

Impactos potenciais observados na matriz elétrica brasileira através da utilização da ACV: Aplicação do método Impact2002+ para os anos 2005, 2010 e 2011

Cassiano Moro Piekarski (UTFPR) cassianopiekarski@gmail.com

Antonio Carlos de Francisco (UTFPR) acfrancisco@utfpr.edu.br

João Luiz Kovaleski (UTFPR) kovaleski@utfpr.edu.br

Leila Mendes da Luz (UTFPR) leila.mendesdaluz@gmail.com

Jeison Arenhart de Bastiani (UTFPR) jeison@forlogic.net

Resumo:

A composição da matriz elétrica de um país reflete diferentes impactos potenciais associados à utilização da eletricidade. O conhecimento das contribuições das fontes de energia elétrica no desempenho ambiental e de saúde humana auxilia a tomada de decisão sustentável de um país. Neste cenário, este artigo objetivou aplicar a avaliação do ciclo de vida a fim de observar e interpretar os aspectos e impactos associados à matriz elétrica brasileira em diferentes cenários. Foram analisadas três matrizes elétricas brasileiras, referentes ao ano 2005, 2010 e 2011. O referencial teórico abordou a ferramenta ACV, o *software* Umberto® e a base de dados Ecoinvent, a Matriz Elétrica Nacional e o método de avaliação de impactos *Impact2002+*. O estudo baseou-se nas normas NBR ISO 14040 e 14044 para a ACV. O método para avaliação de impacto utilizado foi o *Impact2002+* e os impactos potenciais referentes às matrizes elétricas foram expressados em quatro diferentes categorias: mudança climática, qualidade de ecossistema, saúde humana e recursos. Os resultados mostraram que o aumento da parcela de renováveis na matriz elétrica refletiu um melhor desempenho, para os anos 2010 e 2011, nas categorias de mudança climática e recursos. Quanto às contribuições relativas, notou-se que, apesar da baixa representatividade (<10%) nas matrizes elétricas, o gás natural, os derivados de petróleo, e o carvão e seus derivados apresentam significativa contribuição nos impactos potenciais de aquecimento global e recursos. Por fim, quanto às categorias de qualidade de ecossistema e de saúde humana, o uso da biomassa como geradora de eletricidade é responsável pela maior parcela pontual destas categorias de impacto.

Palavras chave: ACV, Matriz Elétrica Brasileira, *Impact2002+*.

Potential impacts observed in the Brazilian electric mix through the LCA using: Application of the method Impact2002+ for the years 2005, 2010 and 2011

Abstract:

The electric mix composition in a country reflects different potential impacts associated to the use of electricity. The knowledge about the contributions of each sources of electricity in the environmental performance and human health can help the sustainable decision making in a country. In this scenario, this paper aimed to apply the life cycle assessment in order to observe and interpret aspects and impacts associated with the Brazilian electric mix in different scenarios. Was analyzed three Brazilian electric mixes, for the years 2005, 2010 and 2011. The referential theoretical involves the LCA, Umberto® software and Ecoinvent database, the Brazilian Electric mix, and the *Impact2002+*. For the

LCA, the study was based on the NBR ISO 14044 and 14044. The impact assessment method used was Impact2002 + and the potential impacts were expressed in four different categories: climate change, ecosystem quality, human health and resources. In the categories of resources and climate change, the results showed that increasing the part of renewables in electric mix reflected better performance for the years 2010 and 2011. About the relative contributions, was noted that despite the low representation (<10%) in the electric mix; the natural gas, petroleum derived, and coal have significant contribution in the potential impacts of global warming and resources. Finally, about the categories of ecosystem quality and human health, the use of biomass as a generator of electricity is responsible for the largest part of these impact categories.

Key-words: LCA, Brazilian Electric Mix

1. Introdução

A necessidade crescente a cerca de conhecimento e informações ambientais vinculadas a produtos, processos e serviços promovem a aplicabilidade de modernas ferramentas de gestão de desempenho ambiental no atual cenário mercadológico.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo do ciclo de vida de um produto, serviço ou processo, passando por todos os elos de produção, de uso e distribuição. A ACV é a ferramenta mais quantitativa (e complexa) para a avaliação de desempenho ambiental (BOCKEN et al, 2012), o que caracteriza-a como a mais importante na gestão ambiental industrial moderna (LÖFGREN; TILLMAN; e RINDE, 2011).

Devido a grande representatividade no desenvolvimento perene e sustentável de um país, o setor energético vem sendo alvo de pesquisas e estudos de avaliação do ciclo de vida. Especialmente em países emergentes, alguns estudos de ACV (LIU et al, 2012; NIE et al, 2010; RIBEIRO; DA SILVA, 2010; VARUN; BHAT; PRAKASH, 2009) são justificados pela exploração do caráter comparativo de aspectos e impactos ambientais relacionados à matrizes elétricas, nos mais variados cenários (diferentes composições de matrizes elétricas, alterações no perfil de consumo, prospecções de mercado, contribuições relativas em impactos).

Neste panorama, este artigo tem como objetivo aplicar a ACV a fim de observar e interpretar os aspectos e impactos associados as matrizes elétricas brasileiras referentes aos anos 2005, 2010 e 2011. Para a avaliação dos impactos, utilizaram-se o *software* Umberto®, o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da matriz elétrica brasileira da base de dados Ecoinvent Vol.2.2 (ECOINVENT, 2010a) e o método de avaliação de impactos *Impact2002+*.

2. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia que permite quantificar e avaliar o desempenho ambiental de um produto ou serviço ao longo de todo seu ciclo de vida. A característica única da ACV em focar sua aplicação na perspectiva do ciclo de vida do produto (FINNVEDEN et al, 2009) faz com que se forneça grande parte de informações ambientais necessárias para interpretar, prever e gerar soluções sustentáveis para diferentes sistemas (BLENGINI et al, 2012).

De acordo com Guinée et al (2011), a ACV tem se desenvolvido rapidamente nas últimas três décadas. O desenvolvimento da metodologia partiu de uma mera análise de energia e de cargas ambientais de produtos, durante a década de 70, e atualmente, a metodologia vem sendo utilizada vastamente por pesquisadores, organizações e indústrias (GARRIGUES et al, 2012)

que buscam quantificar consumos de recursos naturais, emissões e impactos ambientais e de saúde associados a produtos e serviços (WELZ, HISCHER, HILTY; 2011).

A metodologia da ACV é estruturada e normatizada internacionalmente pela Organização Internacional para Normalização (ISO), pertencendo à série ISO 14040 e 14044. Ambas são consideradas as principais e mais importantes normas para avaliação ambiental baseada no ciclo de vida do produto e servem de base para outras normas mais específicas como ISO 14025 (Declaração de Produto Ambiental), ISO 14067 (Pegada de Carbono), ISO 14045 (Ecoeficiência), entre outras (KLÖPPFER, 2012). No Brasil, as duas normas que regulam a ACV são:

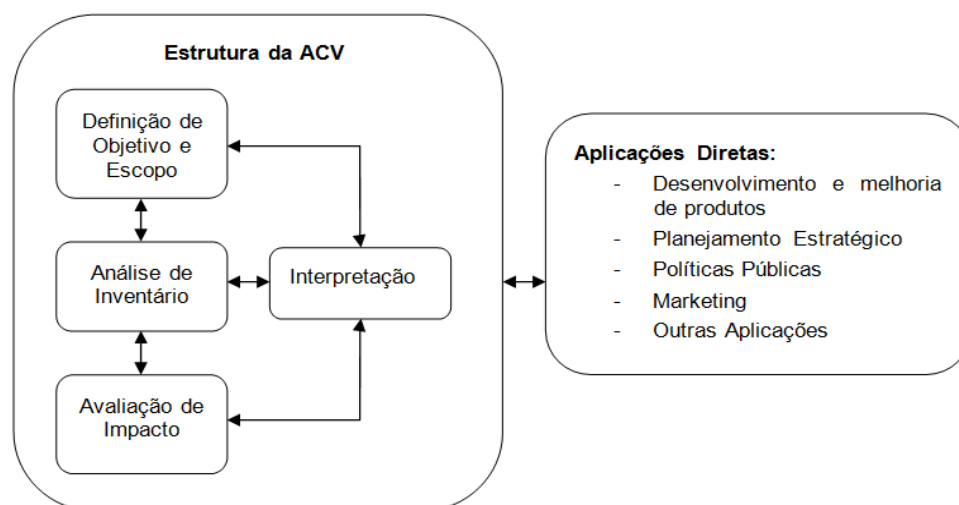
- ABNT NBR ISO 14040:2009, Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura (ABNT, 2009a);

- ABNT NBR ISO 14044:2009, Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações (ABNT, 2009b);

De acordo com a ISO 14040 (ABNT, 2009a), a ACV permite avaliar os impactos ambientais potenciais e os recursos utilizados durante todo o ciclo de vida de um produto (por exemplo, desde a aquisição de matérias-primas, envolvendo as etapas de produção, de consumo e disposição final do produto), através do levantamento e compilação de entradas e saídas de um sistema, avaliando os impactos potenciais associados a essas entradas e saídas e interpretando os resultados em relação aos objetivos de estudo.

A perspectiva da ACV identifica e quantifica impactos ambientais de forma a analisar e elencar quais fases do ciclo de vida do produto ou serviço possui impacto ambiental mais considerável (CAMBRIA e PIERANGELI, 2012). Este é um dos principais propósitos das ACV: a identificação dos chamados “hot-spots”, termo que segundo Jefferies et al (2012) é comumente utilizado em estudos ACV para identificar atividades durante o ciclo de vida do produto/serviço que possui contribuição significativa para o impacto potencial total associado ao mesmo.

A estrutura metodológica da ACV proposta pela ISO (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b) compreende quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. As fases e a interação entre as mesmas são ilustradas na Figura 1.



Fonte: ABNT (2009a)

Figura 1 – As Fases da ACV e seus relacionamentos

Na fase de objetivo e escopo, a unidade funcional (U.F, na qual todas as entradas e saídas são relacionadas), fronteiras do sistema, procedimentos de alocações (particionamento de entradas e saídas) são definidos dependendo das pretensões objetivadas no estudo. Para a fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV), as entradas e saídas do processo são definidas, quantificadas e listadas. O ICV é relacionado com categorias e indicadores de impactos ambientais por meio da Avaliação de Impactos (AICV) e, na quarta fase, interpretando os resultados com os objetivos traçados na primeira fase do estudo (ABNT, 2009a; YAN, HUMPHREYS, HOLDEN, 2011).

Visualizando as fases da ACV na figura 1, destaca-se o relacionamento entre as mesmas. A ACV é uma metodologia dinâmica que permite o fluxo de informações e mudanças em itens das fases ao decorrer do estudo. Devido ao grande número de informações e a complexidade envolvida em um estudo ACV, se faz necessário a utilização de *softwares* para tratamento e procedimentos de cálculos para a avaliação proposta.

3. Software Umberto e Base de Dados Ecoinvent

O software Umberto® pode ser utilizado para modelar, calcular, e visualizar fluxos de materiais e energias. A proposta do software é beneficiar os usuários através de eficiência, economia e sucesso. A eficiência promove o sucesso, com o software é possível descobrir o potencial de retenção de gastos da empresa, otimizar as receitas, os recursos e o equilíbrio ecológico (IFU HAMBURG GMBH, 2012).

A operacionalização do Umberto® é baseada na elaboração de redes de fluxo com base em redes de Petri, possuindo como princípios básicos três tipos de componentes: transições, lugares e setas/fluxos (Figura 2) (NUNES et al, 2010).

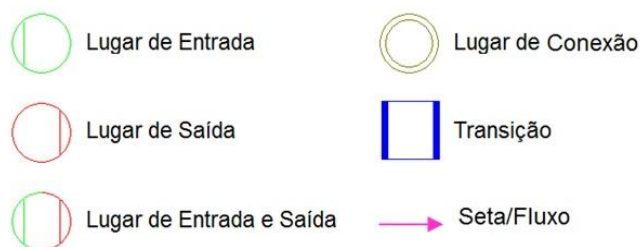


Figura 2: Representação de componentes de rede do Umberto®

Os lugares (places) são representados por um círculo, eles podem ser categorizados em lugares de entradas (inputs), lugares de saída (outputs), lugares de entrada e saída (inputs/outputs) e lugares de conexões (connection). Nos locais não ocorrem transformações de materiais, são apenas locais onde são alocados os insumos e rejeitos do processo analisado. Nos lugares de conexões a quantidade de material que chega é igual à quantidade que sai, não podendo realizar nenhum tipo de armazenamento. Os processos de transformação ocorrem nas chamadas “transições”, locais representadas por um quadrado. As setas formam a rede e definem fluxos através da conexão entre os “lugares” e as “transições” (NUNES et al, 2010).

O Umberto® propicia acesso à base de dados que contém vários conjuntos de dados genéricos, que podem ser utilizados para analisar cenários e identificar processos ecologicamente mais sensíveis ao processo de produção. A base de dados utilizada pelo Umberto® neste estudo é a ecoinvent data Vol.2.2.

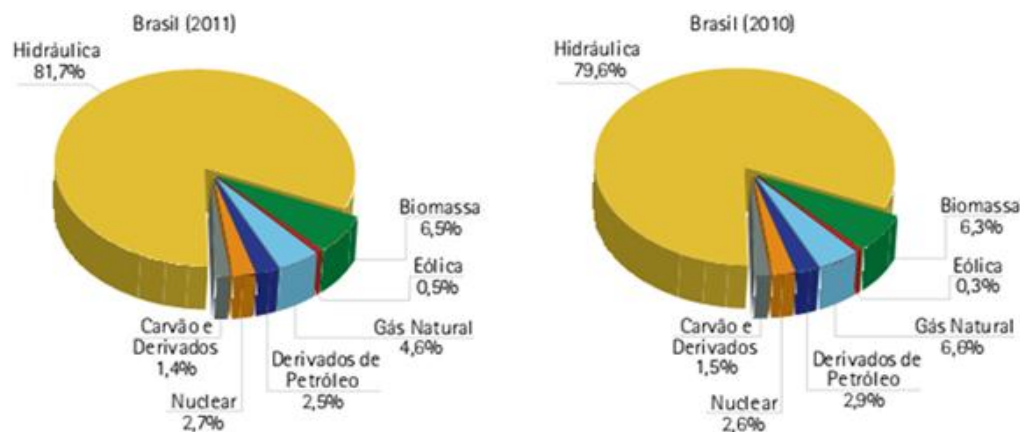
A base de dados ecoinvent foi desenvolvida e aprimorada pelo Centro Suíço de Inventário do Ciclo de Vida (Ecoinvent Centre), tendo como objetivo fornecer ICVs relevantes, acessíveis,

transparentes e confiáveis para usuários de ACV de todo o mundo. Para tanto, a base de dados dispõe de mais de 4000 inventários de processos industriais e 17 métodos para a avaliação de impactos, que suportam estudos nas áreas de sistemas de gestão ambiental, *Design for Environmental* (DfE), entre outros (ECOINVENT, 2010b). Entre os processos disponibilizados na base de dados ecoinvent v2.2, está disposta a matriz elétrica brasileira e o método de avaliação de impactos *Impact 2002+*.

4. Matriz Elétrica Brasileira

O Brasil possui uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável. A participação de fontes de energia renovável para produção de eletricidade, que em 2010 era de aproximadamente 86% (EPE, 2011), teve sua participação ampliada, atingindo 88,8% em 2011 (EPE, 2012).

A oferta de energia elétrica no Brasil em 2011 atingiu 568,8 TWh, registrando um aumento de 3,3% em relação ao ano 2010 (EPE, 2012). O Gráfico 1 fornece a composição da matriz de energia elétrica nacional durante os anos 2010 e 2011. Os valores ilustrados já incluem a importação de energia elétrica no país.



Fonte: EPE (2012)

Gráfico 1: Composição da matriz elétrica Brasileira para os anos 2010 e 2011

O ano 2011 apresentou condições hidrológicas favoráveis, o que assegurou um aumento de 6.1% na produção hidroelétrica, refletindo no aumento de 2.6% (considerando importações) na produção hidráulica. A contribuição da biomassa na matriz elétrica registrou uma redução, devido a baixa produção da bioeletricidade (a partir da biomassa da cana), refletindo as restrições na oferta de biomassa de cana. Por outro lado, destaca-se uma relevante expansão da geração eólica no país que, segundo a Empresa de Pesquisa Energética Nacional (EPE, 2012) deverá ocorrer de forma ainda mais expressiva nos próximos anos.

A representatividade de combustíveis fósseis (gás natural e derivados de petróleo) foi de 7,1% na matriz elétrica brasileira em 2011. Uma redução de aproximadamente 25,6% na contribuição em percentual específico para 2010. A energia elétrica proveniente de origem nuclear obteve um aumento de 0,1% entre 2010 e 2011. Em contrapartida, a contribuição de carvão e derivados apresentou queda de 0,1% na representatividade da matriz elétrica.

A matriz elétrica brasileira é fornecida na base de dados ecoinvent Vol.2.2 para a realização de estudos de ACV. Os dados disponíveis na base de dados são referentes a 2005. A Tabela 1 fornece as características da matriz elétrica para os anos 2005, 2010 e 2011.

Ano base	2005	2005	2010	2011
	Produção Líquida sem importação (GWh)	Contribuição percentual com importações (%)		
Biomassa	13.873	3,2%	6,3%	6,5%
Carvão e Derivados ¹	11.153	2,9%	1,5%	1,4%
Derivados de Petróleo	11.634	3,1%	2,9%	2,5%
Eólica	61	0,01%	0,3%	0,5%
Gás Natural	18.814	5,0%	6,6%	4,6%
Hidráulica	33.504	83,4%	79,6%	81,7%
Nuclear	9900	2,4%	2,6%	2,7%
Total (sem importação)	402.939	91,1%	-	-
Total (com importação)	442.139	100,00%	100%	100%
Referências	Ecoinvent (2007)		EPE (2012)	

¹Inclui gás de coqueria
Fonte: Ecoinvent (2007) e EPE (2012)

Tabela 1 – Atualização da Matriz Elétrica Brasileira

Observa-se que a matriz elétrica sofreu mudanças. Os percentuais relativos a cada fonte de geração de eletricidade foram atualizados. Houve um aumento significativo na geração de eletricidade através da biomassa e energia eólica.

A composição de uma matriz elétrica possui influência direta nos impactos ambientais observados na eletricidade utilizada em um país. Para a avaliação de impactos, a metodologia ACV propõe a AICV. Existem diversos métodos para se avaliar os impactos, cada qual possui uma característica, e sua aplicabilidade deve ser condizente com o objetivo e escopo traçados no estudo ACV. Diante do exposto, as características do método *Impact 2002+* sustentam a escolha do mesmo para este estudo.

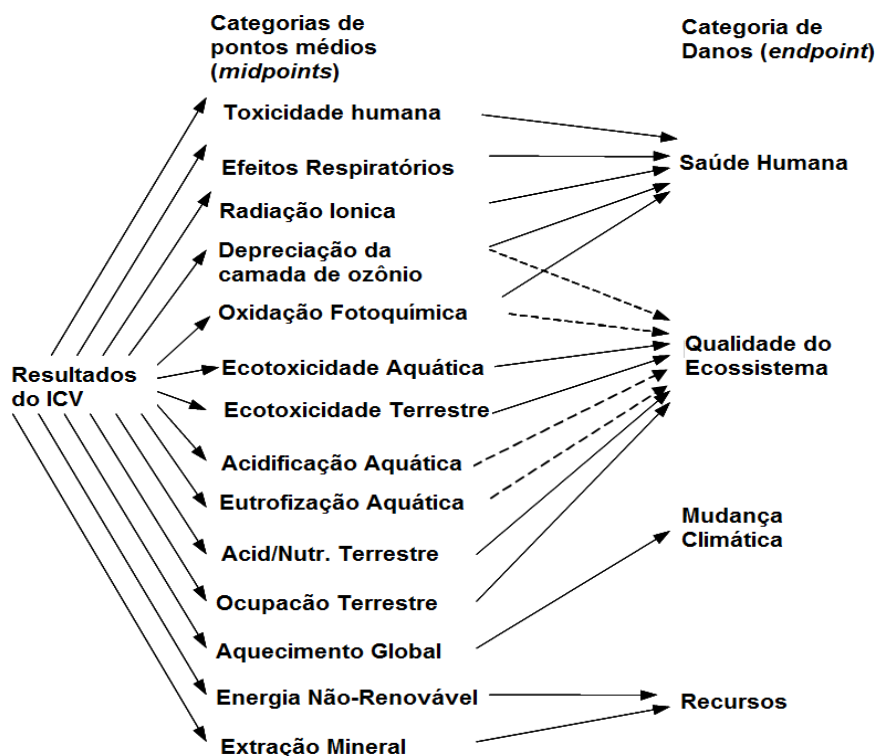
5. Método de Avaliação de Impactos - “*Impact 2002+*”

O método *Impact 2002+* é uma metodologia de avaliação de impactos originalmente desenvolvida no Instituto Federal de Tecnologia da Suíça (EPFL), em Lausanne. A metodologia propõe uma implementação viável da combinação de métodos de avaliação de impactos clássicos e de métodos orientados ao dano (ECOINVENT, 2010b)

De acordo com Alvarenga (2010), os métodos clássicos compilam os resultados do ICV em categorias de pontos médios (*midpoints*), como ecotoxicidade e acidificação, por exemplo. O método mais utilizado neste grupo é o *CML*. Em contrapartida, os métodos orientados ao dano modelam a cadeia de causa-efeito do ciclo de vida até seus pontos finais, ou dano (*endpoint*), como saúde humana e qualidade do ecossistema. O método mais utilizado neste segundo grupo é o *Eco-Indicator99*.

Neste enlace, a proposta do método *Impact2002+* é a junção dos métodos clássicos com os orientados ao dano, a fim de absorver suas respectivas limitações e agrupar os pontos positivos dos métodos mais utilizados mundialmente em estudos de ACV. Goedkoop et al (2008) afirmam que o *Impact 2002+* é, em termos gerais, a combinação entre o *Impact 2002* (em sua primeira versão) e os métodos *Eco-Indicator99*, *CML 2000* e *IPCC*. A Figura 3

ilustra as categorias de impactos médias e de danos consideradas no método Impact2002+.



Fonte: Ecoinvent (2010)

Figura 3 – Categorias de impactos de pontos médios e danos para o método Impact2002+

Todos os resultados do ICV são ligados às quatorze (14) categorias de ponto médio, e estas por sua vez, ligadas as quatro (4) categorias de danos. A publicação original deste método (JOLLIET et al, 2003) pode ser útil para a compreensão da metodologia de impacto, para os fatores para as caracterizações dos fluxos, e para os procedimentos de cálculos envolvidos neste método.

Os fatores de normalização de danos (que quantificam os *endpoints* na unidade pontos por unidade funcional) são baseados em dados de emissões europeias (ECOINVENT, 2010b). Esta característica é vista como uma limitação do método, desfavorecendo a qualidade final de dados de estudos ACV para diferentes locais fora da Europa.

6. Metodologia

Os dados da matriz elétrica brasileira, disponibilizados pela base de dados ecoinvent Vol.2.2, revelam o inventário do ciclo de vida da eletricidade brasileira com a composição da matriz para o ano 2005. A sua atualização e a análise da composição, para os anos 2010 e 2011, se deu através dos dados disponíveis no Balanço Energético Nacional (EPE, 2012). A atualização da matriz elétrica foi realizada considerando a inclusão da eletricidade importada pelo Brasil.

Quanto aos procedimentos técnicos, seguiram-se os procedimentos metodológicos das normas ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). O *software* Umberto® Vol.5.6 Acad. foi utilizado para a modelagem da matriz elétrica, importação do inventário da

ecoinvent, cálculos da ACV e sua respectiva contribuição nos impactos analisados. A unidade funcional adotada neste estudo foi 1,0 MWh de Energia Elétrica.

Para a avaliação de impactos foi utilizado o método *Impact 2002+*. A escolha deste método se deu pelas características de avaliação para desempenho ambiental e por seu atributo único de junção dos métodos mais utilizados dentro de estudos ACV (Eco-Indicator e CML). O *Impact2002+* analisou os impactos potenciais na categoria *endpoint*, ou seja, foram verificados os danos finais da eletricidade para as seguintes categorias: mudança climática, qualidade de ecossistema, saúde humana e recursos.

Após a análise do desempenho ambiental para diferentes composições da matriz elétrica brasileira nos anos 2005, 2010 e 2011; foram analisadas as contribuições relativas para cada categoria de impactos de cada processo gerador de eletricidade no Brasil (Biomassa, Carvão e Derivados, Derivados de Petróleo, Eólica, Gás Natural, Hidráulica, Nuclear).

7. Resultados e Discussões

A modelagem da matriz elétrica brasileira (Figura 4) ilustra, através de redes de fluxos, a origem de cada fonte de geração de eletricidade no Brasil. O processo resultante (Matriz elétrica - T1) foi modelado através de *unit process* (onde são modeladas as contribuições relativas (em %) de cada processo antecessor à ele), por sua vez, os processos antecessores (T2 a T8) são caracterizados como *result process* (onde a totalidade de inventários relativos a todos os processos antecessores à ele são compactados em um único processo resultante).

As entradas e saídas relativas aos processos de geração de eletricidade no Brasil foram agrupadas no local de entrada (P9) e no local de saída (P10). O local de saída da Energia Elétrica (P1) recebe o fluxo elementar definido pela unidade funcional de 1,0 MWh.

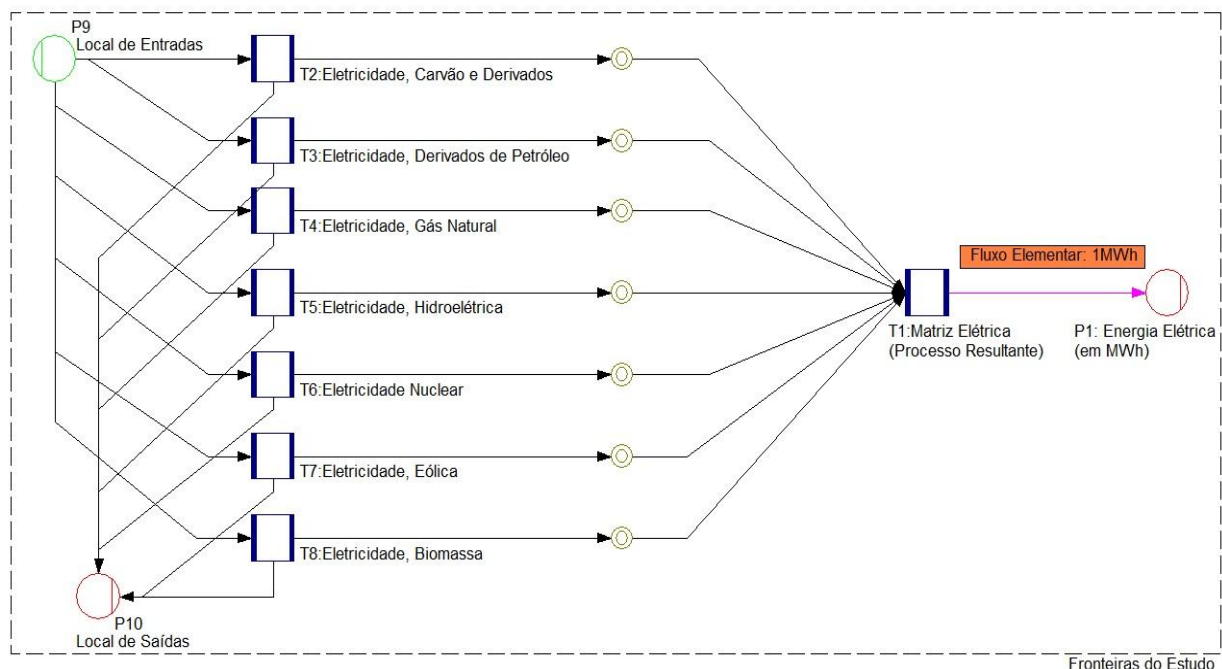


Figura 4 – Modelagem do sistema de geração de energia elétrica Brasileiro no *software Umberto®*

Foram realizados três cenários para as atualizações das matrizes elétricas brasileiras. Cada cenário foi elaborado através da composição da matriz elétrica nos anos 2005, 2010 e 2011 (ver Tabela 1).

O software Umberto realizou, por meio da utilização do inventário do ciclo de vida da Eletricidade Brasileira, a rotina de cálculo para a avaliação de impactos. A rotina utilizada foi baseada nos fatores de caracterização e normalização incorporadas no método Impact2002+. Cada material utilizado no processo de geração de eletricidade via gás natural (T4), por exemplo, possui um fator de impacto diferente para cada categoria de impactos.

Com isso, as contribuições relativas de danos gerados para cada categoria de impacto, de cada cenário da Matriz Elétrica Brasileira (MEB), estão dispostas no Gráfico 2.

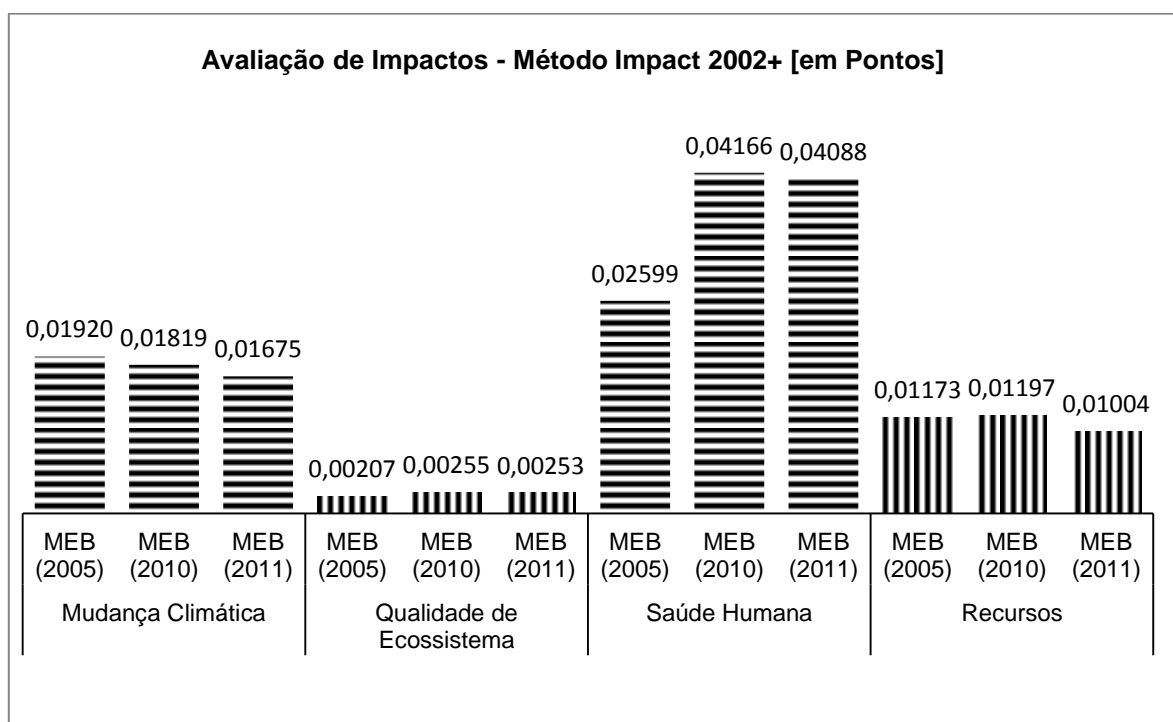


Gráfico 2 – Resultado da avaliação de impactos da matriz elétrica Brasileira em três cenários

Quanto às mudanças climáticas, houve um decréscimo de 5,26% para a matriz de 2005 para 2010. Já para o período de 2011, a diferença foi de -12,76% em relação à MEB 2005. O aumento da contribuição de renováveis na matriz elétrica possui influência direta na diminuição de impactos na mudança climática.

Para a qualidade de ecossistema, houve uma maior contribuição durante os anos 2010 e 2011, em relação ao ano de 2005. A diferença observada foi de +23,19% de 2005 para 2010 e de -0,78% de 2010 para 2011. O aumento no impacto potencial de qualidade de ecossistema possui influência direta no consumo de biomassa como geração de eletricidade.

A categoria de saúde humana também apresentou um impacto maior para os anos 2010 e 2011. Houve um aumento de 60,29% para o ano de 2010 e um decréscimo de 1,87% para a matriz elétrica do ano de 2010 para a de 2011.

Por fim, a categoria de recursos apresentou um impacto observado menor na última composição da matriz elétrica (2011). Houve um pequeno aumento de 2005 para 2010, entretanto, o ano de 2011 desbancou -16,12% em relação ao ano anterior.

As contribuições relativas de cada processo de geração de energia elétrica no Brasil podem ser observadas na Figura 5. Os dados foram analisados com o intuito de verificar as fontes da matriz elétrica que apresentam contribuições potenciais para as categorias de impactos.

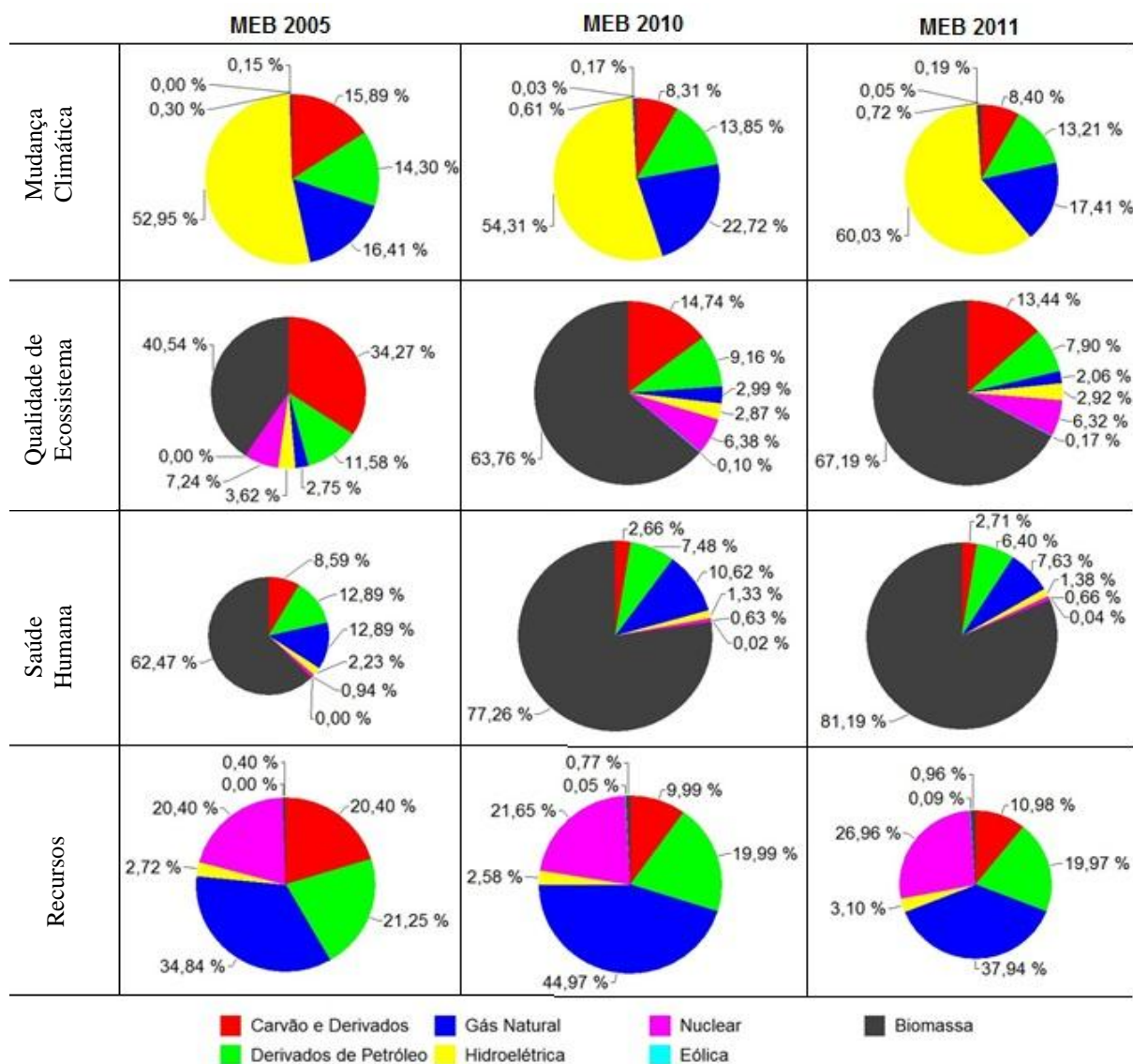


Figura 5 – Representatividade das fontes de eletricidade nas categorias de impacto

Os maiores aportes à categoria de mudança climática provêm da hidroeletricidade. Isto justifica-se pelo fato de que mais de 80% da matriz elétrica nacional é originada deste meio. Se analisada a contribuição relativa, nota-se que o gás natural, os derivados de petróleo, e o carvão e derivados, que juntos possuem mais uma pequena representatividade de menos de 10% da composição de 2011, representam aproximadamente 40% na mudança climática do mesmo ano (Figura 5).

O maior contribuidor na qualidade de ecossistema é o uso da biomassa como combustível. Nos anos 2010 e 2011, onde o consumo de biomassa na matriz elétrica nacional teve um incremento significativo, a biomassa contribuiu com mais de 60% para impactos na qualidade de ecossistema. A influência da biomassa na qualidade de ecossistema é proveniente das categorias de impactos médios (*midpoints*), vistos na Figura 3. O carvão e seus derivados apresentam a segunda maior significância na qualidade de ecossistema.

Quanto à saúde humana, os impactos são relacionados também ao uso de biomassa na geração de energia elétrica. A queima da biomassa, entre outros aspectos, gera materiais particulados

que influenciam em efeitos respiratórios, por exemplo (uma categoria *midpoint* prevista na Figura 3). O gás natural, o carvão e os derivados de petróleo também apresentam contribuições significativas nesta categoria.

Por fim, a categoria de impactos “recursos” está intimamente ligada ao consumo de gás natural, derivados de petróleo, energia nuclear e ao carvão e seus derivados. Os maiores contribuidores desta categoria são dados pela extração mineral e pelas fontes de energia não-renovável incorporadas na matriz elétrica. Observa-se também, o fato da energia hidroelétrica - que possui uma contribuição maior que 80% na composição da matriz – apresentar uma baixa representatividade na categoria de impactos de recursos (em torno de 3% para todos os anos observados).

8. Conclusões

A aplicação da ferramenta ACV, através do método de avaliação de impactos Impact2002+, permitiu analisar a matriz elétrica Brasileira em quatro diferentes categorias de impactos, para três diferentes cenários. No entanto, os resultados (pontuações) das categorias de impactos não são comparáveis entre si, ou seja, cada categoria (mudança climática, qualidade de ecossistema, saúde humana e recursos) foi interpretada independentemente.

A matriz elétrica apresentou um incremento na participação de fontes renováveis, no ano de 2011 já eram aproximadamente 88,8% de participação. A energia hidroelétrica mantém-se como a maior contribuição da eletricidade nacional, com mais de 80% de contribuição. Destaca-se a evolução da energia eólica e da biomassa no Brasil.

Quanto aos impactos observados, notou-se uma redução nos impactos da mudança climática e na utilização de recursos. Fato justificado pela maior participação de renováveis na contribuição da matriz. Em relação aos impactos da saúde humana e da qualidade de ecossistema, houve um aumento pontual da matriz disponível no inventário do ciclo de vida da eletricidade brasileira (ano 2005) para os anos 2010 e 2011.

O aumento do impacto nas categorias de qualidade de ecossistema e saúde humana se dá, principalmente, pela participação da biomassa na geração de eletricidade no país. A queima da biomassa possui forte influência em impactos de ecotoxicidade aquática e terrestre, acidificação, eutrofização e efeitos respiratórios. Em contrapartida, a biomassa é um recurso renovável, de fonte não fóssil, que auxilia o desempenho da matriz elétrica em termos de mudança climática e recursos.

Em geral, os maiores contribuintes relativos (ou seja, de acordo com o percentual de participação na matriz elétrica) para as categorias de impactos de mudança climática e uso de recursos são o gás natural, carvão e derivados e os derivados de petróleo. À medida que a participação da hidroeletricidade aumenta, o impacto sobre mudança climática e uso de recursos diminuem.

Neste enlace, destaca-se a utilização da metodologia envolvida na ACV. Esta ferramenta apresenta-se como uma alternativa robusta e potencial para análise de desempenho sustentável de serviços, produtos ou processos; facilitando, ainda, o processo de tomada de decisão através do conhecimento gerado e agregado por sua metodologia.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.* Brasil: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações.* Brasil: ABNT, 2009b.

BLENGINI, G. et al. *Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of*

aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMA). Journal Of Cleaner Production, Vol. 27, p.177-181, 2012.

BOCKEN, N.M.P. et al. Development of a tool for rapidly assessing the implementation difficulty and emissions benefits of innovations. Technovation Vol. 32, p.19-31, 2012

CAMBRIA, D.; PIERANGELI, D. Application of a life cycle assessment to walnut tree high quality wood production: a case study in southern Italy. Journal Of Cleaner Production, Vol. 23, p.37-46, 2012.

ECOINVENT. Christian Bauer e Roberto Dones (Org.). *Strommix und Stromnetz*. Suíça: Swiss Centre For Life Cycle Inventories, 2007.

ECOINVENT. *Ecoinvent data Vol.2.2. The 2010 version of the most comprehensive and most popular public LCI database*. Suíça: Swiss Centre For Life Cycle Inventories, 2010a.

ECOINVENT. *Ecoinvent data Vol.2.2: Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. Suíça: Swiss Centre For Life Cycle Inventories, 2010b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) (Brasil). *Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011*. Rio de Janeiro: Epe, 2012. 51 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) (Brasil). *Balanço Energético Nacional 2011: Ano base 2010*. Rio de Janeiro: Epe, 2012. 266 p.

FINNVEDEN, Goran et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management, Vol. 91, p.1-21, 2009.

GARRIGUES, E. et al. Soil quality in Life Cycle Assessment: Towards development of an indicator. Ecological Indicators, Vol.18, p.434-442, 2012.

GOEDKOOOP, M.; OELE, M.; SCHRYVER, A.; VIEIRA, M. *SimaPro Database Manual: Methods Library*. Holanda: PRé Consultants, 2008.

GUINÉE, J. B. et al. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. Environmental Science & Technology, Vol. 45, n. 1, p.90-96, 2011.

IFU HAMBURG GMBH. *Funktionen und Features von Umberto*. Disponível em: <<http://www.umberto.de/de/functions/>>. Acesso em: 12 set. 2012.

JEFFERIES, D. et al. Water Footprint and Life Cycle Assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption: Key learning points from pilot studies on tea and margarine. Journal Of Cleaner Production, [In-press], p.1-28, 2012.

JOLLIET O. et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.8, n.6, p. 324-330, 2003.

LIU, Z. et al. Embodied energy use in China's industrial sectors. Energy Policy, Vol. 49, p.751-758, 2012.

LÖFGREN, B.; TILLMAN, A.; RINDE, B. Manufacturing actor's LCA. Journal Of Cleaner Production, Amsterdam, Vol. 19, p.2025-2033, 2011.

NIE, Zuo-ren et al. Recent progress and application of materials life cycle assessment in China. Progress In Natural Science: Materials International, Vol. 21, p.1-11, 2010.

NUNES, I. S. et al. Estudo do fluxo de materiais e energia na produção de creme base utilizando o software Umberto: Os potenciais impactos ambientais da produção farmacêutica magistral. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. Anais... . São Carlos: Abepro, 2010. p.1-13.

RIBEIRO, F. M.; SILVA, G. A. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. Journal Of Cleaner Production, Vol. 18, p.44-54, 2010.

VARUN; BHAT, I.K.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems: A review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, p.1067-1073, 2009.

WELZ, T.; HISCHIER, R.; HILTY, L.M. Environmental impacts of lighting technologies: Life cycle assessment and sensitivity analysis. Environmental Impact Assessment Review, Vol. 31, p.334-343, 2011.

YAN, M.; HUMPHREYS, J.; HOLDEN, N. M. An evaluation of life cycle assessment of European milk production. Journal Of Environmental Management, Vol.92, p.372-379, 2011.