviço.

A Análise do Ciclo de Vida surgiu como um dos instrumentos de gestão ambiental privada frequentemente usada para analisar este tipo de atividade, especialmente focada em bens ou serviços, nesse caso específico a geração de eletricidade. Segundo a ISO 14040 (1997 apud VARUN *et al.*, 2009) ACV é a técnica para avaliar vários aspectos associados com o desenvolvimento de um produto e o seu potencial impacto através da vida útil do produto (p.e. “*do berço ao túmulo*”), partindo da aquisição das matérias primas, o processamento, a manufatura, o uso final e a sua disposição final. TURCONI (2013) descreve que uma ACV é geralmente desenvolvida em quatro etapas iterativas (objetivo, definição do escopo, análises do inventário, avaliação do impacto e interpretação) e é usado para quantificar os impactos ambientais com maior potencial relacionados ao produto ou serviço de interesse.

Por outro lado, HERTWICH *et al.* (2015) destaca os resultados das ACVs são frequentemente usados para analisar os custos e benefícios ambientais das medidas de mitigação climática que são geralmente de natureza estática e abordam usinas de geração de energia de forma individual. VARUN (2009) sinaliza que a força da ACV está na sua abordagem holística para estudar de um o produto/sistema e permitir evitar uma sob otimização resultado de focar só em alguns processos.

Neste contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo analisar a Análise de Ciclo de Vida aplicada às atividades de geração de energia elétrica baseados em fontes convencionais e não convencionais dentro de um panorama internacional. Primeiramente, trata-se de estabelecer um contexto atual da aplicação da Análise de Ciclo de Vida na avaliação de sistemas de geração de eletricidade. Posteriormente, o trabalho identifica os parâmetros básicos da ACV usados e analisa os aspectos e impactos ambientais identificados por meio das ACVs. Finalmente, são identificadas novas perspectivas e inovações da ACV focadas nos sistemas de geração de eletricidade.

## **2 METODOLOGIA**

Considerando o objetivo principal proposto, a metodologia adotada no desenvolvimento da presente pesquisa baseia-se em quatro etapas descritas a seguir:

- Etapa 1. Revisão bibliográfica de estudos internacionais de ACV aplicados na avaliação de diferentes sistemas de geração de eletricidade;
- Etapa 2. Identificação dos parâmetros básicos da ACV usados nestes sistemas;
- Etapa 3. Análise dos principais aspectos e impactos ambientais identificados; e
- Etapa 4. Estabelecimento de novas abordagens e perspectivas das ACVs para avaliação de sistemas de geração de eletricidade.

A análise das ACV usadas na avaliação dos sistemas de geração de eletricidades é focada na revisão dos diferentes parâmetros usualmente utilizados (unidade funcional, escopo, etapas, bancos de dados, softwares e métodos) e os resultados da ACV (sistemas de geração avaliados, aspectos e impactos ambientais).

### 3 RESULTADOS

Os principais resultados da pesquisa estão focados em quatro pontos: a) revisão bibliográfica, b) identificação dos sistemas de geração de eletricidade e dos parâmetros da usados nas ACVs, c) identificação dos principais aspectos e impactos ambientais destes sistemas, e d) estabelecimento de novas perspectivas da ACV para avaliar a geração de eletricidade.

#### 3.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica e documental realizada compreende livros, periódicos, e principalmente artigos científicos, onde foram identificados estudos desenvolvidos em diferentes contextos. Dentre estes, foram selecionados e analisados 5 estudos que no total refletem o resultado das análises de mais de 200 estudos de ACV em escala internacional entre os anos 1990 e 2015.

Inicialmente, o estudo realizado por GAGNON *et al.* (2002) analisou trabalhos feitos ao redor do mundo entre 1990 e 2001, estabelecendo uma base sobre o contexto das ACV no início do século XXI. Neste estudo é feita a análise das ACV's aplicadas aos diferentes sistemas de geração de eletricidade e as respectivas comparações. Para tanto, classificou os sistemas em contínuos (hidrelétricos e termelétricos) e intermitentes (solar fotovoltaico, eólico). Definiu também, os diferentes níveis de confiabilidade e flexibilidade dos sistemas. Além disso, foram estudados aspectos ambientais relacionados com emissão de Gases de Efeito Estufa (GGE), emissão de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, outras emissões, uso da terra, e consumo energético. Apresentou nas conclusões, que no período analisado, os sistemas com melhor desempenho eram a hidroeletricidade e os sistemas eólicos, mas sugeriu que devem ser incluídos os benefícios relacionados pois não são considerados na maioria das ACV's analisadas.

VARUN *et al.* (2009) fez uma revisão dos sistemas de geração elétrica baseados em fontes renováveis relacionada às ACV's com foco no consumo líquido de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Analisou pontualmente os sistemas eólicos, solar fotovoltaico e térmico, biomassa e hidroeletricidade; estes foram comparados com os sistemas convencionais e foi concluído que para uma ótima seleção das fontes para geração de eletricidade, deveria haver um mix de tecnologias de modo que a

pressão sobre o meio ambiente possa ser reduzida e a distribuição da eletricidade seja possível.

Por outro lado, FTHENAKIS e KIM (2009) expõem no seu estudo a relação direta entre a geração de energia elétrica e o uso da terra. Analisando fonte renováveis e não renováveis, realizaram os inventários focados no uso da terra e a pressão que cada um dos sistemas de geração exerce sobre este recurso. Estabeleceram que as energias renováveis em geral são menos intensivas e a geração de energia elétrica com sistemas solares fotovoltaicos é a mais vantajosa em áreas de alta insolação.

Em outro estudo, TURCONI *et al.* (2013) realizaram uma análise crítica de 167 casos de estudo compostos por diferentes sistemas de geração elétrica (convencionais e renováveis) e identificaram as emissões de GEE, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> para cada um dos sistemas analisados com base na análise de critérios mínimos para assegurar a comparabilidade dos dados (etapas avaliadas, unidade funcional e menos de 15 anos da ACV). Determinaram os aspectos chave de cada um dos sistemas e estabeleceram como aspectos metodológicos críticos da ACV a coerência e transparência na definição da unidade funcional, o método empregado e os limites do sistema. Aliás, ressaltaram que em modelagens futuras de ACV para geração de eletricidade deveriam ser incluídas afirmações claras sobre a aplicabilidade dos dados e as limitações metodológicas.

No estudo desenvolvido por HERTWICH *et al.* (2015) estabeleceram o estado da arte do desempenho tecnológico de diferentes tecnologias de geração elétrica, sistemas de baixa emissão de carbono e sistemas baseados em recursos fósseis, examinando os impactos ambientais e demandas de recursos na implementação global em grande escala. Também, foi feita uma análise dos potenciais requerimentos de recursos e impactos das tecnologias avaliadas dentro dos cenários de: mitigação das mudanças climáticas (Cenário Blue Map) e Business-as-Usual da Agencia Internacional da Energia (IEA, pelas siglas em inglês) para 2050, comparando seus resultados. Os autores encontraram que algumas ACV's de tecnologias individuais sugerem que, por unidade de geração elétrica, as usinas de baixa emissão de carbono tendem a requerer mais materiais do que as usinas alimentadas por combustíveis fósseis e deste modo poderiam levar ao incremento de outros impactos ambientais. Porém, no estudo é concluído que os sistemas de baixa emissão de carbono (eólica, Solar Fotovoltaica e Térmica) tem o

potencial de diminuir os efeitos e impactos relacionados às emissões dos GEE, Ecotoxicidade da água doce, eutrofização e exposição a materiais particulados (HERTWICH *et al.*, 2015 apud SINGH *et al.*, 2011); (HERTWICH *et al.*, 2015 apud ARVESEN e HERTWICH, 2012).

Além da análise dos estudos no contexto internacional anteriormente citados, foram selecionados 3 estudos específicos aplicados no México, Polônia e Ilhas Mauricio para avaliar exemplos da aplicação das ACVs em diferentes continentes e contextos específicos.

### 3.2 Identificação dos sistemas de geração de energia elétrica e parâmetros da ACV

Na identificação dos sistemas de geração analisados por meio da ACV, observou-se que os estudos abrangem diferentes sistemas de geração de energia elétrica<sup>2</sup>, podendo ser divididos em dois grupos de geração, sistemas de geração de fontes renováveis (FR) e de fontes não renováveis (FNR), sendo que em todos os estudos consultados foram analisados sistemas tanto de FR quanto de FNR, embora não em sua totalidade. A título de síntese, a Tabela 1 apresenta os resultados de uma forma sucinta.

Tabela 1 - ACV aplicadas na avaliação de sistemas de geração de energia.

EST.	PAIS ANO	SISTEMA GERAÇÃO	ESCOPO	ETAPAS AVALIADAS	UF	METODOLOGIA INVENTÁRIO	METODOLOGIA AICV
E1	Internacional I (2002)	HdrRes, Dsl, GN, Cv, Lgt, OC, HdrRoR, Biom, Ncr, Eol, SFv.	Inventário	Extração MP, Processamento MP, transporte, construção das usinas, produção da eletricidade e disposição final de resíduos.	1 kWh	NE	NA
E2	Internacional I (2009)	Eol, SFv, Ster, Biom, HdrRes, Cv, OC, GN, Ncr.	AICV	Construção das usinas, geração da eletricidade.	1 kWh; 1 MJ	Ecoinvent	NA
E3	Internacional I (2013)	Cv, Lgt, GN, OC, Ncr, Biom, HdrRes, SFv, Eol.	Inventario	Extração MP, processamento MP, transporte, construção das usinas, geração da eletricidade e	1 MWh	NE	NA

<sup>2</sup> Estas categorias compreendem: FR: Hidrelétrica (reservatório), Hidrelétrica (run-of-river), Biomassa, Eólica, Solar 9Fotovoltaica), Solar (térmica), Geotérmica, Biogas, Resíduos; FNR: Carvão, Óleo Combustível, Gás Natural, Diesel, Lignita (antigo), Nuclear. Para maior detalhe, deve ser consultada a referência específica do estudo.

EST.	PAIS ANO	SISTEMA GERAÇÃO	ESCOPO	ETAPAS AVALIADAS	UF	METODOLOGIA INVENTÁRIO	METODOLOGIA AICV
				disposição final de resíduos, descomissionamento.			
E4	International 3 (2015)	SFv, Ster, Eol, HdrRes, GN, Cv.	Inventario	NE	NE	ecoinvent 2.2 life-cycle inventory database; EXIOBASE input-output database;	ReCiPe version 1.08
E5	Internacional I (2009)	Cv, Ncr, GN, SFv, Eol, HdrRes, Biom.	Inventário	Extração MP, Processamento MP, Geração de Eletricidade, Transporte, Estocagem de combustíveis Manutenção, Disposição final de resíduos.	NE	Ecoinvent	NA
E6	México (2011)	OC, GN, Cv, Dsl, Ncr, HdrRes, Geot, Eol.	AICV	Extração MP, Processamento MP, Transporte, Construção de Usinas, Geração de Eletricidade, Descomissionamento e Disposição final de Resíduos.	225.079 GWh (2006) impactos/kWh	SENER, GEMIS, Ecoinvent	GaBi
E7	Ilhas Maurício (2015)	OC, Cv, Biom, HdrRes.	AICV	Extração MP, Geração de Eletricidade, Transmissão, Distribuição, Transporte, Disposição final de Resíduos e Descomissionamento.	1 MWh	Ecolnvent V2	SimaPro 7, CML 2 Baseline 2001 method
E8	Polônia (2016)	Cv, GN, OC, Ncr, HdrRes, Eol, Biom, Biog, SFv, Res.	AICV	Extração MP, Geração de eletricidade, Transmissão e Distribuição.	1 TJ	Ecolnvent 2.2	Impact2002 + method, GEMIS 4.8 e GaBi V.6

**LEGENDA:** E1: (Gagnon, Bélanger, & Uchiyama, 2002), E2: (Varun, Bhat, & Prakash, 2009), E3: (Turconi, Boldrin, & Astrup, 2013), E4: (Hertwich, et al., 2015), E5: (Fthenakis & Kim, 2009), E6: (Santoyo-Castelazo, Gujba, & Azapagic, 2011), E7: (Brizmohun, Ramjeawon, & Azapagic, 2015), E8:

<sup>3</sup> Inclui nove regiões no mundo: China, Índia, Europa, Norte América, OECD Pacífico OECD, América Latina, Ásia, África e Médio-Este).

(Lelek, Kulczycka, Lewandowska, & Zarebska, 2016). Sistemas de Geração: Cv (Carvão), OC (Óleo Combustível), GN (Gás Natural), Dsl (Diesel), Lgt (Lignita (antigo)), Ncr (Nuclear), HdrRes (Hidrelétrica (reservatório)), HdrRoR (Hidrelétrica (run-of-river)), Biom (Biomassa), Eol (Eólica), SFv (Solar fotovoltaica), Ster (Solar térmica), Geot (Geotérmica), Biog (Biogas), Res (Resíduos). AICV: Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida, MP: Materias Primas, UF: Unidade Funcional, NE: não é especificado, NA: Não aplicável.

A tabela anterior mostra os sistemas de geração avaliados e também apresenta os parâmetros considerados das ACVs. Foi observado que o escopo dos estudos varia entre os que somente chegam até a etapa do inventário (principalmente de emissões) e outros que realizam a ACV completa incluindo a avaliação dos impactos. Na maioria dos estudos foram incluídas a totalidades das etapas de geração elétrica, desde a extração, processamento, transporte, construção da usina e a infraestrutura de apoio, geração da eletricidade (operação), transmissão, e disposição final dos resíduos; a etapa que menos é incluída é a de desinstalação das usinas. Não obstante, ao fazerem análises de diferentes sistemas, as etapas a serem avaliadas tem uma grande variação, principalmente entre sistemas baseados em recursos não renováveis (também referenciados como sistemas convencionais) e os sistemas renováveis.

Outro aspecto analisado foi a Unidade Funcional, ponto chave no desenvolvimento da ACV. Foram identificadas diferentes unidades funcionais, geralmente expressas em energia gerada (Wh) e em outros casos em potência (J). O inventário de ciclo de vida foi realizado na maioria dos estudos usando o banco de dados do Ecolnvent. Os softwares e métodos usados para a avaliação de impacto variam quase em todos os estudos.

### 3.3 Análise das ACV aplicadas nos sistemas de geração de energia

Também foram analisados os estudos quanto aos aspectos e impactos ambientais avaliados nos diferentes contextos e sistemas de geração. A seguir, na Tabela 2, são resumidos os principais aspectos e impactos ambientais identificados.

Tabela 2 - Aspectos e impactos ambientais identificados nas ACV de geração elétrica.

<b>SIGLA</b>	<b>ASPECTOS AMBIENTAIS</b>	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS</b>
E1	Emissão GEE, NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub> , Demanda de terra, Consumo Energia (Taxa de retorno energética).	Foco nos impactos biofísicos que podem ser quantificados. Danos na saúde e poluição por mercúrio.
E2	Emissão CO <sub>2</sub> e Consumo de Energia (Tempo de retorno energético)	NE
E3	Emissão GEE, NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub>	NE
E4	Emissão GEE, demanda de materiais	Acidificação, Eco-toxicidade aquática.

SIGLA	ASPECTOS AMBIENTAIS	IMPACTOS AMBIENTAIS
	(alumínio, ferro, cobre e aço), consumo de energia, demanda de terra.	
E5	Ocupação da terra.	NE
E6	Emissão de GEE, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , e N <sub>2</sub> O.	GWP, Potencial de diminuição abiótica, acidificação potencial, Eutrofização potencial, Eco-toxicidade aquática (doce e marinha), Toxicidade Humana potencial, potencial de depleção da camada de ozônio, Potencial de produção de ozônio fotoquímico, Eco-toxicidade Terrestre potencial.
E7	NE	Potencial de esgotamento de recursos abióticos, Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Eutrofização, Eco-toxicidade Aquática (água doce e marinha) Potencial, Toxicidade Humana Potencial, Potencial de Esgotamento da camada de Ozônio, Eco-toxicidade Terrestre.
E8	Consumo de Energia, demanda de materiais (alumínio, ferro, cobre e aço), Emissões MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Rejeito de poluentes (zinco, alumínio, cobre).	*Potencial de esgotamento de recursos abióticos, Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Eutrofização, Eco-toxicidade Aquática (água doce e marinha) Potencial, Toxicidade Humana Potencial, Potencial de Esgotamento da camada de Ozônio, Potencial de criação de Oxidantes Fotoquímicos, Eco-toxicidade Terrestre.

Desta forma, de acordo com a Tabela 2, os principais aspectos ambientais analisados nas ACVs dos sistemas de geração de energia elétrica estão relacionados com as emissões de GEE, os quais são relacionados com os impactos de Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential – GWP), e emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> relacionadas com Potencial de Acidificação e Eutrofização. Outros aspectos analisados, mas não em todos os estudos, foram o consumo de energia e a ocupação da terra. Também foram avaliados impactos de Eco-toxicidade aquática (água doce e marinha) e o Potencial de esgotamento de recursos abióticos.

### 3.4 Novas perspectivas das ACV na geração de energia elétrica

Dentre as novas perspectivas cabe destacar abordagens como a de MUTEL *et al.* (2012) que incluem a dimensão espacial dentro da ACV propondo uma técnica para determinar apropriadamente o suporte espacial para os métodos de avaliação de impactos regionalizada e uma metodologia de acoplamento destes métodos com inventários regionalizados. O uso deste tipo de ferramentas é um grande avanço nas ACV pois podem ser produzidas informações mais robustas dando um maior apoio planejamento de sistemas de geração de energia elétrica.

Outra abordagem é apresentada por BEN AMOR *et al.* (2014) que demonstram a utilidade da análise de comercialização da eletricidade para integrar a dinâmica de curto prazo no fornecimento de eletricidade e refinar os resultados da ACV e sua importância na escolha de diferentes modelos de fornecimento de eletricidade.

Por outro lado, JONES *et al.* (2017) estudaram as abordagens de ACV e Análise de Energia Líquida para analisar a geração distribuída de eletricidade de uma forma exploratória, dando um ponto de partida para a integração destes métodos de avaliação de sustentabilidade ambiental focadas à tomada de decisão para a geração de eletricidade em cenários de oferta da totalidade de energia em uma escala regional ou nacional.

#### **4 CONCLUSÕES**

A presente pesquisa permitiu estabelecer um contexto internacional geral do estado das ACVs usadas para avaliar a geração de eletricidade e identificar os principais sistemas, observando diferenças entre os sistemas convencionais e os renováveis. Dependendo porém das análises e das etapas avaliadas para cada sistema, o resultado da avaliação pode ter uma variação considerável inclusive analisando o mesmo tipo de sistema.

Dentre os parâmetros da ACV deveria ser estabelecida como unidade funcional padrão os Wh. Quanto à avaliação de impacto ambiental, ainda não são bem detalhados os procedimentos ou modelos adotados pelos softwares para gerar os resultados de impacto.

E evidente na maioria dos estudos o foco dado à estimativa de emissões de GEE e os impactos relacionados como o GWP, o potencial de acidificação e eutrofização produto das emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>. Dos estudos consultados, o sistema com melhor desempenho ambiental é a hidroeletricidade, destacando-se a variação da avaliação quando são incluídos os benefícios complementares dos reservatórios. O sistema com pior desempenho é a geração com uso de carvão. Tecnologias como a geração eólica e solar possuem um desempenho bom porém apresentam algumas limitações quando são avaliados os materiais e a produção dos geradores ou os painéis fotovoltaicos. Dos sistemas convencionais que usam recursos fósseis o gás natural possui o melhor desempenho.

À luz da análise realizada, sugere-se que novos estudos de ACV sejam feitos para aprimorar os aspectos metodológicos focados na geração de energia elétrica ou para abordar a geração distribuída que vem sendo objeto de diversas políticas públicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATILGAN, B., & AZAPAGIC, A. (2016). An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. *Energy Policy*, 168-186.
- BEN AMOR, M., GAUDREAU, C., PINEAU, P.-O., & SAMSON, R. (2014). Implications of integrating electricity supply dynamics into life cycle assessment: A case study of renewable distributed generation. *Renewable Energy*, 410-419.
- BRIZMOHUN, R., RAMJEAWON, T., & AZAPAGIC, A. (2015). Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, 565e575.
- FTHENAKIS, V., & KIM, H. (2009). Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1465–1474.
- GAGNON, L., BÉLANGER, C., & UCHIYAMA, Y. (2002). Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. *Energy Policy*, 1267–1278.
- HERTWICH, E., GIBONA, T., BOUMAN, E., ARVESEN, A., SUH, S., HEATH, G., . . . SHI, L. (2015). Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, 6277–6282.
- JONES, C., GILBERT, P., RAUGEI, M., MANDER, S., & LECCISI, E. (2017). An approach to prospective consequential life cycle assessment and net energy analysis of distributed electricity generation. *Energy Policy*, 350–358.
- LELEK, L., KULCZYCKA, J., LEWANDOWSKA, A., & ZAREBSKA, J. (2016). Life cycle assessment of energy generation in Poland. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-14.
- MUTEL, C., PFISTER, S., & HELLWEG, S. (2011). GIS-Based Regionalized Life Cycle Assessment: How Big Is Small Enough? Methodology and Case Study of Electricity Generation. *Environmental Science & Technology*, 1096-1103.
- PEARSE, D., & TURNER, K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press.

- SANTOYO-CASTELAZO, E., GUJBA, H., & AZAPAGIC, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 1488e1499.
- TURCONI, R., BOLDRIN, A., & ASTRUP, T. (2013). Life Cycle Assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 555–565.
- VARUN, BHAT, I., & PRAKASH, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1067–1073.