



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GIA/17

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XI

GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS - GIA

AValiação Comparativa de Desempenho Ambiental na Substituição da Energia Elétrica Originada de Fontes Não Renováveis pela Geração de Energia Eólica

**Tiago Chagas de Oliveira Tourinho (*)
FURNAS**

RESUMO

Em 2015, as emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiram 462,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, indicativo da importância de se substituir fontes térmicas de geração de energia elétrica por fontes menos poluentes. Este trabalho avalia comparativamente o desempenho ambiental, substituindo 82,27% da Energia Térmica brasileira de fontes não renováveis (ETS) por energia eólica, utilizando-se o programa SimaPro. Como resultado, verifica-se que: a ETS apresenta-se como mais impactante em quatorze das dezoito categorias intermediárias analisadas; há uma redução de impacto potencial de 98,32% devido à substituição; onze categorias apresentam uma redução de impacto acima de 90%.

PALAVRAS-CHAVE

Comparação, Desempenho Ambiental, SimaPro, Energia Não Renovável, Energia Eólica

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente, a sociedade tem se mostrado mais preocupada com assuntos como a depleção de recursos naturais e os impactos ambientais de suas atividades (KALAKUL *et al.*, 2014). Muitas indústrias e empresas têm dado maior importância aos reflexos de suas atividades ao meio ambiente, sendo indicativo de que a análise ambiental se tornou quesito relevante quando se trata de inovação e aprimoramento de tecnologias voltadas à sustentabilidade.

Assume-se como um dos temas que mais gera preocupações ambientais, o aquecimento global, promovido, sabidamente, pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa. Em 2015, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 462,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) equivalente, sendo o setor elétrico brasileiro responsável pela emissão de 139,6 kg CO₂, em média, para produzir 1 MWh (EPE, 2016a).

No Brasil, a oferta interna de energia, em 2015, atingiu 299,2 Mtep. No mesmo período, as energias renováveis aumentaram sua participação, em parte devido ao incremento da geração à base de biomassa e eólica. Esta última fonte produziu 21,6 TWh no citado ano (ver Figura 1), cifra que ultrapassou a geração nuclear em 2015 (EPE, 2016a). Acrescente-se que, atualmente, a capacidade eólica é estimada em 10.564 MW, com mais de 400 usinas instaladas no país (ANEEL, 2017).

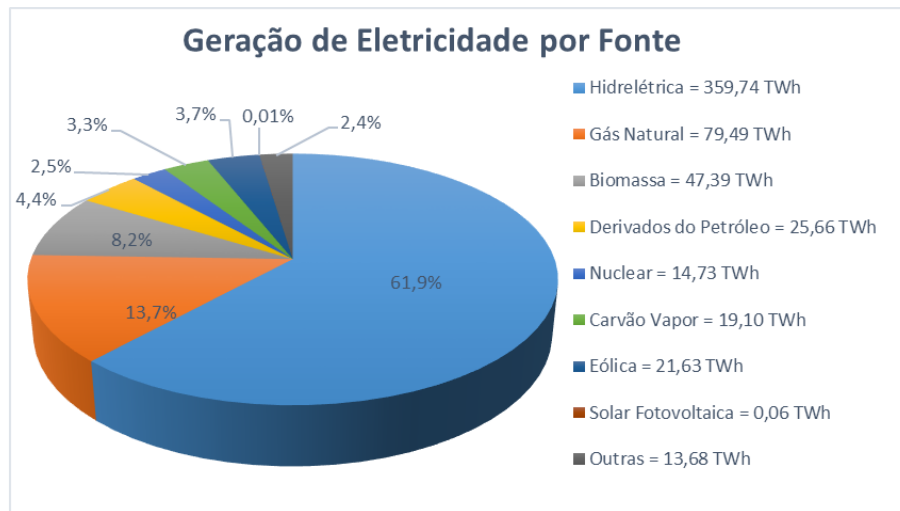


FIGURA 1 – Geração de Eletricidade por Fonte no Brasil, em 2015
Adaptado de: EPE (2016b).

A gradual substituição das fontes térmicas de geração de eletricidade por fontes menos poluentes, como a eólica, pode ser tida como necessária para reduzir as emissões de CO₂. Isto se apresenta possível, pois a estimativa do potencial eólico-elétrico disponível no Brasil, de acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, alcança 143,5 GW, com uma geração elétrica de 272,2 TWh/ano (CEPEL, 2001).

Apesar da escolha de uma tecnologia, em detrimento de outras, apresentar múltiplos critérios, o fator técnico-econômico frequentemente prevalece, sendo um dos motivos a complexidade em se analisar o aspecto ambiental. Esta complexidade, aliada à necessidade da promoção da sustentabilidade, estimulou a implementação de ferramentas de gestão para auxiliar nas tomadas de decisões, logísticas e processuais, sendo uma dessas ferramentas a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), orientada pela série de normas ISO 14040, que pode ser aplicável a produtos, serviços e diferentes processos (ABNT, 2009a). Neste âmbito, a ACV apresenta-se como uma ferramenta de gestão ambiental que considera novos quesitos ambientais, além dos normalmente considerados no processo decisório.

A ACV quantifica e avalia os aspectos ambientais e seus impactos potenciais, associados ao ciclo de vida de um serviço, processo, atividade ou produto e seu estudo compreende quatro fases (ver Figura 2): i) definição de objetivo e escopo; ii) análise de inventário; iii) avaliação de impacto; e, iv) interpretação (ABNT, 2009a). Esta ferramenta leva em consideração um ciclo de vida completo do produto, desde a extração de recursos, produção, uso, reciclagem e a disposição final de resíduos. Apesar desta análise ter componentes subjetivos em alguns aspectos, como as fronteiras do sistema, definição de objetivos e escopo, além dos resultados poderem ser determinados por dados limitados com confiabilidade desconhecida, a ACV é amplamente utilizada para a tomada de decisão em seleção de processos, projetos e otimização (PIERAGOSTINI *et al.*, 2012).

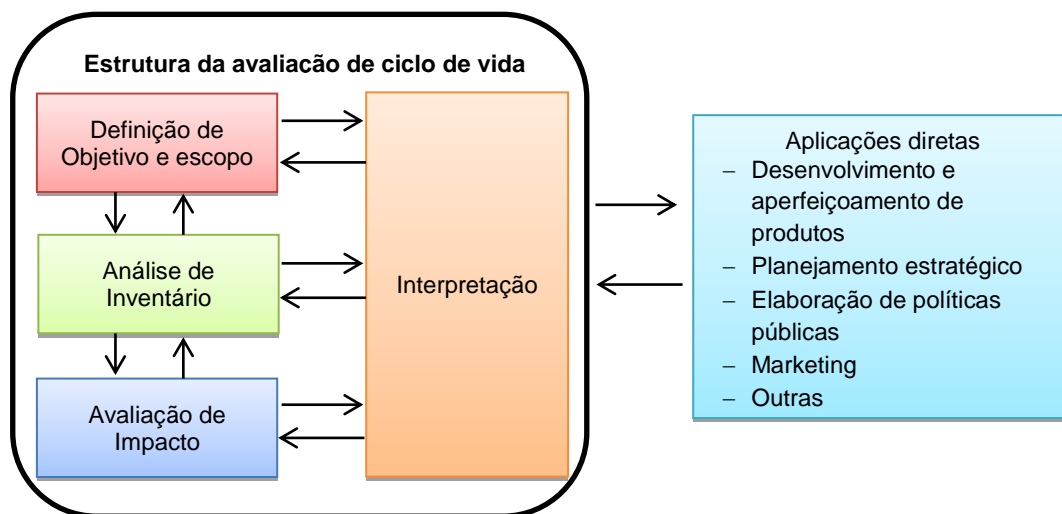


FIGURA 2 – Fases de uma ACV
Adaptado de: ABNT (2009a).

O objetivo e o escopo da ACV têm a função de esclarecer o motivo de sua realização e a abrangência do estudo. Dentre outros itens, deve-se mencionar (ABNT, 2009b):

- O sistema de produto do estudo – conjunto de processos elementares, que desempenha uma ou mais funções definidas e que modela seu ciclo de vida;
- A unidade funcional (UF) – define a quantificação das funções identificadas do produto, fornecendo uma referência em relação à qual os dados de entrada e saída são relacionados. Permite a comparação de diferentes sistemas;
- A fronteira do sistema – conjunto de critérios que determina quais processos elementares devem ser incluídos na ACV;
- A metodologia de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e tipos de impacto – determina quais categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização serão incluídos no estudo da ACV. A AICV auxilia na transformação das entradas e saídas em um número de impactos ambientais;
- Os pressupostos – as premissas que foram adotadas; e
- A existência de elementos opcionais, como: normalização (cálculo de magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência) e ponderação (conversão e possível agregação dos resultados normalizados utilizando pesos baseados em escolha de valores).

A análise de inventário de ciclo de vida (ICV) envolve a coleta de dados (compilação) e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. Esta etapa é posteriormente utilizada na AICV, a qual visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais. Estes são calculados por métodos de AICV (GOEDKOOOP *et al.*, 2008), os quais auxiliam na modelagem dos efeitos dos aspectos ambientais no objeto de estudo, sugerindo categorias de impacto que serão afetadas (exemplo: mudanças climáticas, eutrofização, depleção de recursos, danos à saúde humana, etc.) e quantificando estes efeitos.

Por fim, a Interpretação do Ciclo de Vida é a fase da ACV em que as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto, identificando questões significativas e tirando conclusões.

2.0 - OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação comparativa de desempenho ambiental, apresentando a diferença de impacto ambiental potencial gerado caso 82,27% da energia elétrica (EE) brasileira proveniente de fontes não renováveis sejam substituídos por energia eólica. Busca-se, também, identificar as categorias de impacto mais afetadas em cada um dos dois processos de produção de EE estudados.

3.0 - METODOLOGIA

Foram obtidos dados do Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 (EPE, 2016b). A partir destes dados, realizou-se uma avaliação comparativa do ciclo de vida de dois processos: i) produção de energia elétrica da forma convencional (atual matriz elétrica brasileira); e, ii) energia elétrica eólica, representando uma forma mais sustentável ao substituir fontes não-renováveis da matriz existente.

Os dados do Balanço Energético Nacional de 2016 foram obtidos na literatura disponibilizada pelo próprio governo brasileiro. Em seguida, as informações foram inseridas em um programa computacional (software) específico para a realização de ACV: o SimaPro 7.2 (PRé Consultants).

Os sistemas de produto em estudo são os processos de produção de energia elétrica de: i) fontes não renováveis (neste caso, energia térmica) e, ii) fonte eólica. A unidade funcional (UF) escolhida foi: a produção de 124248 GWh. A análise se limitou à geração anual da energia elétrica.

Alimentando o programa com esse dado, é possível obter o ICV, sendo a compilação dos resultados realizada e apresentada pelo próprio ambiente computacional. Os dados das entradas e saídas do estudo são obtidos da base de dados suíça Ecoinvent (disponível no programa). Todos os conjuntos de dados são lidos e comentados antes de seu armazenamento na base de dados, tendo responsáveis pela revisão interna ou validação destes dados (FRISCHKNECHT *et al.*, 2007).

No cálculo do impacto, são utilizados métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), cujo objetivo é conectar, na medida do possível e do desejável, cada resultado do inventário de ciclo de vida (ICV) ao impacto ambiental correspondente (mudanças climáticas, danos ao ecossistema, etc.), utilizando fatores de caracterização (potencial de aquecimento global, potencial de depleção da camada de ozônio, etc.) (HUMBERT *et al.*, 2012).

O método selecionado para a realização da AICV foi o ReCiPe 2008, pois apresenta harmonização entre categorias intermediárias de impacto e pontos finais de categoria, além de representar o estado da arte relacionado à AICV na Holanda (GOEDKOOPE *et al.*, 2013).

Para levantar o inventário das substâncias e realizar a AICV, utilizou-se o próprio programa SimaPro 7.2, executando-se as etapas de classificação, caracterização, normalização e ponderação.

Na energia térmica substituível (ETS), consideraram-se as parcelas de carvão vapor, gás natural, óleo combustível e óleo diesel, todas disponíveis no balanço nacional (EPE, 2016b). Estas foram substituídas pelos dados da energia eólica oriunda da união europeia (informação disponível no programa computacional). Neste estudo foram considerados módulos para as usinas eólicas de 800kW e de 2MW, ambas offshore.

Os dados compilados de matérias primas (entradas) e das emissões, efluentes e resíduos (saídas) para o meio ambiente, totalizam 820 substâncias, das quais 449 não são contempladas pelo método ReCiPe 2008 (PRÉ CONSULTANTS, 2010).

4.0 - RESULTADOS

Para a etapa de classificação e caracterização, dezoito categorias intermediárias de impacto foram analisadas, a saber: Mudanças Climáticas (MC); Redução da Camada de Ozônio (RCO); Toxicidade Humana (TH); Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF); Formação de Material Particulado (FMP); Radiação Ionizante (RI); Acidificação Terrestre (AT); Eutrofização da Água Doce (EAD); Eutrofização Marinha (EM); Ecotoxicidade Terrestre (ETT); Ecotoxicidade da Água Doce (ETD); Ecotoxicidade Marinha (ETM); Ocupação de Terra Agrícola (OTA); Ocupação do Solo Urbano (OSU); Transformação de Área Natural (TAN); Depleção Hídrica (DH); Depleção de Recursos Minerais (DRM); Depleção de Combustíveis Fósseis (DCF). A comparação de cada categoria, a nível intermediário de impacto, pode ser observada na Figura 3.

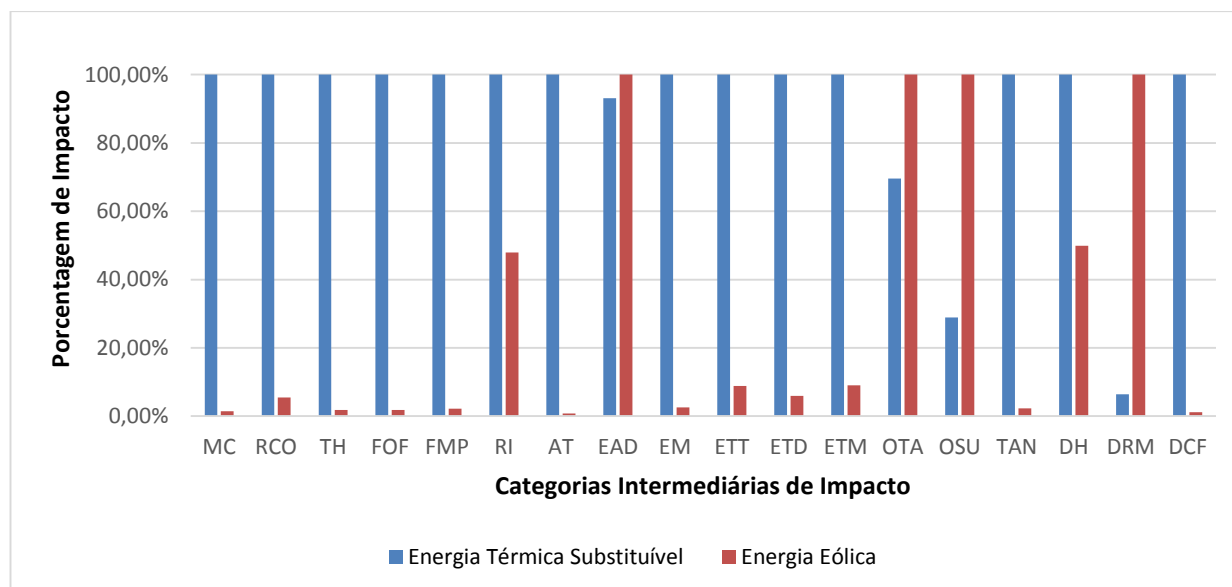


FIGURA 3 - Classificação e caracterização do inventário da análise. Legenda: MC – Mudanças Climáticas; RCO – Redução da Camada de Ozônio; TH – Toxicidade Humana; FOF – Formação de Oxidantes Fotoquímicos; FMP – Formação de Material Particulado; RI – Radiação Ionizante; AT – Acidificação Terrestre; EAD – Eutrofização da Água Doce; EM – Eutrofização Marinha; ETT – Ecotoxicidade Terrestre; ETD – Ecotoxicidade da Água Doce; ETM – Ecotoxicidade Marinha; OTA – Ocupação de Terra Agrícola; OSU – Ocupação do Solo Urbano; TAN – Transformação de Área Natural; DH – Depleção Hídrica; DRM – Depleção de Recursos Minerais; DCF – Depleção de Combustíveis Fósseis.

Na Figura 3, o eixo vertical apresenta o impacto potencial em porcentagem, estipulando o valor de 100% para o processo de produção de eletricidade mais impactante em cada uma das categorias, e o valor do outro processo na mesma categoria intermediária é apresentado em relação ao mais impactante dentro de cada uma das categorias. Na categoria intermediária MC (Mudanças Climáticas), por exemplo, o componente mais impactante é a “Energia Térmica Substituível” (ETS), ou seja, a qual foi atribuída a porcentagem de impacto de 100% (máxima), sendo a porcentagem de impacto da Energia Eólica, expressada em relação à primeira.

Da análise da Figura 3, observa-se que, das dezoito categorias analisadas, a ETS foi a mais impactante em quatorze delas, enquanto a energia eólica foi a mais impactante em quatro, a saber: Eutrofização da Água Doce, Ocupação de Terra Agrícola, Ocupação do Solo Urbano e Depleção de Recursos Minerais.

Visando uma comparação das pontuações únicas de impacto dos processos, realizaram-se as etapas de normalização e ponderação nos dados de inventário classificados e caracterizados. As categorias “Depleção Hídrica” e “Eutrofização Marinha” não são consideradas nesta etapa da análise, pois uma limitação do método ReCiPe 2008 é a ausência de pontos finais de categoria para estas duas. Os resultados desta etapa são apresentados na Tabela 1, assim como sua representação gráfica é apresentada na Figura 4.

TABELA 1 – Resultados normalizados e ponderados dos processos avaliados

Categorias de impacto	Unidade	Energia Térmica Substituível	Energia Eólica	% de redução de impacto
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	Pontos (Pt)	4,19E+09	5,89E+07	98,60%
Redução da Camada de Ozônio		5,46E+04	2,51E+03	95,41%
Toxicidade Humana		2,25E+10	4,11E+08	98,17%
Formação de Oxidantes Fotoquímicos		1,24E+05	2,20E+03	98,22%
Formação de Material Particulado		5,95E+08	1,32E+07	97,79%
Radiação Ionizante		1,05E+05	5,05E+04	52,09%
Mudanças Climáticas (Ecossistema)		3,82E+08	5,36E+06	98,60%
Acidificação Terrestre		2,51E+06	1,95E+04	99,23%
Eutrofização na Água Doce		7,95E+03	8,54E+03	-7,36%
Ecotoxicidade Terrestre		9,89E+05	8,77E+04	91,13%
Ecotoxicidade da Água Doce		4,23E+04	2,51E+03	94,05%
Ecotoxicidade Marinha		1,15E+05	1,03E+04	91,00%
Ocupação de Terra Cultivável		4,71E+04	6,75E+04	-43,15%
Ocupação de Terra Urbana		1,31E+05	4,54E+05	-246,56%
Transformação da Área Natural		8,90E+06	2,53E+06	71,61%
Depleção de Recursos Minerais		7,31E+04	1,14E+06	-1462,68%
Depleção de Combustíveis Fósseis		5,42E+09	6,30E+07	98,84%
Total	Pt	3,31E+10	5,56E+08	98,32%

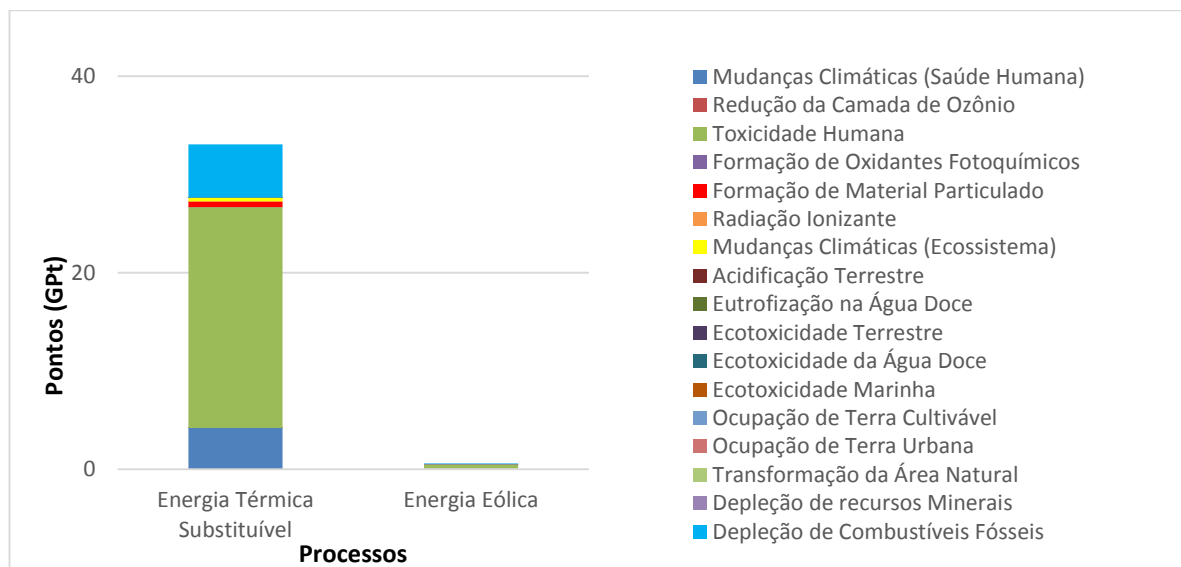


FIGURA 4 – Pontuações únicas dos processos analisados

Por meio da Tabela 1, é possível observar que ao se substituir a energia térmica não renovável por energia eólica, verifica-se uma redução de impacto ambiental potencial total da ordem de 98,32%. Além disso, onze categorias apresentam uma redução de impacto acima de 90%. Por outro lado, a Eutrofização da Água Doce, a Ocupação de

Terra Agrícola, a Ocupação do Solo Urbano e a Depleção de Recursos Minerais continuam sendo as categorias mais impactadas pela energia eólica, ao se considerar as entradas e saídas referentes ao processo.

A Figura 4 apresenta as pontuações únicas de impacto, após normalização e ponderação. Ela representa a diferença de impacto ambiental potencial entre os dois processos estudados. É possível observar que a energia eólica causaria um impacto potencial consideravelmente inferior à utilização da ETS, como é feito atualmente. Nesta figura fica evidente a contribuição de impacto que a ETS, proveniente de fontes não renováveis, tem sobre o meio ambiente.

A partir da Tabela 1, é possível observar as categorias de impacto com contribuição superior a 0,1% do impacto potencial total de cada processo (ver Tabela 2).

TABELA 2 – Categorias de impacto com contribuição de impacto superior a 0,1%

Categorias de impacto	Energia Térmica Substituível	Energia Eólica
Mudanças Climáticas (Saúde Humana) - MCH	12,7%	10,6%
Toxicidade Humana - TH	67,9%	74,0%
Formação de Material Particulado - FMP	1,8%	2,4%
Mudanças Climáticas (Ecossistema) - MCE	1,2%	1,0%
Transformação da Área Natural - TAN	-	0,5%
Depleção de Recursos Minerais - DRM	-	0,2%
Depleção de Combustíveis Fósseis - DCF	16,4%	11,3%

Da análise da Tabela 2, observa-se que dentre as categorias analisadas na pontuação única, as mais impactadas na ETS são TH, DCF, MCH, FMP e MCE. Na produção da energia eólica, as categorias que mais contribuem para o impacto total são TH, DCF, MCH, FMP, MCE, TAN e DRM. No processo “Energia Eólica”, a categoria TAN muito provavelmente foi incluída no grupo das mais impactadas, pela grande área que o parque eólico necessita para a instalação e disposição dos aerogeradores. Já a categoria DRM, neste processo, foi mais impactante que no processo ETS, provavelmente por que, para gerar a mesma quantidade de eletricidade que a ETS, é necessário um grande número de aerogeradores, os quais podem utilizar uma significativa parcela de recursos minerais, como diversos metais, por exemplo.

5.0 - CONCLUSÃO

Através deste estudo, é possível observar que na análise das categorias intermediárias, a Energia Térmica Substituível proveniente de fontes não renováveis é o processo com o maior impacto ambiental potencial em quatorze das dezoito categorias contempladas pelo método de AICV, a saber: MC, RCO, TH, FOF, FMP, RI, AT, EM, ETT, ETD, ETM, TAN, DH e DCF. Por outro lado, a Energia Eólica é mais impactante em quatro categorias: EAD, OTA, OSU e DRM.

Na comparação das pontuações únicas de impacto potencial, conclui-se que há uma redução de impacto da ordem de 98,32% ao se substituir 82,27% da EE nacional de origem não renovável por EE de fonte eólica na matriz elétrica brasileira: de 33,08 Giga Pontos (GPt) de impacto para 0,56 GPt. Outrossim, verifica-se que onze categorias apresentam uma redução de impacto acima de 90%, a saber: MCH, RCO, TH, FOF, FMP, MCE, AT, ETT, ETD, ETM e DCF. Em contrapartida, EAD, OTA, OSU e DRM continuam sendo as categorias mais impactadas pela EE proveniente de eólica.

Os resultados obtidos evidenciam que a redução de impacto em relação às categorias MCH e MCE é de 4,19 GPt para, aproximadamente, 0,06 GPt e de 0,38 GPt para, aproximadamente, 0,01 GPt, respectivamente. Verifica-se, portanto, uma redução de 98,60% do impacto para ambas as categorias de Mudanças Climáticas.

Vale lembrar que os resultados obtidos são um produto das premissas adotadas neste estudo. Para outras considerações, novos cálculos devem ser realizados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). Matriz Energética do Brasil. Atualizado em 22/03/2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp>>. Acesso em 22/03/2017.

- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura - NBR ISO 14040. Brasil. Rio de Janeiro: 2009a. 21p.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações - NBR ISO 14044. Brasil. Rio de Janeiro: 2009b. 46p.
- (4) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME, 2001.
- (5) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). Balanço Energético Nacional 2016 – Relatório Síntese: Ano base 2015. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2016a.
- (6) _____. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2016b.
- (7) FRISCHKNECHT, R., JUNGBLUTH, N., ALTHAUS, H.-J., DOKA, G., HECK, T., HELLWEG, S., HISCHIER, R., NEMECEK, T., REBITZER, G., SPIELMANN, M., WERNET, G. Overview and methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for LCI, Dübendorf, 2007b.
- (8) GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A., STRUIJS, J., VAN ZELM, R. ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08) Report I: Characterisation; May 2013. Disponível em: <<http://www.lcia-recipe.net/>> Acesso em: 26/12/2013.
- (9) GOEDKOOP, M., OELE, M., DE SCHRYVER, A., VIEIRA, M. SimaPro Database Manual – Methods library. Report version 2.2. Netherlands: PRé Consultants, 2008.
- (10) HUMBERT, S., DE SCHRYVER, A., BENGUA, X., MARGNI, M., JOLLIET, O. IMPACT 2002+: User Guide. Draft for version Q2.21 (version adapted by Quantis). Suíça, 2012. Disponível em: <http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf>. Acesso em 23/03/2017.
- (11) KALAKUL, S., MALAKUL, P., SIEMANOND, K., GANI, R. Integration of life cycle assessment software with tools for economic and sustainability analyses and process simulation for sustainable process design. Journal of Cleaner Production, v. 71, p. 98–109, 2014.
- (12) PIERAGOSTINI, C., MUSSATI, M. C., AGUIRRE, P. On process optimization considering LCA methodology. Journal of Environmental Management, v. 96, p. 43–54, 2012.
- (13) PRÉ CONSULTANTS. Software SimaPro 7 - Classroom. 7.2.3 Multi user. Copyright© PRé Consultants, 2010.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Tiago Chagas de Oliveira Tourinho

Curitiba – PR / 1984

Mestrado em Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro / 2014

Graduação em Ciências Biológicas - Licenciatura e Bacharelado em Ecologia (UFRJ)

Diploma de Dignidade Acadêmica no grau CUM LAUDE – 2008 (UFRJ)

Especialização em Gestão Ambiental (UFRJ)

Mestrado profissional em Engenharia Ambiental (UFRJ)

