

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MURILLO VETRONI BARROS**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA NO BRASIL: HISTÓRICO E PERSPECTIVAS FUTURAS  
EM TERMOS DE AQUECIMENTO GLOBAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**MURILLO VETRONI BARROS**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA NO BRASIL: HISTÓRICO E PERSPECTIVAS FUTURAS  
EM TERMOS DE AQUECIMENTO GLOBAL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Produção, do  
Departamento de Engenharia de  
Produção, da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Moro  
Piekarski.

**PONTA GROSSA**

**2017**

	<p><b>Ministério da Educação</b> <b>UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO</b> <b>PARANÁ</b> <b>CÂMPUS PONTA GROSSA</b> Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção</p>	
---	---	---

## **TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC**

Avaliação do Ciclo de Vida de Geração de Energia Elétrica no Brasil: Histórico e Perspectivas Futuras em Termos de Aquecimento Global

por  
*Murillo Vetroni Barros*

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 14 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

**Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski**  
Prof. Orientador

---

**Prof. Dr. Fabio Neves Puglieri**  
Membro titular

---

**Prof. Dr. Eduardo Cimino Cervi**  
Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso (ou Programa)”.

Dedico este trabalho aos meus queridos  
pais, João e Dejanira.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me iluminado e me dado forças para atingir esse objetivo. Só ele sabe os momentos difíceis que atravessei, e hoje, sei que posso comemorar com imenso prazer e agradecê-lo.

À esta universidade e a todo corpo docente, que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho. A UTFPR e ao programa de Iniciação Científica que me auxiliou na elaboração do trabalho.

Em especial, meu orientador Cassiano Moro Piekarski, que disponibilizou seu tempo, paciência, atenção e conselhos. Digo que foi muito mais que um orientador, foi e continuará sendo um grande amigo. Meu profundo agradecimento a essa pessoa, que além de sua sabedoria e conhecimento, me guiou nesta trajetória de minha vida, desde as conversas e dúvidas rápidas nos corredores da universidade até as duradouras e constantes reuniões semanais, além da confiança e disponibilidade de fazer uso do LESP (Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis) localizado no interior da UTFPR campus Ponta Grossa.

Aos meus queridos e amados pais, sou eternamente grato pela confiança e cooperação. Mesmo nos momentos ausentes, de alguma forma, estiveram presentes em minha vida. Mesmo na distância, me influenciaram a continuar e jamais desistir dos meus sonhos, dando-me capacidade suficiente de me tornar responsável e independente. Agradeço profundamente pelo esforço e sacrifício para a minha conclusão desse processo de formação.

À minha querida e amada namorada Marjory, que me ajudou, compreendeu e me deu forças para chegar até aqui. Sou muitíssimo grato pelos conselhos e conversas ao longo de todo esse tempo juntos. Você estava lá para me fazer continuar e jamais desistir do meu sonho. Posso dizer que você foi minha família nesse tempo longe de “casa”. Palavras escritas aqui serão pouco para te agradecer pela cooperação e força que me deu ao longo desse período.

À minha irmã, que me confortou sempre com suas palavras, fazendo-me não desistir, nem desanimar nos momentos difíceis. À meu irmão, cunhada e sobrinhas, que mesmo na distância, me deram apoio, forças e amor nesse processo da minha vida.

À toda minha família, que sem dúvida acreditaram em mim. Dentre todos os telefonemas e mensagens trocadas quando a saudade “falava” mais forte. Vocês estiveram presentes em minha vida e me auxiliaram de alguma forma chegar onde estou hoje. À meus tios (as), primos (as) e demais familiares, incluindo meus quatro avós, que por força do destino, se despediram da vida aqui na Terra, entretanto, estão todos no meu coração. Por fim, um agradecimento em especial a meu avô que me ensinou muito nas conversas e diálogos.

À meu amigo universitário, Jose Guilherme de Paula do Rosário, que me auxiliou na geração dos resultados no *software* no período que trabalhei juntos na Iniciação Científica.

À todos meus amigos e colegas universitários que contribuíram para minha formação. Agradeço todos os momentos juntos, como risadas, brincadeiras e os dias difíceis também, pois são nesses momentos que aprendemos e somos mais fortes. Por fim, a todos, que de alguma maneira torceram por mim.

"O único lugar aonde o sucesso vem  
antes do trabalho é no dicionário."  
**(Albert Einstein)**

## RESUMO

BARROS, Murillo Vetroni. **Avaliação do Ciclo de Vida de geração de energia elétrica no Brasil**: histórico e perspectivas futuras em termos de aquecimento global. 2017. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho ambiental de geração de energia elétrica no Brasil de composições passadas e prospecções futuras em termos de aquecimento global. Para isso, foi utilizada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar o desempenho ambiental da matriz energética no Brasil em termos de aquecimento global. Observa-se que, contemporaneamente a principal fonte energética do país são as hidrelétricas, cuja fonte representou 64,0% da geração de energia elétrica em todo o território nacional em 2015. Mesmo as hidrelétricas correspondendo à fonte renovável, outras fontes limpas estão ganhando espaço no território nacional e internacional, como é o caso da biomassa, eólica e solar. Para a construção do referencial teórico foi utilizado uma revisão sistemática, incluindo a pesquisa na base de dados internacional para a coleta dos principais artigos que abordem paralelamente ACV e geração de energia elétrica. Na realização do levantamento científico foi optado pela utilização do *Methodi Ordinatio*. Além disso, foi realizada uma busca de dados referentes às principais fontes energéticas brasileiras no Ministério de Minas e Energia, e Agência Nacional de Energia Elétrica, compondo o estudo com a análise de cenários para o Brasil entre os anos de 2014 a 2024. Foram utilizados o *software* Umberto NXT Universal, ISO 14040, ISO 14044, base de dados daecoinvent v 3.3 para procedimentos metodológicos, geração e análise dos resultados. Dentre os quais indicam que os maiores impactos ambientais estão concentrados em fontes não renováveis, dando destaque ao gás natural, petróleo e carvão. O dióxido de carbono é o principal contribuinte para as emissões atmosféricas em toda a matriz energética nacional ao longo de período analisado. O IPCC 2013 foi utilizado na geração dos resultados para categoria de GWP 100 anos. Fontes renováveis, como eólica, é vista no país como promissora devido à fonte limpa e a capacidade de geração de energia elétrica através de locais com altos índices de ventos. Nota-se que, a capacidade de geração de energia elétrica aumentará 55,70% até o ano de 2024. Constatou-se que, o desempenho por fluxo de referência (1 MW) apresentará avanços significativos, ou seja, sofrerá redução de 10,40% no impacto ambiental (por MW) de energia elétrica gerada no Brasil até 2024. Dessa forma, o trabalho mostra-se eficaz para direcionamento de políticas públicas, promoções de ações de desenvolvimento e incentivos de diferentes matrizes energéticas.

**Palavras-chave:** ACV. Energia elétrica. Desempenho ambiental. Matriz energética.



## ABSTRACT

BARROS, Murillo Vetroni. **Life Cycle Assessment of electric power generation in Brazil: historical and future perspectives in global warming.** 2017. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

The present work aims to evaluate the environmental performance of electric power generation in Brazil of past compositions and future prospects in terms of global warming. For this purpose, the Life Cycle Assessment (LCA) tool was used to evaluate the environmental performance of the energy matrix in Brazil in terms of global warming. It is observed that at the same time the main energy source of the country are the hydroelectric dams, whose source represented 64.0% of the generation of electric energy throughout the national territory in 2015. Even the hydroelectric dams corresponding to the renewable source, other clean sources are gaining space in the national and international territory, as is the case of biomass, wind and solar. For the construction of the theoretical reference was used a systematic review, including the research in the international database for the collection of the main articles that deal in parallel with LCA and electric power generation. In carrying out the scientific survey was chosen the use of Methodi Ordinatio. In addition, a search of data concerning the main Brazilian energy sources was carried out in the Ministry of Mines and Energy and the National Agency of Electric Energy, composing the study with the analysis of scenarios for Brazil between the years 2014 and 2024. The Umberto NXT Universal software, ISO 14040, ISO 14044, ecoinvent v 3.3 database for methodological procedures, generation and analysis of results. Among them, the main environmental impacts are concentrated in non-renewable sources, highlighting natural gas, oil and coal. Carbon dioxide is the main contributor to atmospheric emissions across the national energy matrix over the period analyzed. The IPCC 2013 was used to generate the results for GWP category 100 years. Renewable sources, such as wind, are seen in the country as promising because of the clean source and the ability to generate electricity through locations with high winds. It should be noted that the generation capacity of electric power will increase by 55.70% by the year 2024. It was verified that the performance by reference flow (1 MW) will show significant advances, it will suffer reduction of 10.40% in the environmental impact (per MW) of electric energy generated in Brazil until 2024. In this way, the work is effective for directing public policies, promotions of development actions and incentives of different energy matrices.

**Keywords:** LCA. Electricity. Environmental performance. Energy matrix.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Procedimentos metodológicos da ACV .....	27
Figura 2 - Procedimentos metodológicos .....	35
Figura 3 - Metodologia para construção do referencial teórico .....	36
Figura 4 - Fronteiras do sistema - entradas e saídas .....	45
Figura 5 - Diagrama das fontes de energia elétrica no Brasil aplicadas no Umberto NXT Universal .....	52
Figura 6 - Diagrama Sankey - IPCC 2013 (GWP 100a) para o ano de 2024 .....	57
Gráfico 1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no país em 2015.....	17
Gráfico 2 - Reservas provadas de petróleo no Brasil entre 1975 e 2015 .....	21
Gráfico 3 - Acréscimo da capacidade instalada de termelétrica no Brasil por região entre 2015 e 2024 .....	25
Gráfico 4 - Histórico da geração da matriz energética no Brasil por fontes renováveis e não renováveis entre 1970 e 2015.....	25
Gráfico 5 - Comparativo da capacidade instalada da matriz energética brasileira nos anos de 2014 e 2024 .....	39
Gráfico 8 - Impacto relativo pelas principais substâncias pelo IPCC 2013 (GWP 100a) .....	53
Gráfico 9 - Aumento da geração de energia elétrica no país de 2014 a 2024 .....	54
Gráfico 10 - Potencial de impacto absoluto (Kg CO <sub>2</sub> eq.) na geração de energia elétrica no Brasil para os anos de 2014 a 2024 segundo IPCC 2013 .....	55
Gráfico 11 - Potencial de impacto relativo (Kg CO <sub>2</sub> eq./MW) na geração de energia elétrica no Brasil para os anos de 2014 a 2024 segundo IPCC 2013 .....	58
Gráfico 12 - Quantidade relativa da capacidade de geração, impacto total e impacto para 1 MW .....	59
Quadro 1 - Identificação, título e referência dos artigos pesquisados .....	47
Quadro 2 - Informações sobre os artigos pesquisados .....	49

## LISTA DE SIGLAS

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
FI	Fator de Impacto
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading</i> (Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga)
GCPS	Guia de Compras Públicas Sustentáveis
GEE	Gases do Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
Kg CO <sub>2</sub> eq.	Quilogramas de dióxido de carbono equivalente
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PBACV	Programa Brasileiro em Avaliação do Ciclo de Vida
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SGA	Sistemas de Gestão Ambiental
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
LESP	Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis
ONU	Organização das Nações Unidas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
2.1 ANÁLISE ATUAL DAS DEMANDAS DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL ...	17
2.1.1 Hidráulica.....	17
2.1.2 Gás Natural.....	18
2.1.3 Biomassa.....	19
2.1.4 Carvão Mineral.....	20
2.1.5 Petróleo.....	20
2.1.6 Solar.....	22
2.1.7 Eólica.....	23
2.1.8 Nuclear.....	24
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	26
2.3 ESTUDOS DE ACV APLICADOS NA MATRIZ DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MUNDIAL.....	29
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	34
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	34
3.2.1 Construção do Referencial Teórico Sistematizado da Temática.....	35
3.2.2 Análise de Estudos Científicos Publicados de ACV e Sistemas de Energia Elétrica.....	37
3.2.3 Definição de Cenários para a Avaliação de Impactos Ambientais Sobre as Fontes Energéticas Brasileira.....	38
3.2.4 Realização da ACV Referente aos Cenários da Matriz de Geração de Energia Elétrica no País.....	43
3.2.4.1 Premissas adotadas.....	46
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1 ANÁLISE DOS ARTIGOS REFERENTES À ACV.....	47
4.2 ANÁLISE DE CENÁRIOS APLICADO AO UMBERTO NXT UNIVERSAL.....	51
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>
5.1 LIMITAÇÕES.....	61

5.2 TRABALHOS FUTUROS .....	61
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
<b>APÊNDICE A - Descrição das fontes energéticas brasileira de acordo com a base de dados da Ecoinvent .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a energia elétrica ganhou novos meios de geração, obtenção e aproveitamento, sendo demandada nos mais diversos tipos de equipamentos - eletrônicos, digitais, domésticos e industriais. A mesma pode ser obtida de diversas maneiras, tanto através de fontes renováveis como não renováveis. O Brasil apresenta uma das matrizes de geração de energia elétrica mais renovável do mundo, do qual segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2016) ao final de 2015, correspondia a 74,0% exclusiva de fontes renováveis.

A matriz energética destaca-se pelo conjunto dos mais variados tipos de energia elétrica que se pode produzir e consumir (MME, 2016). No Brasil, a principal fonte de energia são as hidrelétricas, representando 64,0% de geração de eletricidade em 2015. No entanto, existem outras modalidades de obtenção de energia, tais como, eólica, solar, térmica, biomassa, nuclear, derivados de petróleo, carvão mineral, gás natural e outras. A energia elétrica que chega aos domicílios, empresas e organizações, na sua grande maioria, vêm de fontes mistas (MME, 2016).

Paralelamente, existem outras fontes de energia, como as chamadas não renováveis, cuja matéria prima pode-se esgotar num certo momento. Dentre elas, destaca-se o gás natural, derivados do petróleo e carvão mineral. Já as energias renováveis estão ultimamente ganhando destaque mundialmente e proporcionando energia elétrica limpa à população por meio de novos desenvolvimentos tecnológicos. Exemplo disso, são as energias providas do sol e do vento.

A busca por conhecimentos sobre quais os potenciais impactos de cada fonte que compõe a matriz energética brasileira motiva desenvolver pesquisas científicas sobre o assunto. Nesse sentido, destaca-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), cuja ferramenta é utilizada na avaliação de impactos ambientais. No presente trabalho a ACV está diretamente relacionada com a análise da geração de energia elétrica no Brasil.

A ACV corresponde às etapas desde a retirada das matérias-primas primária da natureza que entram em um processo produtivo até a sua disposição final, cujo produto pode ser reutilizado, reciclado, sofrer a logística reversa ou ser disposto. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), essa ferramenta

compreende o ciclo de vida completo do produto, processo ou atividade (ABNT, 2009a). Logo, a ACV será utilizada no presente trabalho devido à sua importância no meio acadêmico e empresarial, além de estar vinculado à área da sustentabilidade, ponto primordial para o presente e o futuro do planeta.

Segundo Lelek et al (2016), a abordagem ACV para a avaliação de sistemas de energia a nível nacional pode ser uma ferramenta útil, pois ela indica as áreas que apresentam um potencial impacto significativo sobre o meio ambiente, levando em conta fatores relevantes que permite a comparação com diferentes alternativas. Tal abordagem pode impulsionar o progresso tecnológico que permite a transição para um caminho sustentável a médio e longo prazo para o sistema energético.

Diversos países, como Portugal (GARCIA; MARQUES; FREIRE, 2014), Polônia (LELEK et al, 2016), Reino Unido (STAMFORD e AZAPAGIC, 2014), adotam a premissa de que os estudos de ACV são importantes na geração de conhecimento e na identificação de fontes de geração de energia elétrica mais limpas, podendo contribuir na complementação e discussão do presente trabalho.

Portanto, o problema dessa pesquisa é: qual é o comportamento da avaliação do ciclo de vida das diferentes composições passadas e prospecções futuras do sistema de geração de energia elétrica no Brasil em termos de aquecimento global?

A resposta deste problema de pesquisa pretende subsidiar informações e conhecimentos para compreender o impacto de cada fonte de geração de energia no país, e auxiliar no desenvolvimento de políticas públicas, incentivos, ações, programas, que contribuam para uma matriz energética mais limpa.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho ambiental de geração de energia elétrica no Brasil de composições passadas e prospecções futuras em termos de aquecimento global.



### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir o referencial teórico sistematizado do tema;
- Analisar aspectos técnicos dos estudos científicos publicados em periódicos de alto impacto de desempenho ambiental de sistemas de energia elétrica;
- Definir cenários passados e futuros para a avaliação de impactos ambientais da matriz de geração de energia elétrica brasileira;
- Realizar a ACV referente aos cenários passados e futuros da matriz de geração de energia elétrica no país.

### 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO, 2008), existem diversas áreas do conhecimento que estão relacionadas com a Engenharia de Produção tanto na Graduação, Pós-Graduação, Pesquisa e Atividades Profissionais. Entre as 10 grandes áreas da Engenharia de Produção, o presente trabalho está inserido na - Engenharia da Sustentabilidade - através da utilização eficiente dos recursos naturais, da eficiência energética e da gestão ambiental, além disso, o trabalho está aplicado na subárea - Gestão de Recursos Naturais e Energéticos.

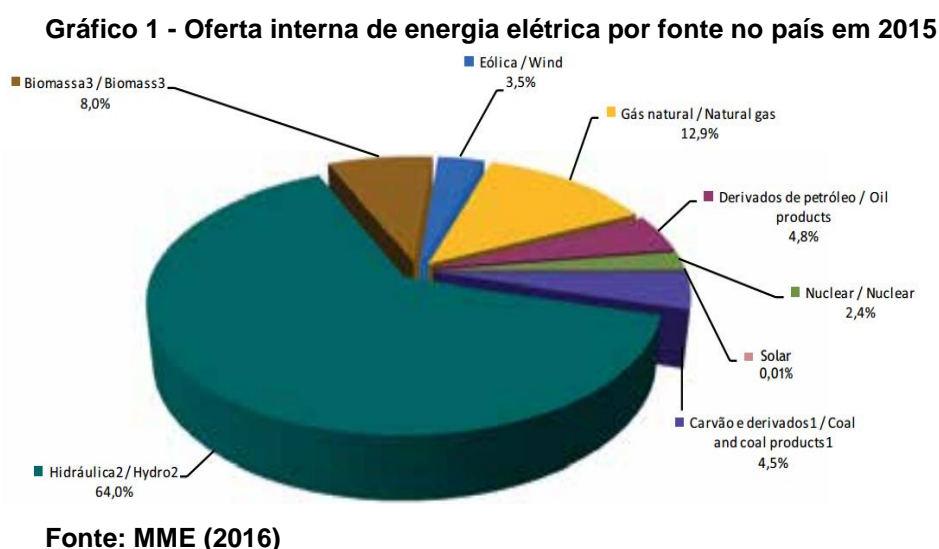
Segundo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) elaborado pela Organização das Nações Unidas (ONU) existem 17 objetivos para transformar o mundo. A meta sete, diz respeito a energia limpa e acessível a todos, com quatro principais itens que cooperam com a justificativa do presente trabalho, que são - uma em cada cinco pessoas ainda não possui acesso a eletricidade moderna; três bilhões de pessoas dependem de madeira, carvão e resíduos de animais para cozinhar e aquecer; a energia principal contribuinte para as alterações climáticas representam cerca de 60,0% das emissões globais de Gases do Efeito Estufa (GEE); reduzir a intensidade de carbono na geração de energia é um objetivo chave a longo prazo (UN, 2016).

No âmbito global, o presente tema está em constante avanço, contando com novas técnicas de ACV e melhoria em *softwares*, além do desenvolvimento de novas fontes energéticas limpas. Por isso, a motivação da escolha do atual tema.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ANÁLISE ATUAL DAS DEMANDAS DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A primeira etapa recorre ao levantamento dos tipos de fontes de geração de energia elétrica no Brasil. O Balanço Energético Nacional (BEN) lançou em 2016 (ano base referente a 2015) o relatório anual de contabilização da oferta interna de energia elétrica, transformação e consumo final no Brasil, elaborado pelo MME. Portanto, o Gráfico 1 apresenta a oferta energética no Brasil por fonte.



No Gráfico 1 estão representadas as quantidades relativas da oferta interna de eletricidade no Brasil por fonte no ano de 2015. Deste modo, fica evidente a explicação de cada fonte energética, juntamente com sua análise, que está discorrido nas próximas seções.

#### 2.1.1 Hidráulica

De acordo com o Gráfico 1, em 2015, a principal fonte energética brasileira foi a hidrelétrica, correspondendo a 64,0% da produção no país, mesmo apresentando uma redução de 3,7% comparado a produção de 2014. O MME considera como geração hidráulica o valor correspondente à produção bruta de energia, ou seja, medido nas centrais (MME, 2016).

A capacidade instalada total do sistema elétrico brasileiro no final de 2014 era de, aproximadamente, 134 mil MW (MME, 2015). O que se projeta ao longo do período é o início de um processo de diversificação da matriz energética do país, embora ainda a predominância seja a fonte hidráulica, há um crescimento expressivo de outras fontes renováveis.

As hidrelétricas possuem duas características principais para a obtenção de energia elétrica, que são: disponibilidade de recursos e facilidade de aproveitamento. A fonte é proveniente da energia potencial gravitacional, levando em conta a evaporação, condensação e precipitação da água na superfície terrestre. A relação dessa fonte energética e o Brasil apresentam uma forte e histórica interdependência, contribuindo para o crescimento econômico do país segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2002).

A obtenção da energia ocorre pela utilização de turbinas hidráulicas acopladas a um gerador de corrente elétrica, algumas podem atingir até 90,0% de eficiência. As turbinas apresentam algumas variações em suas formas, modelos e tamanhos, visto que, a mais usual é a *Francis*, sua adaptação ocorre tanto em locais de baixa como de altas quedas d'água. Porém, existem também outras turbinas conhecidas, que são a *Kaplan* e a *Pelton* nas transformações em energia elétrica (ANEEL, 2002).

### 2.1.2 Gás Natural

O gás natural correspondia a 12,9% do total de geração de eletricidade em 2015, de acordo com o Gráfico 1. A média diária de produção do ano foi de 96,2 milhões de m<sup>3</sup>/dia e o volume de gás natural importado foi de 50,4 milhões de m<sup>3</sup>/dia, a demanda industrial por gás natural registrou uma expansão de 2,5% em relação ao ano anterior (MME, 2016).

Segundo a ANEEL (2002), a utilização do gás natural na produção de energia elétrica pode ser dividida para duas utilizações, como a geração exclusiva de eletricidade e a cogeração da extração do calor e vapor para utilizar em processos industriais.

O gás natural provém de fonte não renovável e, desta forma causa impactos negativos ao meio ambiente como a emissão de poluentes atmosféricos - dióxido de

carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e, em menor escala, monóxido de carbono (CO), gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e hidrocarbonetos de baixo peso molecular (ANEEL, 2008).

Muito similar aos outros combustíveis fósseis, o gás natural representa uma mistura de hidrocarbonetos gasosos proveniente da decomposição de matéria orgânica que se decompôs ao longo de milhares de anos. Suas composições no estado bruto ou natural são basicamente metano, além de proporções variadas de etano, propano, butano, hidrocarbonetos, dióxido de carbono, dióxido de nitrogênio, água, ácido clorídrico, metanol e outras impurezas (ANEEL, 2002).

### 2.1.3 Biomassa

Percebe-se no Gráfico 1, que a biomassa representou 8,0% da produção de energia elétrica no Brasil em 2015, sendo que, em 2014 ficou com 7,3% na geração de energia elétrica.

A biomassa pode compor a queima da madeira, carvão vegetal, resíduos agrícolas, cana de açúcar, palha de cana, cavaco de madeira, licor negro, dentre outros. Vê-se que a médio e longo prazo, fontes não renováveis poderão se esgotar, deste modo, as pressões ambientais poderão aumentar o consumo energético da biomassa, visto que é de princípio renovável (MME, 2016).

De acordo com a ANEEL (2002), a fonte pode ser considerada toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal utilizado na produção de energia elétrica. A vantagem da biomassa é que no planeta existem inúmeras florestas (que podem ser originadas pelo reflorestamento) para extrair a matéria-prima. Seu aproveitamento pode ser feito de forma direta por fornos e caldeiras. Paralelamente a isso, com a intenção de aumentar a eficiência do processo, além de reduzir impactos ambientais, tem-se desenvolvido novas tecnologias como a gaseificação e a pirólise.

No Brasil, o setor sucro-alcooleiro utiliza grande quantidade de resíduos, podendo ser aproveitada na geração de eletricidade e sistemas de cogeração. Além disso, a madeira em forma de tora, lenha, carvão vegetal, cavaco podem igualmente ser aproveitados para a geração de energia (ANEEL, 2002).

#### 2.1.4 Carvão Mineral

O carvão mineral representou 4,5% da oferta interna de geração de energia elétrica, segundo o Gráfico 1. Mesmo com a baixa demanda por carvão a vapor, ele sofreu um aumento em 2015 de 9,4% comparado ao ano anterior (MME, 2016).

O carvão representa várias misturas de componentes orgânicos sólidos ao longo dos milhares de anos. De acordo com o conteúdo de carbono contido determina-se a sua qualidade, isto é, quanto maior a porcentagem de carbono, mais puro ele será. No caso dos depósitos, quanto mais próximo da superfície terrestre mais fácil e barato será a extração, caso contrário, mais difícil e com alto custo será a retirada. Essa fonte apresenta impactos ambientais negativos na sua extração, como as emissões de óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e outros poluentes para o meio atmosférico (ANEEL, 2002).

#### 2.1.5 Petróleo

No Brasil, o petróleo apresenta histórico de grandes descobertas de poços subterrâneos. Entretanto, de acordo com o **ERRO! FONTE DE REFERÊNCIA NÃO ENCONTRADA.**, os derivados do petróleo representaram, em 2015, 4,8% da produção interna para fins de geração de energia elétrica no país. Resumindo, o petróleo brasileiro na sua grande maioria é destinado à transformação de bens e combustíveis e sua minoria para geração de energia elétrica.

Conforme dados da ANEEL (2002), a fonte representa uma mistura de hidrocarbonetos, isto é, moléculas de carbono e hidrogênio, com origem na decomposição de matéria orgânica de plantas e animais microscópicos em suspensão na água. A decomposição foi realizada por milhares de anos e foram se acumulando no fundo dos oceanos, rios e lagos pela movimentação da crosta terrestre, e desta forma, transformou-se nessa composição oleosa chamada hoje de petróleo.

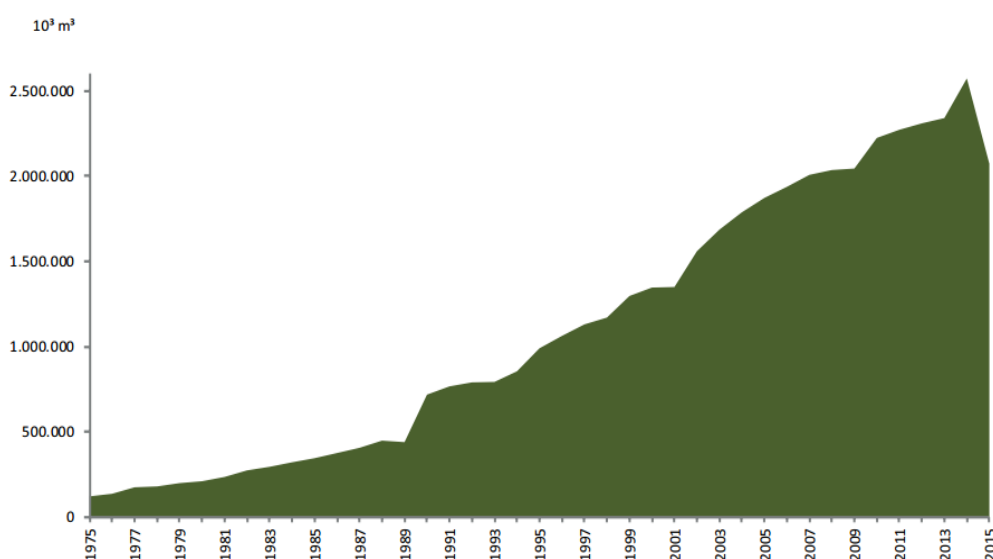
Em meados do século XIX começaram sua exploração de campos e perfuração de poços, principalmente nos Estados Unidos e Europa, visto que, durante várias décadas a fonte foi propulsora da economia internacional,

aproximadamente 50% do consumo mundial de energia primária no início da década de 70 (ANEEL, 2002).

A partir dos derivados do petróleo é que ocorre a geração de energia elétrica por meio da queima da matéria-prima em turbinas, caldeiras, motores de combustão e outros. Nesse processo, existem impactos ambientais negativos, como a emissão de poluentes para o meio ambiente, contando com dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, dióxido de enxofre e outros. Esses gases são um dos responsáveis pelo efeito estufa, e consequência disso, são as mudanças climáticas, aumento da temperatura média do planeta, alteração da biodiversidade, males à saúde humana, dentre outros (ANEEL, 2002).

O Gráfico 2 representa as reservas de petróleo no país.

**Gráfico 2 - Reservas provadas de petróleo no Brasil entre 1975 e 2015**



**Fonte: MME (2016)**

A produção nacional de petróleo cresceu 8,0% em 2015, obtendo a média de 2,44 milhões de barris diários, cuja extração, 93,4% são de origem marítima (MME, 2016). Compreende-se no Gráfico 2, que as reservas provadas de petróleo no Brasil obtiveram um crescimento desde a década de 70, provando que o país apresenta grande potencial de extração e sobrevivência em relação a essa fonte.

De acordo com os estados produtores, o Rio de Janeiro foi o responsável pela maior parcela do montante atual, ou seja, 67,0%. Já na produção terrestre, o estado do Rio Grande do Norte lidera com 31,0% do total *onshore* (MME, 2016).

Nos últimos anos, um dos principais motivos do crescimento da produção brasileira de petróleo foi devido ao aumento da produção da plataforma P-58 (Bacia de Campos), da plataforma Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga (FPSO) Cidade de Mangaratiba no pré-sal (Bacia de Santos) e a antecipação do início da operação da plataforma FPSO Cidade de Itaguaí (Bacia de Santos) (MME, 2016).

#### 2.1.6 Solar

A geração de energia elétrica através dos raios ultravioletas provém de fonte renovável, porém, essa geração ainda é baixa no Brasil (0,01% de produção nacional, tomando por base o Gráfico 1). No ano anterior sua produção de energia elétrica por captação solar era inferior e não aparecia nos gráficos de comparação do MME, já o ano 2016 sua produção ganhou pequeno destaque.

A radiação solar pode ser considerada uma fonte de energia térmica, com a finalidade de realizar o aquecimento de fluidos e ambientes, além da geração de potência mecânica ou elétrica, podendo ser convertido diretamente em energia elétrica através de certos materiais, tais como, o termoelétrico e o fotovoltaico. No primeiro ocorre o surgimento de uma força eletromotriz baseada na junção de dois condutores metálicos em certas condições, já o segundo, os fótons que a luz solar contém são transformados em energia elétrica pelo uso de células solares (ANEEL, 2002).

A radiação solar com o auxílio de técnicas da construção civil e da arquitetura podem ser usadas a favor do consumidor para a melhor iluminação e aquecimento de ambientes, através da radiação solar, e assim, aumentar a eficiência energética e reduzir custos através dessa fonte renovável e inesgotável.

Os coletores solares são utilizados geralmente em pontos residenciais e comerciais para a obtenção do aquecimento da água que será utilizada nos mais diversos tipos de uso da população. Dentre os diversos tipos de aproveitamento da energia solar, destaca-se que no Brasil os mais usados são para o aquecimento de água e geração fotovoltaica de energia elétrica, sendo que as regiões que mais utilizam essa fonte de energia são a Sul e a Sudeste devido às características climáticas (ANEEL, 2002).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), na capacidade projetada da geração de energia elétrica por fonte solar até 2023, acredita-se que haverá uma perspectiva positiva na redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, do aumento da difusão da informação ao consumidor a respeito da fonte, tornando-o informado das novas possibilidades de geração, além disso, acredita-se que disponibilidade de crédito para o consumidor seja facilitada a partir das taxas tarifárias. Segundo o MME (2016), em 2024, a geração de energia elétrica pela fonte solar pode representar 3,38% no país.

### 2.1.7 Eólica

Segundo o Gráfico 1, a energia eólica, de origem limpa e renovável, cuja matéria-prima não se esgota com o passar do tempo representou 3,5% da geração de energia elétrica no país em 2015. No ano anterior sua produção foi de 2,0%, ou seja, observa-se que no período de um ano seu crescimento foi relevante e positivo. A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 21.626 GWh em 2015, equivalente a um aumento de 77,1% em relação a 2014, quando se atingiu 12.210 GWh, superando, assim, a geração nuclear (MME, 2016). Em 2024, a fonte poderá representar 11,59% de toda a geração de energia elétrica do país.

Essa fonte representa a energia cinética contida nas massas de ar atmosférico em movimento (vento). A geração ocorre pela conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação. Essa geração acontece justamente pelo emprego de turbinas eólicas, conhecidas como aerogeradores em locais que a corrente de vento é de alta intensidade. No caso dos sistemas avançados de transmissão, aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas tem apresentado redução de custos com o passar do tempo, além da melhoria do desempenho e confiança dos equipamentos (ANEEL, 2002).

Segundo Simas e Pacca (2013), os elevados custos iniciais e desenvolvimento da tecnologia em energia eólica em relação às tecnologias tradicionais existentes indicam que essa fonte é caracterizada por ser de baixa competitividade. Complementam os autores que, as barreiras econômicas e técnicas levaram à necessidade de incentivos econômicos e regulatórios, acarretando à implementação de políticas de apoio às energias renováveis em diversos países. É



esperado que nos próximos anos a fonte se torne mais viável e competitiva economicamente.

#### 2.1.8 Nuclear

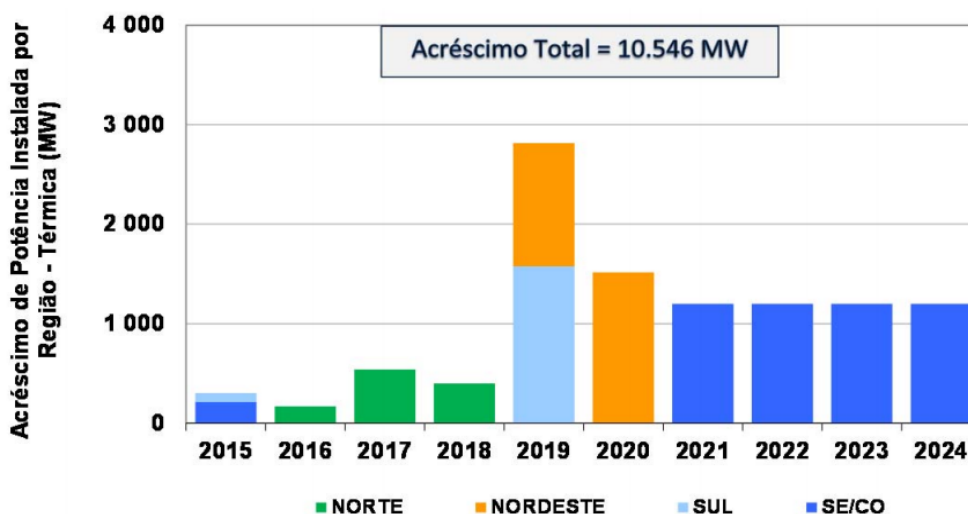
Por fim, de acordo com o Gráfico 1, a geração de energia através da fonte nuclear representou 2,4% da produção interna no país em 2015. Para o futuro, observa-se que essa fonte não apresentará uma continuidade promissora, visto que, os riscos com problemas de segurança são altos, sem contar os custos elevados de manutenção.

Segundo a ANEEL (2002), a fonte nuclear, de origem não renovável é proveniente da fissão do urânio em reator nuclear, mesmo apresentando uma complexidade em sua geração, ela aproxima-se muito da termelétrica convencional, onde é gerado calor através da queima do combustível, produzindo vapor que aciona uma turbina acoplada ao gerador de corrente elétrica.

A produção ocorre da seguinte forma: a água sofre um processo de aquecimento, chegando a 320 graus Celsius com uma pressão na casa de 157 atm. Posteriormente, a água passa pelas tubulações, indo até o gerador de vapor e vaporizando-a. Em seguida, o vapor gerado aciona uma turbina, movimenta o gerador e produz desta forma, a corrente elétrica (ANEEL, 2002).

Espera-se no Brasil o crescimento da capacidade instalada de termelétrica até 2024, os maiores investimentos ocorrerão no ano de 2019 nas regiões nordeste e sul, atingindo próximo de 3.000 MW para o ano, como mostra o Gráfico 3. Além disso, no período decenal haverá um acréscimo total de 10.546 MW na capacidade instalada de termelétrica no território brasileiro. Portanto, o Gráfico 3 apresenta o aumento da capacidade de termelétrica instalada de acordo com as regiões do país.

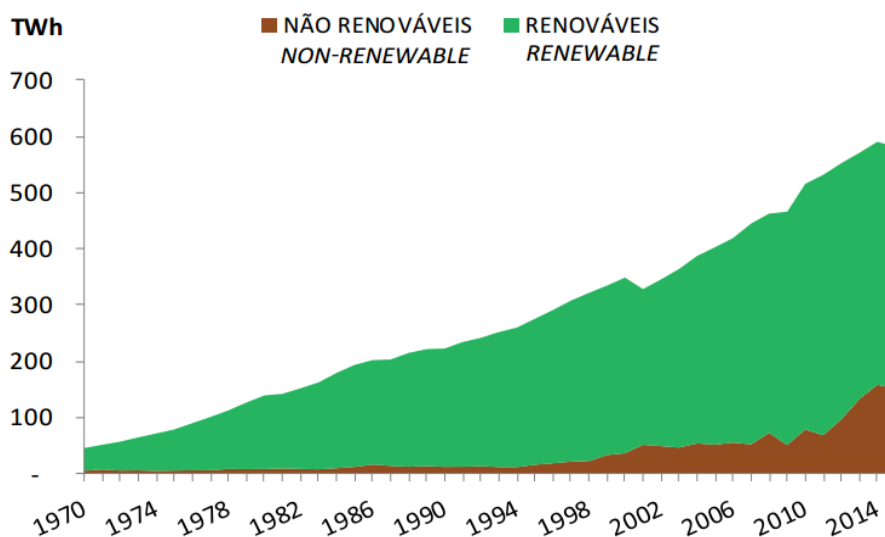
**Gráfico 3 - Acréscimo da capacidade instalada de termelétrica no Brasil por região entre 2015 e 2024**



Fonte: EPE (2015)

O Gráfico 4 apresenta a geração de energia elétrica total no Brasil através de fontes renováveis e não renováveis entre os anos de 1970 e 2015.

**Gráfico 4 - Histórico da geração da matriz energética no Brasil por fontes renováveis e não renováveis entre 1970 e 2015**



Fonte: MME (2016)

Nota-se que as fontes renováveis no Brasil sempre ficaram com a maior parte da produção de acordo com a Gráfico 4, visto que, o país investiu e ainda investe em energias limpas como as hidrelétricas, de modo que, a posição geográfica brasileira é favorecida pelos rios e quedas d'água. Em 2015 a produção de energia

elétrica por fonte hidráulica representou 64,0% o que justifica o Gráfico 4 as fontes renováveis apresentarem maior área.

Portanto, foi observada a importância da geração de energia elétrica no país, visto que, atualmente se tornou um item de extrema importância à sociedade em geral. Tratando de termos ambientais, o Brasil apresenta significativa parte de sua geração de energia elétrica provida de fonte limpa, isto é, primeiramente a fonte hídrica e em segundo plano a biomassa e eólica.

E, é deste modo, que a ACV se insere no presente trabalho fazendo complemento à eficiência energética. Nesse sentido, evidencia-se a oportunidade de elaborar trabalhos levando em conta as fontes energéticas e a ferramenta ACV. O uso dessa técnica, neste contexto, é para poder compreender, quantificar e analisar a matriz energética quanto ao desempenho ambiental.

## 2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A segunda etapa do referencial teórico refere-se à ACV, sendo uma ferramenta utilizada, principalmente, por universidades e institutos de pesquisa, além de ser uma fonte de oportunidades de negócios que vem crescendo nos últimos anos tanto na área de prestação de serviços, quanto nas indústrias.

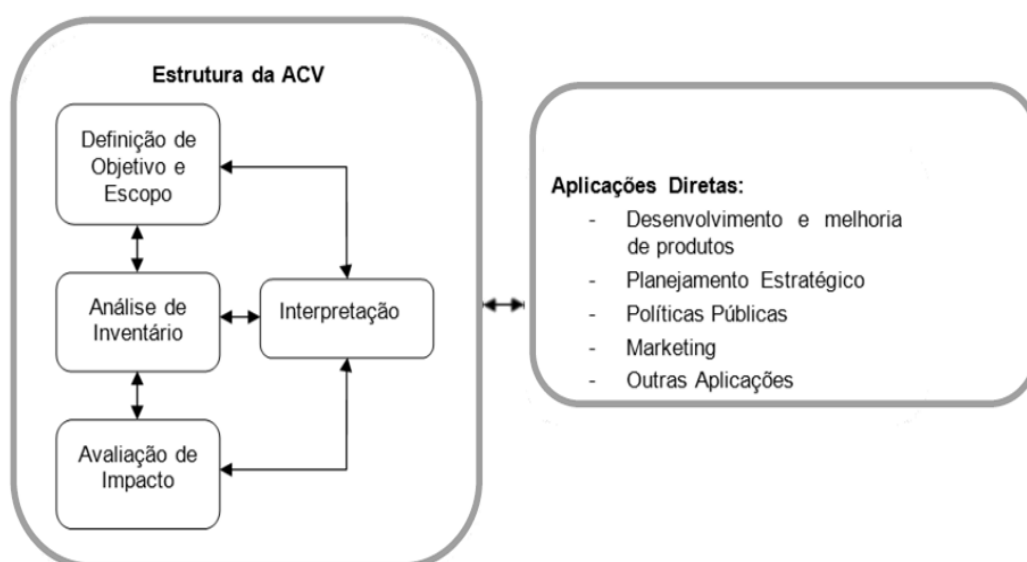
No Brasil, a disseminação do pensamento do ciclo de vida vem acontecendo, através de políticas e ações de entidades governamentais. Entre elas, Cherubini e Ribeiro (2015), destacam: a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que estabelece o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos; o Guia de Compras Públicas Sustentáveis (GCPS) na esfera Federal, que sugere o uso de rotulagens baseadas em estudos de ACV como comprovação da sustentabilidade em processos de produtos e serviços; e, o Programa Brasileiro em Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), desenvolvido e incentivado pela Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Ainda no Brasil, apesar da ferramenta ser recente quando comparada com países europeus, a comunidade de ACV foi representada por 27 grupos e/ou laboratórios de pesquisa, 18 empresas de consultoria e 64 empresas/indústrias que

utilizam a ACV como prática corrente de gestão ambiental (CHERUBINI e RIBEIRO, 2015).

Uma abordagem existente na ACV, diz a respeito da família de normas ISO (*International Standard Organization* - Organização Internacional para Padronização) 14000 que se trata de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA). Nessa família existem duas normas que abordam exclusivamente a Avaliação do Ciclo de Vida, a primeira é a ISO 14040 (ABNT, 2009a), tratando de Princípios e Estrutura da norma. A segunda, está relacionada com Requisitos e Orientações, que corresponde a ISO 14044 (ABNT, 2009b). A Figura 1 mostra os procedimentos metodológicos relacionado a ISO 14040 segundo sua estrutura da ACV e aplicações diretas.

**Figura 1 - Procedimentos metodológicos da ACV**



**Fonte: ABNT (2009a)**

A Figura 1 compreende as quatro fases da ISO 14040 - Definição de Objetivo e Escopo; Análise de Inventário; Avaliação de Impacto e Interpretação. Essas etapas estão descritas abaixo, de acordo com a ISO 14040 (ABNT, 2009a):

O Objetivo e o Escopo pretendem-se determinar os propósitos e necessidades com o estudo, definição do público alvo e requisitos para o relatório de resultados, além da abrangência do estudo e das definições de fronteiras, a definição da metodologia no modelo de coleta de dados, a abrangência da localidade do estudo e as unidades funcionais.

Já a Análise de Inventário, dentre outras, indica a fase da ACV que quantifica e identifica as entradas e saídas do sistema e a realização do levantamento dos aspectos ambientais. As entradas do sistema podem ser consideradas basicamente matérias-primas e energia. As saídas são as emissões, os resíduos, coprodutos, e as chamadas descargas ambientais.

Na Avaliação de Impacto, a abordagem remete a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos, como por exemplo, mensuração do Potencial de Aquecimento Global (GWP - *Global Warming Potential*) em termos de força radioativa em unidade de massa para GEE, além da mensuração de outros itens, como eutrofização, ecotoxicidade, consumo de recursos naturais, toxidade humana.

No caso da Interpretação, ela identifica os pontos críticos do ciclo de vida do produto que precisa de melhorias, além de realizar uma avaliação do estudo, seguindo as limitações, recomendações e conclusões.

Por fim, ao que se refere à avaliação de impactos ambientais e a saúde humana, a ACV tem ganhado atenção notável perante todas as diversas ferramentas existentes (WANG; CHAN; LI, 2015). A ACV pode ser caracterizada como a técnica mais importante na gestão ambiental industrial moderna (LÖFGREN; TILLMAN; RINDE, 2011).

De acordo com a ISO 14040 (ABNT, 2009a), existem alguns estágios que compreendem o ciclo de vida de um produto, além dos limites do próprio sistema, que são: *Gate to Gate* (inclui do portão de entrada da fábrica até o portão de saída da mesma, estabelece todos os processos produtivos internos da indústria); *Cradle to Gate* (estabelece desde a extração da matéria-prima primária, incluindo as transformações fabris até o portão de saída da fábrica); *Gate to Grave* (esse ocorre a partir do portão de saída da fábrica, podendo passar pelos estágios de distribuição, uso, manutenção, logística reversa, desmontagem, reciclagem, disposição final); e por fim o *Cradle to Grave* (aborda todo o ciclo de vida do produto, ou seja, é estabelecido desde o berço - a retirada da matéria-prima - até o túmulo - disposição final do produto após o cumprimento de sua função).

## 2.3 ESTUDOS DE ACV APLICADOS NA MATRIZ DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MUNDIAL

Evidencia-se que vários autores, de diversos países e universidades têm elaborado pesquisas e trabalhos referentes à ACV aplicados na matriz de geração de energia elétrica, deste modo, a seguir foram analisadas abordagens destes autores nacionais e internacionais, com intuito de caracterizar os principais avanços e resultados encontrados em diferentes contextos.

Şengül et al (2016), elaborou na Turquia um estudo de potenciais impactos ambientais a partir da extração da lenha para a geração de energia elétrica, cuja foi avaliada através da ACV baseado em dados de 12 locais de mineração do país. No estudo foi utilizado os métodos CML, TRACI e ReCiPe e com isso pôde-se observar as emissões locais e quantificar os impactos ambientais.

Outro estudo na Turquia mostrou que o país é um dos mais ricos do mundo em termos de recursos de energia geotérmica, com o potencial global atual de 31,5 GW. Com o vento, apenas uma fração do potencial geotérmico é realizado no momento, com a capacidade elétrica instalada de 94,2 MW, que em 2010 gerou 668 GWh (ATILGAN e AZAPAGIC, 2016). Complementam os autores que o estudo representou a primeira tentativa para analisar o ciclo de vida através de impactos ambientais de eletricidade renovável no país e a energia geotérmica é a melhor opção para seis impactos ambientais, tais como, eutrofização, esgotamento da camada de ozônio, toxicidade humana e outras três categorias de eco-toxicidade.

Desde que a Turquia é signatária do Protocolo de Quioto, as tecnologias energéticas sustentáveis existentes no país caminham para tentar reduzir as emissões de GEE e impactos ambientais relacionados à eletricidade. No entanto, os impactos ambientais do setor energético são desconhecidos e não há nenhuma base para ajudar o país a identificar o melhor caminho a seguir, deste modo, foi desenvolvido o trabalho por Atilgan e Azapagic (2016), para estimar os impactos ambientais da energia elétrica na Turquia pela primeira vez baseado no ciclo de vida nos últimos 25 anos (1990-2014). Um dos resultados sugere que os principais impactos do estudo foram relacionados com a eutrofização, destruição da camada de ozônio e categorias de toxicidade.

Com base na pesquisa desenvolvida por Stamford e Azapagic (2014), onde realizou uma abordagem do ciclo de vida para avaliar a sustentabilidade de cenários futuros de energia elétrica no Reino Unido. Os autores utilizaram o método CML para realizar a análise do estudo. Cinco cenários até 2070 foram considerados com uma gama de opções tecnológicas apropriadas para o país.

O estudo elaborado por Berrill et al (2016), utilizou uma estrutura de modelagem integrada a ACV híbrido para examinar 44 cenários diferentes para o fornecimento de eletricidade na Europa no ano de 2050. A ferramenta ACV incorporou os efeitos de um mix de geração de eletricidade e insumos de energia elétrica em sua produção. Os cenários foram gerados pelo ReMix. Esse modelo de otimização do sistema de energia é particularmente adequado para a análise, devido à sua descrição explícita de tecnologias de armazenamento de energia e extensões de rede de transmissão exigidas em cada cenário, além disso, a sua resolução geográfica é detalhada cobrindo toda a Europa. A conclusão do estudo indica que, entre outras, o aumento de fontes renováveis como eólica e solar irão criar aspectos positivos além das reduções das emissões de GEE nos próximos anos.

Outro trabalho, ainda na Europa, abordou análise do ciclo de vida completo de geração de eletricidade e abastecimento em Portugal, que foi realizada com o objetivo de analisar os efeitos das mudanças recentes difundidas no sistema elétrico por meio dos impactos ambientais, a fim de compreender a demanda futura de eletricidade e reduzir potenciais impactos ambientais. Uma redução global dos impactos foi observada entre os anos de 2003 a 2012. Nos últimos 10 anos, a energia renovável mais do que dobrou sua capacidade de produção, impulsionado pelos grandes investimentos que ocorreram especialmente na fonte eólica instalada. Por fim, os autores utilizaram alguns métodos de AICV, tais como, IPCC 2007 e CML para compor o estudo (GARCIA; MARQUES; FREIRE, 2014).

No Reino Unido foi desenvolvido um modelo para ajudar a aperfeiçoar a oferta futura de energia elétrica considerando os custos de ciclo de vida e os impactos ambientais. Os custos econômicos e os impactos foram determinados com base no ciclo de vida. No caso da ilustração do modelo, foram consideradas as possíveis vias para o sistema de eletricidade no Reino Unido. O método utilizado foi o CML 2001, juntamente com a otimização de duas funções, os custos do sistema de ciclo de vida e GWP (BARTECZKO-HIBBERT et al, 2014).

Ainda no Reino Unido, o trabalho elaborado por Rentizelas e Georgakellos (2014), foi para investigar como a decisão estratégica do mix de geração de energia elétrica para os anos de 2012 a 2050, pode ser afetada pelo custo das várias opções de tecnologia de produção de eletricidade disponíveis, não apenas em relação a sua operação, mas levando em conta seu ciclo de vida. Os resultados do estudo mostraram que a maior parte da nova capacidade de geração até o ano de 2020 deve ser renovável, além disso, o custo de geração de eletricidade a partir de fontes de combustíveis convencionais deverá aumentar no futuro.

Assim como no presente trabalho, um estudo elaborado por Dale et al (2013), abordou as principais emissões de GEE relacionados à energia elétrica, indicando que no futuro as hidrelétricas continuarão como fonte principal no país, entretanto, fontes limpas como eólica e solar possuem grande possibilidade de crescimento.

Além disso, um estudo realizado na Dinamarca discorreu sobre uma visão sistemática das principais emissões na geração de eletricidade com base na análise crítica dos estudos de ACV relevantes na literatura, levando em conta as emissões de GEE (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013).

Na Bélgica, segundo Rodríguez et al (2013), no estudo teórico de energia elétrica pode-se concluir que a energia nuclear, a biomassa e a eólica irão desempenhar um papel importante na redução GWP no país nos próximos anos. Foi possível obter também um caminho de transformação na matriz energética belga considerando uma base potencial de indicador de sustentabilidade previamente definido no ciclo de vida.

Pela primeira vez foi realizada uma ACV para a geração de energia elétrica na Polônia, com o objetivo de determinar e comparar o impacto potencial de geração de energia sobre o meio ambiente nos anos de 2007, 2010 e 2012. Um dos resultados foi a necessidade de atingir uma redução de 20,0% nas emissões de CO<sub>2</sub> até 2020 no país. Além disso, verificou-se na análise que as maiores emissões de GEE estão relacionados com a produção de energia elétrica a partir do carvão (LELEK et al, 2016).

Ainda na Europa, a Itália elaborou um estudo com o objetivo de sugerir uma abordagem metodológica para realizar uma comparação mais viável das diversas tecnologias renováveis, tornando assim, a melhor utilização dos resultados da ACV para informar aos políticos. Foi realizada uma revisão de mais de 100 estudos de



casos diferentes - em matéria de energia solar, eólica, hídrica e geotérmica. Na comparação dos resultados, a energia eólica obteve as mais baixas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente devido à sua fonte ser renovável e limpa (ASDRUBALI et al, 2015).

Já no continente americano um trabalho realizado no Canadá forneceu uma ACV das emissões de GEE relacionadas com a geração de eletricidade em 2008 na cidade de Ontário. A análise foi conduzida para informar decisões relativas à operação do sistema de energia elétrica, a política energética e os cálculos de emissões de GEE. Reconhece-se, no entanto, que o governo do país continuou o progressivo de instalações de energia provenientes do carvão até 2014, além de expandir a geração renovável de energia elétrica como, eólica e solar. Os resultados refletem o impacto do aquecimento global da geração de eletricidade, além de outros fatores ambientais, sociais, culturais, institucionais e econômicos (MALLIA e LEWIS, 2013).

Outro continente não abordado ainda foi a Oceania. A Austrália elaborou pela primeira vez uma abordagem de ACV completo para análise de cenários de geração de energia elétrica. O trabalho apresentou uma ACV híbrido que se baseia em uma solução analítica de *input-output*. A abordagem foi capaz de capturar as emissões de carbono incorporadas na cadeia de abastecimento do fornecimento de eletricidade. Além disso, o trabalho investigou quão eficaz foi a aplicação em larga escala de energia renovável, incluindo o total de emissões durante todo o ciclo de vida de diferentes tecnologias. O país desfruta dos benefícios de recursos energéticos abundantes, tanto fóssil como renovável (WOLFRAM; WEIDMANN; DIESENDORF, 2016).

Por fim, outro trabalho referente à ACV e fontes energéticas realizado em Maurício foi considerado o primeiro trabalho com a abordagem ciclo de vida e impactos ambientais da energia elétrica com o objetivo de informar os produtores de eletricidade e os decisores políticos sobre os impactos atuais e ambientais no setor da eletricidade no país. Os resultados sugerem que a eletricidade a partir do petróleo e do carvão apresentam os maiores impactos. O GWP da geração de eletricidade em Maurício foi estimado em 868 kg eq./MWh CO<sub>2</sub>. Com base no consumo de energia elétrica em 2012, foi equivalente a 2,22 Mt eq./ano CO<sub>2</sub>. No entanto, outras fontes renováveis, como a solar e eólica poderiam desempenhar um

papel positivo no futuro, dado que elas são abundantes no país (BRIZMOHUN ET AL, 2015).

Portanto, observa-se que há predominância de trabalhos em países europeus, visto que, todos os autores utilizaram a metodologia ACV juntamente com o uso de algum método, como IPCC, ReCipe, CED, CML, dentre outros. Um dos principais objetivos dos trabalhos aborda a quantia que cada fonte energética emite de GGE em seu país, além de indicar as reduções no GWP. O uso de fontes de energia renovável, como eólica e solar, são de origem limpa, além de serem sempre bem-vindas no portfólio da geração de energia elétrica. Com isso, vários autores fizeram uma previsão para a geração de energia elétrica a longo prazo que apontam justamente as fontes renováveis, principalmente as provenientes do sol e do vento como as mais limpas e menos impactantes ao meio ambiente.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com Gil (1994), a pesquisa do presente trabalho abordou a natureza aplicada, isto é, a utilização de conhecimentos e dados foram obtidas para a finalidade prática. A investigação dos dados quanto às fontes energéticas brasileiras, foi identificado através da análise das áreas prioritárias frente à matriz de geração de energia elétrica do país.

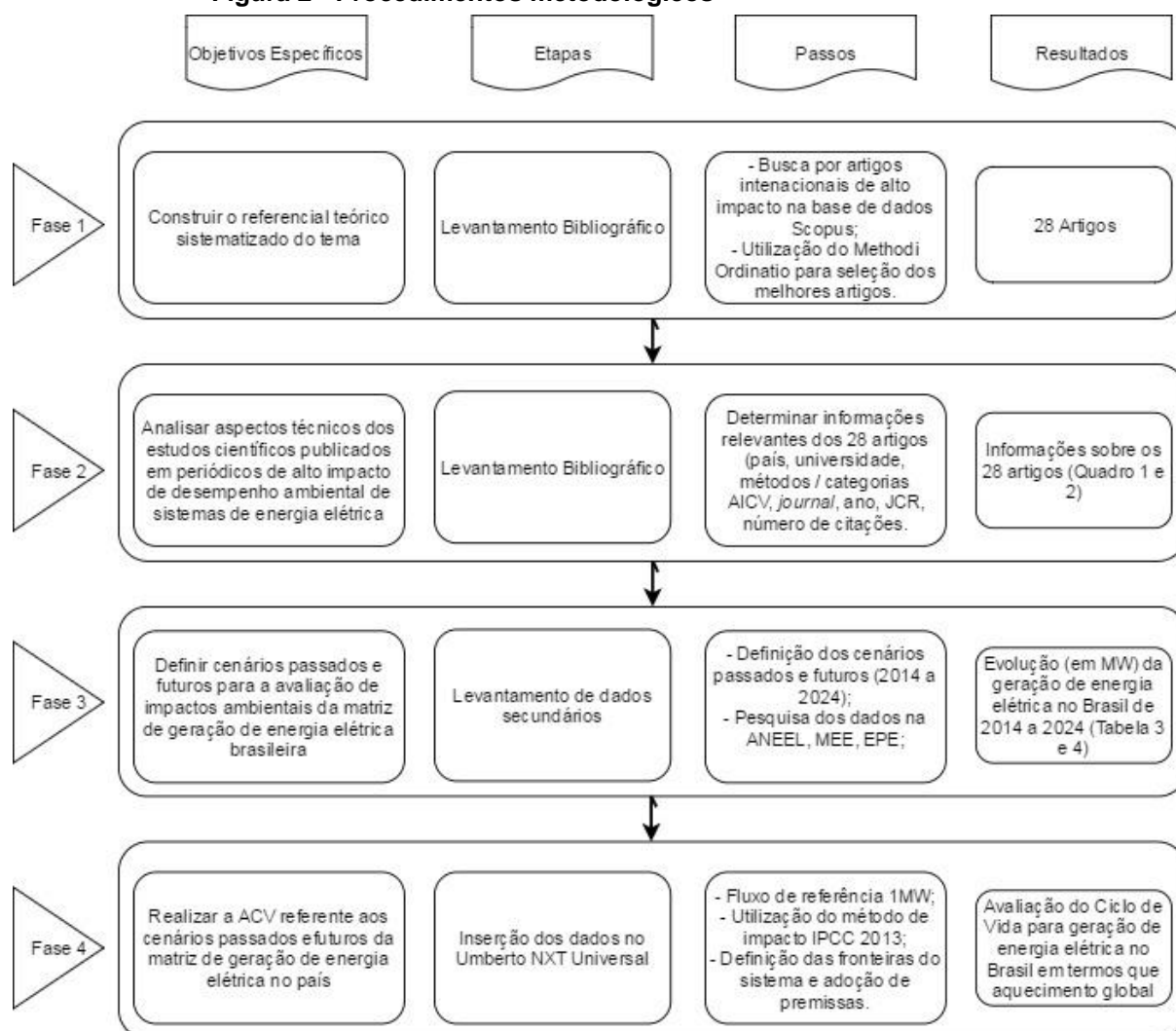
Além disso, com relação aos objetivos, o nível da pesquisa está relacionado com a forma descritiva, cuja característica faz relações entre diversas variáveis. O nível é predominantemente descritivo, de forma que, a explicação dos métodos e fatos ocorre de forma paralela ao longo do trabalho (GIL, 1994).

Por fim, o delineamento ou procedimentos foram relacionados com a pesquisa bibliográfica, isto é, os dados foram obtidos através de fontes bibliográficas, como periódicos, livros e outros (GIL, 1994). A pesquisa documental também foi abordada no presente trabalho, através de dados do MME e da ANEEL. Com isso, uma das principais vantagens desse procedimento é que não exige contato direto com os sujeitos da pesquisa, além do baixo custo de investigação.

#### 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção foram abordados quatro procedimentos metodológicos que estão relacionados com os quatro objetivos específicos do presente trabalho. A Figura 2 mostra de forma resumida os procedimentos metodológicos abordados no trabalho.

Figura 2 - Procedimentos metodológicos



Fonte: Autoria própria (2017)

### 3.2.1 Construção do Referencial Teórico Sistematizado da Temática

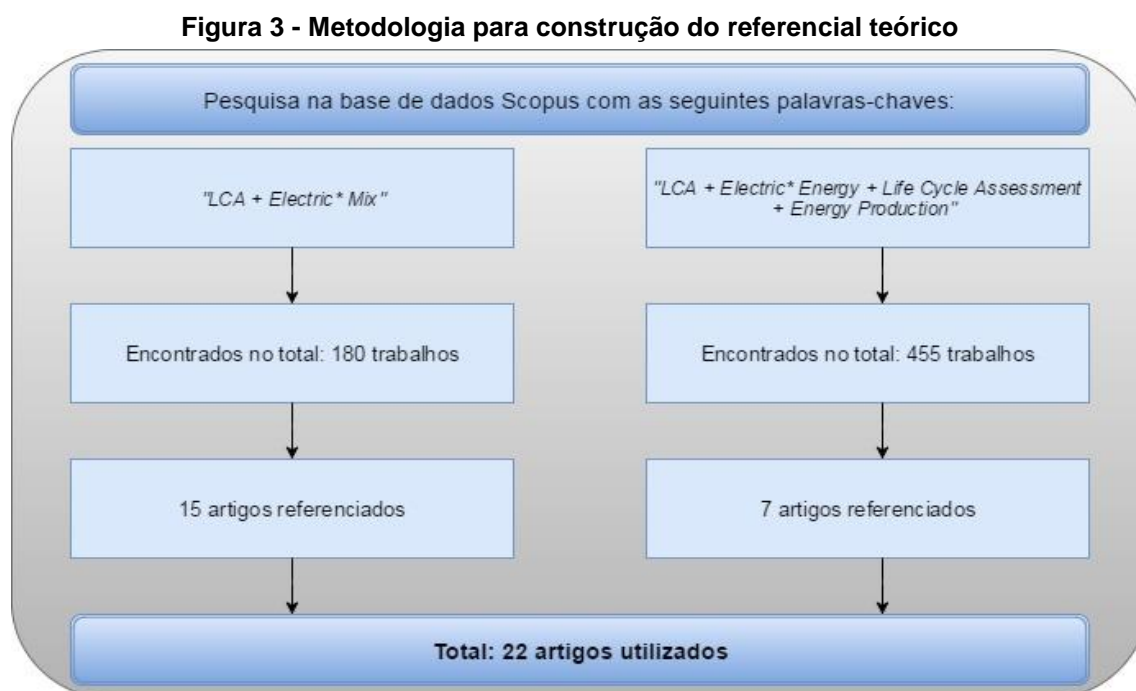
Para a realização do levantamento científico optou-se pela utilização do *Methodi Ordinatio* (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015), onde equaciona os três fatores mais importantes a serem considerados na busca de um artigo científico, cujos fatores são: o ano de publicação do artigo; o número de citações que o artigo obteve até o presente momento e o fator de impacto (JCR). Portanto, o método auxilia a encontrar os artigos relevantes em cada tema e apresenta a fórmula (1):

$$\text{Methodi Ordinatio} = (IF/1000) + \alpha * [10 - (\text{Research Year} - \text{Publish Year})] + (\sum Ci) \quad (1)$$

- IF: Fator de Impacto do artigo;
- $\alpha$ : fator de ponderação que varia de 1 a 10 para ser atribuída pelo pesquisador;
- *Research Year*: ano em que a pesquisa foi desenvolvida;
- *Publish Year*: ano em que o documento foi publicado;
- $\Sigma Ci$ : número de vezes que o artigo tem sido citado.

Deste modo, o pesquisador indica as variáveis para todos os artigos filtrados em bases de dados. Os principais trabalhos resultaram em uma maior pontuação, visto que, quanto mais recente for publicado o trabalho, quanto maior o número de citações e maior o fator de impacto, resulta numa alta pontuação.

A Figura 3 mostra de forma resumida o método para a construção do referencial teórico do trabalho.



Fonte: Autoria própria (2016)

A pesquisa foi realizada na base de dados internacional Scopus com as seguintes combinações de palavras-chaves “LCA + Electric\* Mix\*” e foram apresentados um total de 180 artigos. O filtro para escolha dos artigos mais apropriados foi feito através do *Methodi Ordinatio*, no qual foram selecionados 15 artigos, com base na leitura dos *abstracts* para verificar concordância ao tema da

pesquisa. Os artigos selecionados estão referenciados no Quadro 1, na seção dos resultados e discussões, com as identificações de 1 a 15.

Posteriormente, foi combinado na mesma base de dados, “*LCA + Electric\* Energy + Life Cycle Assessment + Energy Production*” e foram apresentados no total 455 artigos, segundo as quatro palavras-chaves. O filtro para seleção dos trabalhos foi realizado através do *Methodi Ordinatio*. Por fim, ficaram sete artigos a serem referenciados. Esses trabalhos estão disponibilizados no Quadro 1 com as identificações de 16 a 22.

Além disso, foram incluídos outros artigos considerados válidos a partir de citações dos artigos previamente selecionados, isto é, esses trabalhos foram encontrados individualmente sem realizar uma pré-seleção. Nesse caso, eles passaram a compor o Quadro 1 com as identificações de 23 a 26.

### 3.2.2 Análise de Estudos Científicos Publicados de ACV e Sistemas de Energia Elétrica

Dentre os artigos pesquisados, foram filtradas as publicações mais recentes, ou seja, entre os anos de 2012 e 2016. Nos artigos pesquisados levou-se em conta o Fator de Impacto JCR  $\geq 3$  que abordavam os temas de ACV e geração de energia elétrica nos diversos países do mundo. Há quatro artigos, com JCR  $< 3$ , identificados no Quadro 2 que foram considerados importantes para os objetivos propostos no trabalho.

Todos os artigos citados acima foram utilizados no presente trabalho, tanto para a leitura e construção do referencial teórico, como para a análise dos métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) utilizado por cada autor em seu trabalho.

Os critérios analisados nos 26 artigos selecionados foram: análise dos métodos de AICV utilizados, localidade de publicação, universidade/instituição que foi desenvolvido a pesquisa, o ano de publicação, o periódico/*journal* que foi publicado, o Fator de Impacto JCR, o número de citações que o artigo obteve até o presente momento (Outubro de 2016) e a pontuação no *Methodi Ordinatio*.

### 3.2.3 Definição de Cenários para a Avaliação de Impactos Ambientais Sobre as Fontes Energéticas Brasileira

A definição dos cenários foi construída a partir do histórico de dados encontrado na literatura para a composição da matriz elétrica nacional, de acordo com MME, EPE e ANEEL.

Os cenários envolvem dados de geração de energia elétrica no Brasil entre os anos de 2014 a 2024. Através dos dados, pode-se avaliar e discutir as principais melhorias e perdas ao longo dos anos. Os dados futuros são ditos como projeções de como se comportará a geração da matriz energética brasileira, evidenciando os principais avanços e retrocessos por meio das fontes renováveis e não renováveis. A etapa da elaboração da parte descritiva das fontes energéticas brasileira foi obtida pelos dados da ANEEL.

Deste modo, a Tabela 1 apresenta a quantidade (em MW) e a participação relativa (em %) da capacidade de geração da matriz elétrica no território nacional entre os anos de 2014 e 2024, mostrando as principais fontes do país, cujas estão separadas em renováveis e não renováveis.

Para as fontes renováveis, a hidrelétrica apresentará um acréscimo de 82.789 MW em 2014 para 109.972 MW em 2024 em sua geração de eletricidade. Para a sua participação relativa, a fonte representa em 2014, 67,60% de geração, e em 2024 atinge 56,70%. Essa redução na quantidade relativa (em %) ocorre devido ao aumento de geração por outras fontes, como eólica, solar, biomassa, gás natural.

A fonte não renovável que apresenta maior destaque na Tabela 1 é o gás natural, que parte de 11.043 MW em 2014 e quase dobra sua capacidade de geração em 2024. Já as outras fontes não renováveis, ao longo do período da análise, permanecerão sem grandes alterações significativas.

**Tabela 1 - Projeção da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil entre 2014 e 2024**

FONTE	2014 <sup>(c)</sup>	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	MW										
<b>RENOVÁVEIS</b>	<b>111.269</b>	<b>118.380</b>	<b>127.866</b>	<b>135.486</b>	<b>142.972</b>	<b>145.177</b>	<b>145.560</b>	<b>151.554</b>	<b>158.102</b>	<b>165.460</b>	<b>173.417</b>
HIDRO <sup>(a)</sup>	82.789	86.540	92.152	96.587	101.354	102.040	102.115	103.549	105.137	107.335	109.972
IMPORTAÇÃO <sup>(b)</sup>	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
BIOMASSA + EÓLICA + PCH + SOLAR	21.480	24.840	28.714	31.899	34.618	36.137	36.445	41.005	45.965	51.125	56.445
<b>NÃO RENOVÁVEIS<sup>(d)</sup></b>	<b>21.609</b>	<b>21.913</b>	<b>22.082</b>	<b>22.092</b>	<b>22.493</b>	<b>26.714</b>	<b>28.230</b>	<b>29.430</b>	<b>30.630</b>	<b>31.830</b>	<b>33.030</b>
URÂNIO	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	3.395	3.395	3.395	3.395	3.395	3.395
GÁS NATURAL	11.043	11.317	11.486	12.026	12.427	14.903	16.419	17.619	18.819	20.019	21.219
CARVÃO	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404	3.404
ÓLEO COMBUSTÍVEL <sup>(e)</sup>	3.586	3.586	3.586	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201
ÓLEO DIESEL	1.239	1.269	1.269	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124
GÁS DE PROCESSO	687	687	687	687	687	687	687	687	687	687	687
<b>TOTAL</b>	<b>132.878</b>	<b>140.293</b>	<b>149.948</b>	<b>157.578</b>	<b>165.465</b>	<b>171.891</b>	<b>173.790</b>	<b>180.984</b>	<b>188.732</b>	<b>197.290</b>	<b>206.447</b>
<b>Participação Relativa (%)</b>											
<b>RENOVÁVEIS</b>	<b>83,7%</b>	<b>84,4%</b>	<b>85,3%</b>	<b>86,0%</b>	<b>86,4%</b>	<b>84,5%</b>	<b>83,8%</b>	<b>83,7%</b>	<b>83,7%</b>	<b>83,8%</b>	<b>84,0%</b>
HIDRO <sup>(a)</sup>	67,6%	66,7%	66,1%	65,7%	65,5%	63,4%	62,8%	61,0%	59,3%	57,9%	56,7%
OUTRAS	16,2%	17,7%	19,1%	20,2%	20,9%	21,0%	21,0%	22,7%	24,4%	26,0%	27,3%
<b>NÃO RENOVÁVEIS</b>	<b>16,3%</b>	<b>15,6%</b>	<b>14,7%</b>	<b>14,0%</b>	<b>13,6%</b>	<b>15,5%</b>	<b>16,2%</b>	<b>16,3%</b>	<b>16,3%</b>	<b>16,2%</b>	<b>16,0%</b>
URÂNIO	1,5%	1,4%	1,3%	1,3%	1,2%	2,0%	2,0%	1,9%	1,8%	1,7%	1,6%
OUTRAS	14,8%	14,2%	14,7%	14,1%	13,4%	12,5%	12,5%	13,0%	13,4%	13,7%	14,5%
<b>TOTAL</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

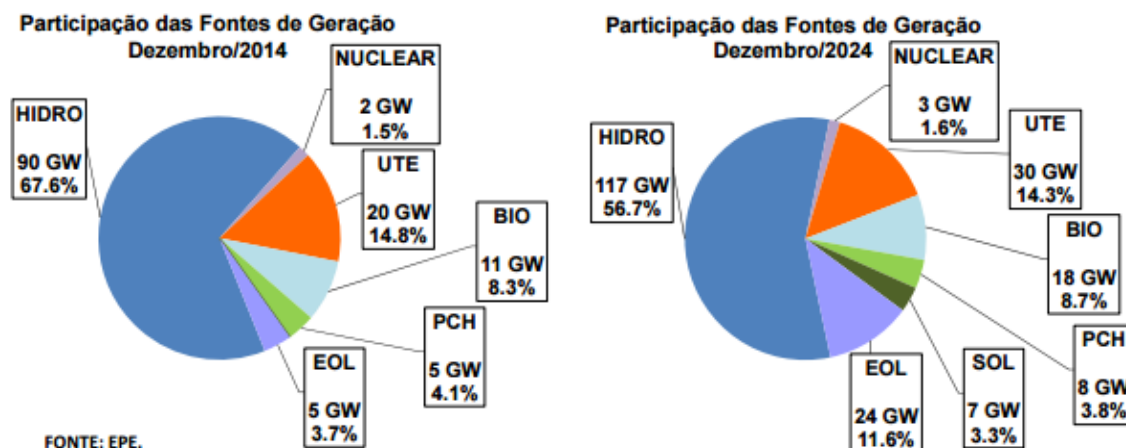
Notas: (a) Os valores da tabela indicam a potência instalada em dezembro de cada ano, considerando a motorização das UHE.  
 (b) Estimativa de importação da UHE Itaipu não consumida pelo sistema elétrico paraguaio.  
 (c) Não considera a autoprodução, que, para os estudos energéticos, é representada como abatimento de carga. A evolução da participação da autoprodução de energia é descrita no Capítulo II.  
 (d) Valores de capacidade instalada em dezembro de 2014, incluindo as usinas já em operação comercial nos sistemas isolados, com previsão de interligação dentro do horizonte do estudo.  
 (e) Contabiliza as usinas que serão descomissionadas ao longo do período devido à interligação de sistemas isolados.

Fonte: EPE.

Fonte: EPE (2015)

Além da Tabela 1, foram analisados e confirmados os dados de 2014 e 2024 no Gráfico 5, cujo mostra a evolução da capacidade instalada por fonte de geração.

**Gráfico 5 - Comparativo da capacidade instalada da matriz energética brasileira nos anos de 2014 e 2024**



Fonte: EPE (2015)



Fontes renováveis como, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), eólica, solar, biomassa estão somadas na Tabela 1. Já no Gráfico 5, essas fontes estão dispostas separadas, auxiliando a coleta de dados por fonte para a inserção na Tabela 3.

Em 2014, as fontes renováveis no Brasil representaram um somatório de 111 GW ou 83,74% de produção de eletricidade. Para 2024, a representação será de 174 GW ou 84,04%. Outras fontes geradoras, como nuclear, Usinas Termelétrica de Energia (UTE), biomassa, PCH, apresentarão avanço na quantidade da capacidade instalada, porém a participação relativa sofrerá pouca mudança entre 2014 e 2024.

Logo, conclui-se que, a quantidade (em MW) de geração de energia elétrica por fonte renovável tende a aumentar até 2024, entretanto, sua participação relativa não apresenta um acréscimo significativo, contando com aumento de aproximadamente 0,30%.

Por fim, a Tabela 2 se difere das ilustrações anteriores apresentando outras fontes secundárias na geração de energia elétrica no país, tais como, biomassa (cana de açúcar, licor negro e outros), importação de energia elétrica de países como Paraguai, Argentina, Venezuela e Uruguai.

**Tabela 2 - Capacidade atual instalada na geração de energia elétrica no Brasil (Maio de 2017)**

Fonte			Capacidade Instalada			Total			
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	( KW )	%	Nº de Usinas	( KW )	%	
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	395	10.881.420	6,7851	413	10.994.275	6,8555	
		Biogás-AGR	3	1.822	0,0011				
		Capim Elefante	3	65.700	0,0409				
		Casca de Arroz	12	45.333	0,0282				
	Biocombustíveis líquidos	Etanol	1	320	0,0001	3	4.670	0,0029	
		Óleos vegetais	2	4.350	0,0027				
		Carvão Vegetal	8	54.097	0,0337				
	Floresta	Gás de Alto Forno - Biomassa	10	114.265	0,0712	87	2.830.248	1,7648	
		Lenha	2	14.650	0,0091				
		Licor Negro	17	2.261.136	1,4099				
		Resíduos Florestais	50	386.100	0,2407				
		Resíduos animais	11	2.099	0,0013				
	Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RU	15	114.680	0,0715	16	117.380	0,0731	
		Carvão - RU	1	2.700	0,0016				
Eólica	Cinética do vento	Cinética do vento	424	10.393.742	6,4810	424	10.393.742	6,4810	
Fóssil	Carvão mineral	Calor de Processo - CM	1	24.400	0,0152	24	3.830.995	2,3888	
		Carvão Mineral	13	3.389.465	2,1135				
		Gás de Alto Forno - CM	10	417.130	0,2601				
		Calor de Processo - GN	1	40.000	0,0249				
	Gás natural	Gás Natural	160	12.972.617	8,0891	161	13.012.617	8,1140	
		Calor de Processo - OF	1	147.300	0,0918				
	Outros Fósséis	Petróleo	Gás de Refinaria	6	315.560	0,1967	2231	10.127.160	6,3148
			Óleo Combustível	43	4.056.847	2,5296			
		Óleo Diesel	2164	4.774.425	2,9771				
		Outros Energéticos de Petróleo	18	980.328	0,6112				
Hídrica	Potencial hidráulico	Potencial hidráulico	1264	98.726.557	61,561	1264	98.726.557	61,561	
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,2408	2	1.990.000	1,2408	
Solar	Radiação solar	Radiação solar	44	23.761	0,0148	44	23.761	0,0148	
Importação		Paraguai		5.650.000	3,5230			5,0944	
		Argentina		2.250.000	1,4029				
		Venezuela		200.000	0,1247				
		Uruguai		70.000	0,0436				
		Total		4681	160.370.804				100

Fonte: ANEEL (2017)

De acordo com a Tabela 2, a biomassa apresenta vários níveis de origem, entretanto, foi determinada a escolha de três subfontes, como cana de açúcar, licor negro e outros. O termo “outros” foi criado na Tabela 3 e designa todas as outras subfontes de menores quantidades de produção a partir da biomassa. Logo, foi observado que as duas principais subfontes dentro da biomassa foram a cana de açúcar e o licor negro (madeira). Os dados foram extraídos do sistema online da ANEEL, cujo é atualizado diariamente, portanto, representa dados atuais do mês de maio de 2017 (ANEEL, 2017).

A subfonte licor negro é um resíduo resultante do processo de separação da pasta celulósica, sendo um subproduto da indústria de papel e celulose, onde a lixívia negra ou licor negro é usado como combustível em usinas de cogeração da própria indústria de celulose (ANEEL, 2008), além disso, empresas como, Aracruz, Cenibra, Klabin, Veracel e outras fazem uso em usinas de biomassa que utilizam o licor negro no Brasil. Portanto, considerou-se neste trabalho o licor negro como sendo o processo da madeira devido a inexistência de inventários específicos para a geração de energia provenientes do licor negro.

Deste modo, na obtenção dos dados para a inserção no programa, houve a necessidade de realizar uma adaptação entre Tabela 1, Gráfico 5, Tabela 2 e base de dados da Ecoinvent v.3.3 (ECOINVENT, 2017), de modo que, a relação dessas fontes brasileiras, pudesse estruturar em uma única tabela, de onde foram extraídos os dados para a inserção no *software*, como mostra a Tabela 3.

Foi realizado a união da hidráulica e PCH, pois ambas representam a geração de energia elétrica por fonte hídrica (água). PCH representa pequena participação na geração de energia elétrica, quando comparado com a geração da hidráulica (médias e grandes usinas).

Quanto a importação de energia elétrica para o Brasil, foram considerados as quatro principais nacionalidades na importação, como, Paraguai (PY - 69,16%), Argentina (AR - 27,54%), Venezuela (VE - 2,45%) e Uruguai (UY - 0,86%), segundo a Tabela 3. A quantidade relativa representa o quanto cada país importa de eletricidade para o Brasil. Nota-se que, o principal contribuinte é o Paraguai, devido a geração de energia através da usina hidrelétrica de Itaipu.

A biomassa também foi separada, de acordo com as três principais subfontes na geração de energia elétrica, isto é, cana de açúcar (78,82%), licor negro (19,28%)

e outros (1,89%). A quantidade relativa das subfontes da biomassa representa o quanto cada subfonte produz de eletricidade no país. Observa-se que, o principal contribuinte da biomassa é a cana de açúcar.

Óleo diesel e gás de processo representam pequena quantidade na produção de eletricidade no Brasil, mesmo assim, foram consideradas para compor a matriz energética. O gás de processo é utilizado em várias indústrias que realizam a queima de seus resíduos/rejeitos dentro da própria empresa, onde são gerados gases que são transformados em energia elétrica para o próprio consumo da indústria.

Para a construção das subfontes, segundo a Tabela 3, tais como a importação (Paraguai, Argentina, Uruguai e Venezuela), e Biomassa (cana de açúcar, licor negro e outros) foi realizado uma interpolação linear para determinar os dados que estão entre os anos de 2015 e 2023. Para as outras fontes energéticas, utilizou-se dos dados secundários do EPE, MME e ANEEL.

A Tabela 3 apresenta a capacidade instalada (em MW) e a Tabela 4 mostra a capacidade instalada (em %) da geração de energia elétrica no país entre os anos de 2014 e 2024.

**Tabela 3 - Evolução da capacidade instalada (em MW) de geração de energia elétrica no Brasil entre 2014 e 2024**

Fonte	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Hidrelétrica + PCH	87789	91840	97752	102487	107554	108540	108915	110649	112537	115035	117972
Importação PY (69,16%)	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2	4841,2
Importação AR (27,54%)	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8	1927,8
Importação VE (2,45%)	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5
Importação UY (0,86%)	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2
Eólica	5000	6900	8800	10700	12600	14500	16400	18300	20200	22100	24000
Solar	480	1132	1784	2436	3088	3740	4392	5044	5696	6348	7000
Cana de Açúcar (78,82%)	8670	9222	9774	10325	10877	11429	11981	12532	13084	13636	14188
Licor Negro (19,28%)	2121	2256	2391	2526	2661	2796	2931	3066	3200	3335	3470
Outros (1,89%)	208	221	234	248	261	274	287	301	314	327	340
<b>Renováveis</b>	<b>111269</b>	<b>118572</b>	<b>127736</b>	<b>135723</b>	<b>144042</b>	<b>148280</b>	<b>151907</b>	<b>156893</b>	<b>162033</b>	<b>167783</b>	<b>173972</b>
Nuclear	1990	1990	1990	1990	1990	3395	3395	3395	3395	3395	3395
Gás Natural	11043	11317	11486	12026	12427	14903	16419	17619	18819	20019	21219
Carvão	3064	3064	3064	3064	3064	3404	3404	3404	3404	3404	3404
Petróleo	3586	3586	3586	3201	3201	3201	3201	3201	3201	3201	3201
Óleo Diesel	1239	1269	1269	1124	1124	1124	1124	1124	1124	1124	1124
Gás de Processo	687	687	687	687	687	687	687	687	687	687	687
<b>Não Renováveis</b>	<b>21609</b>	<b>21913</b>	<b>22082</b>	<b>22092</b>	<b>22493</b>	<b>26714</b>	<b>28230</b>	<b>29430</b>	<b>30630</b>	<b>31830</b>	<b>33030</b>
<b>Total</b>	<b>132878</b>	<b>140485</b>	<b>149818</b>	<b>157815</b>	<b>166535</b>	<b>174994</b>	<b>180137</b>	<b>186323</b>	<b>192663</b>	<b>199613</b>	<b>207002</b>

Fonte: Adaptado de EPE (2015), MME (2016), ANEEL (2017)

**Tabela 4 - Evolução da capacidade instalada (em %) de geração de energia elétrica no Brasil entre 2014 e 2024**

Fonte	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Hidrelétrica + PCH	66,07%	65,37%	65,25%	64,94%	64,58%	62,02%	60,46%	59,39%	58,41%	57,63%	56,99%
Importação PY (69,16%)	3,64%	3,45%	3,23%	3,07%	2,91%	2,77%	2,69%	2,60%	2,51%	2,43%	2,34%
Importação AR (27,54%)	1,45%	1,37%	1,29%	1,22%	1,16%	1,10%	1,07%	1,03%	1,00%	0,97%	0,93%
Importação VE (2,45%)	0,13%	0,12%	0,11%	0,11%	0,10%	0,10%	0,10%	0,09%	0,09%	0,09%	0,08%
Importação UY (0,86%)	0,05%	0,04%	0,04%	0,04%	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%
Eólica	3,76%	4,91%	5,87%	6,78%	7,57%	8,29%	9,10%	9,82%	10,48%	11,07%	11,59%
Solar	0,36%	0,81%	1,19%	1,54%	1,85%	2,14%	2,44%	2,71%	2,96%	3,18%	3,38%
Cana de Açúcar (78,82%)	6,52%	6,56%	6,52%	6,54%	6,53%	6,53%	6,65%	6,73%	6,79%	6,83%	6,85%
Licor Negro (19,28%)	1,60%	1,61%	1,60%	1,60%	1,60%	1,60%	1,63%	1,65%	1,66%	1,67%	1,68%
Outros (1,89%)	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%
<b>Renováveis</b>	<b>83,74%</b>	<b>84,40%</b>	<b>85,26%</b>	<b>86,00%</b>	<b>86,49%</b>	<b>84,73%</b>	<b>84,33%</b>	<b>84,20%</b>	<b>84,10%</b>	<b>84,05%</b>	<b>84,04%</b>
Nuclear	1,50%	1,42%	1,33%	1,26%	1,19%	1,94%	1,88%	1,82%	1,76%	1,70%	1,64%
Gás Natural	8,31%	8,06%	7,67%	7,62%	7,46%	8,52%	9,11%	9,46%	9,77%	10,03%	10,25%
Carvão	2,31%	2,18%	2,05%	1,94%	1,84%	1,95%	1,89%	1,83%	1,77%	1,71%	1,64%
Petróleo	2,70%	2,55%	2,39%	2,03%	1,92%	1,83%	1,78%	1,72%	1,66%	1,60%	1,55%
Óleo Diesel	0,93%	0,90%	0,85%	0,71%	0,67%	0,64%	0,62%	0,60%	0,58%	0,56%	0,54%
Gás de Processo	0,52%	0,49%	0,46%	0,44%	0,41%	0,39%	0,38%	0,37%	0,36%	0,34%	0,33%
<b>Não Renováveis</b>	<b>16,26%</b>	<b>15,60%</b>	<b>14,74%</b>	<b>14,00%</b>	<b>13,51%</b>	<b>15,27%</b>	<b>15,67%</b>	<b>15,80%</b>	<b>15,90%</b>	<b>15,95%</b>	<b>15,96%</b>
<b>Total</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: Adaptado de EPE (2015), MME (2016), ANEEL (2017)

As fontes energéticas e suas quantidades (em MW), segundo a Tabela 3, foram inseridas no Umberto NXT Universal para realizar os cálculos e apresentar os resultados do desempenho ambiental do sistema de geração de energia elétrica no Brasil entre 2014 e 2024, apresentando resultados em termos de aquecimento global. Os resultados finais foram interpretados para compreender as influências dos impactos ambientais de acordo com a composição da matriz elétrica nacional.

### 3.2.4 Realização da ACV Referente aos Cenários da Matriz de Geração de Energia Elétrica no País

Por fim, foi realizada a ACV comparando os cenários pré-definidos (Tabela 3) para a matriz de geração de energia elétrica brasileira utilizando o *software* UMBERTO NXT Universal, a base de dados Ecoinvent v.3.3 e as normas ISO 14040 e 14044.

Em todas as categorias do estudo foi utilizada a base de dados da Ecoinvent, versão 3.3, juntamente com o conjunto de dados [BR], ou seja, a base de dados busca informações no Brasil, onde outros estudos semelhantes já foram desenvolvidos anteriormente. Encontra-se no apêndice A, a descrição dos processos (fontes) segundo dados da (ECOINVENT, 2017).

Na base de dados da Ecoinvent existe uma série de dados e informações referentes a termos ambientais, como agricultura, manufatura, energia elétrica, construção, meios de transporte, comunicação, atividades técnicas, reciclagem, dentre outras. E cada uma dessas atividades, pode gerar fluxos de materiais de entradas e saídas, além da quantificação de GEE emitidos para o meio atmosférico, por meio da aplicação de métodos de caracterização de impactos. O *software*, aliado à base de dados de inventários de ciclo de vida, permite utilizar vários métodos AICV, como IPCC 2013, CML, CED, ReCipe, dentre outras.

De acordo com a ACV Brasil (2016), o Umberto NXT Universal é um programa versátil, que pode ser utilizado para Análise de Fluxo de Materiais e de Energia (AFM), contabilidade de custos, planejamento e otimização de sistemas de processos, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Complementa o IFU HAMBURG (2017), o *software* é um programa utilizado em estudos ambientais, como análise de eco-eficiência e ACV de acordo com a ISO 14040 e 14044. Além disso, o programa apresenta um grande auxílio à tomada de decisões, que são voltadas a ganhos de eficiência econômico-ambientais.

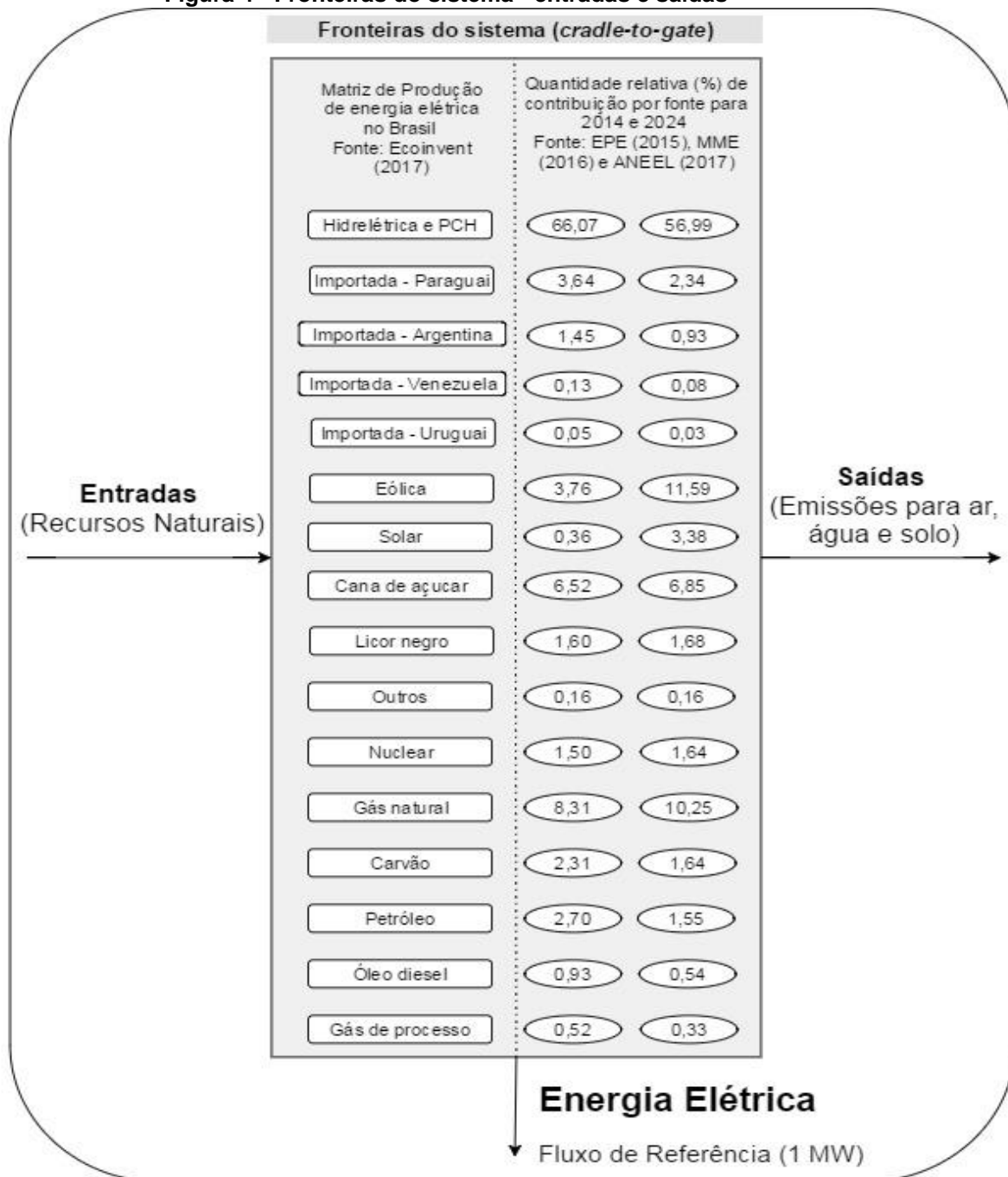
Optou-se pelo uso do método de avaliação de impacto IPCC 2013 (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) no trabalho, visto que, o modelo gera resultados para a categoria de avaliação de potencial de aquecimento global GWP 100a (100 anos). A unidade de medida segundo os dados do IPCC foram geradas em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (Kg CO<sub>2</sub> eq.). Essa organização realiza pesquisas e estudos sobre aspectos ambientais, dentre outros destaca-se, projeções de mudanças climáticas no planeta, informações sobre emissões ou concentrações futuras de GEE (IPCC, 2013). Autores internacionais também fizeram uso do IPCC em seus trabalhos, tais como, Garcia, Marques, Freire (2014); Asdrubali et al (2015); Wolfram, Wiedmann, Diesendorf (2016).

Como fluxo de referência foi utilizado 1 MW (Megawatt) de energia elétrica gerada no Brasil. Além dessa unidade, foi realizada outra análise abordando o total da quantidade (em MW) na geração de energia elétrica no Brasil para cada ano analisado.

A Figura 4 apresenta as fronteiras do sistema de geração de eletricidade no território brasileiro juntamente com sua quantidade relativa de capacidade instalada para os anos de 2014 e 2024. As entradas do sistema representam os recursos

naturais para a produção de energia elétrica e as saídas, dependendo da fonte, emissões para o ar, água e solo, baseado na Ecoinvent v.3.3.

**Figura 4 - Fronteiras do sistema - entradas e saídas**



Fonte: Autoria própria (2017)

### 3.2.4.1 Premissas adotadas

Foram adotadas algumas premissas no trabalho para a adaptação dos dados da Ecoinvent em relação a ACV:

- Todas as fontes são consideradas de alta voltagem (*high voltage*), apenas a fonte solar que foi adaptada para baixa voltagem (*low voltage*), pois era a única opção da base de dados;
- A energia solar apresenta sistema de placas fotovoltaicas com 570 kWp (quilo watt potência) com instalação a céu aberto (*open ground installation*), considera o multi silício (*multi-Si*) como fonte produtora e foi a única fonte adaptada para uso de dados fora do território nacional, conhecida como resto do mundo (*ROW - rest of world*);
- A hidrelétrica foi considerada junto com PCH - (*electricity production, hydro, reservoir, tropical region*);
- Foram considerados os quatro principais países que importam energia elétrica para o Brasil, tais como, Paraguai (PY), Uruguai (UY), Argentina (AR), Venezuela (VE) - (*electricity, high voltage, import*);
- Para a fonte eólica - (*electricity production, wind, 1 - 3 MW turbine onshore*) foi considerado turbinas de 1 a 3 MW com produção *onshore*, visto que, é a mais utilizada no país;
- O processo 9 (*heat and power co-generation, wood chips*) considera-se o licor negro (madeira), cuja fonte é derivada da biomassa;
- Foi criado no *software* o processo 10 nomeado de “outros”, cujo é derivado da biomassa e representa 0,16% da quantidade de produção de energia elétrica através de outras fontes secundárias provenientes da biomassa, como casca de arroz, lenha, resíduos florestais e outros. Tais dados não possuem impactos atribuídos a eles por não existir fator de caracterização específica a esse conjunto de dados criados;
- Segundo a ISO 14040 (ABNT, 2009a), o item 3.18 da norma aborda os critérios de corte por balanço de energia. Diante dessa premissa foi realizado o corte na subfonte chamada de “outros”, pois sua representação é menor que 0,5% do balanço de energia total.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DOS ARTIGOS REFERENTES À ACV

Foram demonstrados os resultados alcançados com a elaboração do referencial teórico sistematizado a partir dos artigos pesquisados que realizaram estudos de ACV na área de matrizes de energia elétrica, cujos artigos estão identificados no Quadro 1 seguindo o título, autor e ano. Outras informações desses trabalhos estão descritas para o acompanhamento no Quadro 2.

**Quadro 1 - Identificação, título e referência dos artigos pesquisados**

<b>Id</b>	<b>Título do Artigo</b>	<b>Autor e Ano</b>
1	Life cycle inventories of electricity generation and power supply in version 3 of the ecoinvent database - part I: electricity generation	Treyer e Bauer (2016)
2	A cradle to gate life cycle assessment of Turkish lignite used for electricity generation with site-specific data	Sengül et al (2016)
3	Renewable electricity in Turkey: Life cycle environmental impacts	Atilgan e Azapagic (2016)
4	A comprehensive assessment of the energy performance of the full range of electricity generation technologies deployed in the United Kingdom	Raugei e Leccisi (2016)
5	Environmental impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe	Berrill et al (2016)
6	Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Turkey on a life cycle basis	Atilgan e Azapagic (2016)
7	Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes?	Vázquez-Rowe et al (2015)
8	Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070	Stamford e Azapagic (2014)
9	Life-cycle assessment of electricity in Portugal	Garcia; Marques; Freire (2014)
10	A multi-period mixed-integer linear optimization of future electricity supply considering life cycle costs and environmental impacts	Barteczko-Hibbert et al (2014)



11	Environmental impacts of future low-carbon electricity systems: Detailed life cycle assessment of a Danish case study	Turconi et al (2014)
12	Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix	Rentizelas e Georgakellos (2014)
13	Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations	Turconi; Boldrin; Astrup (2013)
14	Modeling future life-cycle greenhouse gas emissions and environmental impacts of electricity supplies in Brazil	Dale et al (2013)
15	Life cycle modeling of energy matrix scenarios, Belgian power and partial heat mixes as case study	Rodríguez et al (2013)
16	Hydrogen mobility from wind energy - A life cycle assessment focusing on the fuel supply	Burkhardt et al (2016)
17	Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: The case of Poland	Dzikuć e Piwowar (2016)
18	Life cycle assessment of energy generation in Poland	Lelek et al (2016)
19	Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization	Asdrubali et al (2015)
20	Considering supply and demand of electric energy in life cycle assessments - A review of current methodologies	Rehberger e Hiete (2015)
21	Human health impacts in the life cycle of future European electricity generation	Treyer; Bauer; Simons (2014)
22	Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generation in the province of Ontario, Canada	Mallia e Lewis (2013)
23	Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet	Choma e Ugaya (2015)
24	Carbon footprint scenarios for renewable electricity in Australia	Wolfram; Wiedmann; Diesendorf (2016)
25	Environmental and economic analysis of residual woody biomass transport for energetic use in Chile	Muñoz; Vargas; Navia (2015)
26	Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius	Brizmohun et al (2015)

**Fonte: Autoria própria (2016)**

Destaca-se que entre os principais artigos buscados na temática abordada, no Brasil não há incidência de desenvolvimentos de ACV para estudos da composição da matriz elétrica, considerando os métodos, data e suposições

utilizados neste trabalho. Já em países Europeus, a ACV está presente há mais tempo, existindo mais pesquisas de impacto, pesquisadores e trabalhos nessa área.

No Quadro 2, foram subdivididas algumas informações relevantes sobre cada artigo abordado.

**Quadro 2 - Informações sobre os artigos pesquisados**

<b>Id</b>	<b>País</b>	<b>Universidade</b>	<b>Métodos / categorias AICV</b>	<b>Journal / ano</b>	<b>FI (JCR)</b>	<b>Citações<sup>1</sup></b>	<b>M. Ordinao</b>
1	Suíça	Instituto Paul Scherre	Realizado uma análise de Inventário	International Journal of LCA/2013	3.324	24	66
2	Turquia	Hacettepe University	CML, TRACI, ReCiPe	Cleaner Production/ 2016	4.959	0	56
3	Reino Unido	The University of Manchester	CML 2001	Renewable Energy/2016	3.404	4	74
4	Reino Unido	Oxford Brookes University	CED	Energy Policy/ 2016	3.045	3	66
5	Noruega	Norwegian University of Science and Technology	ReMix	Environmental Research Letters/2016	4.134	3	57
6	Reino Unido	The University of Manchester	CML 2001	Energies/ 2016	2.077	2	74
7	Peru	Pontificia Universidad Católica del Perú	ReCiPe	Applied Energy/2015	5.746	4	64
8	Reino Unido	The University of Manchester	CML	Energy for Sustainable Development/2014	2.379	21	81
9	Portugal	University of Coimbra	CED, IPCC, CML	Applied Energy/2014	5.746	19	89
10	Reino Unido	The University of Manchester	CML	Applied Energy/2014	5.746	11	71

<sup>1</sup> Citações dos artigos pesquisadas até Outubro de 2016

11	Dinamarca	Technical University of Denmark	EASETECH	Applied Energy/2014	5.746	15	95
12	Reino Unido	University of Strathclyde	Impact Pathway (Avaliação de custo)	Energy Policy/2014	3.045	16	56
13	Dinamarca	Technical University of Denmark	IOA, PCA	Renewable and Sustainable Energy Reviews/ 2013	6.798	96	159
14	Brasil	Universidade Federal do Rio de Janeiro	IMPACT 2002+	Energies/ 2013	2.077	7	67
15	Bélgica	Universidad Central Marta Abreu de Las Villas	Ecoindicator 99	Applied Energy/2013	5.746	8	71
16	Alemanha	Karlsruhe Institute of Technology	CED	Applied Energy/2016	5.746	0	50
17	Polônia	University of Zielona Góra	Ecoindicator 99	Renewable and Sustainable Energy Reviews/ 2016	6.798	6	51
18	Polônia	Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences	IMPACT 2002+	International Journal of LCA/2016	3.324	1	82
19	Itália	Università degli Studi di Perugia	IPCC, CED, Ecoindicator 99	Renewable and Sustainable Energy Reviews/ 2015	6.798	45	99
20	Alemanha	University of Kassel	Realizado uma revisão da literatura	Materiaux et Techniques/ 2015	0	1	41
21	Suíça	Paul Scherrer Institute	ReCipe, IMPACT 2002+	Energy Policy/2014	3.045	16	79
22	Canadá	University of Waterloo	Realizado uma análise de Inventário	International Journal of LCA/2013	3.324	26	71

23	Brasil	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	CML 2000	Cleaner Production/ 2015	4.959	4	52
24	Alemanha	Berlin Institute of Technology	IPCC's 2007	Cleaner Production/ 2016	4.959	2	56
25	Chile	Universidad de La Frontera	ReCipe	International Journal of LCA/2015	3.324	4	54
26	Maurícia	University of Mauritius	CML	Cleaner Production/ 2015	4.959	7	70

Fonte: Autoria própria (2016)

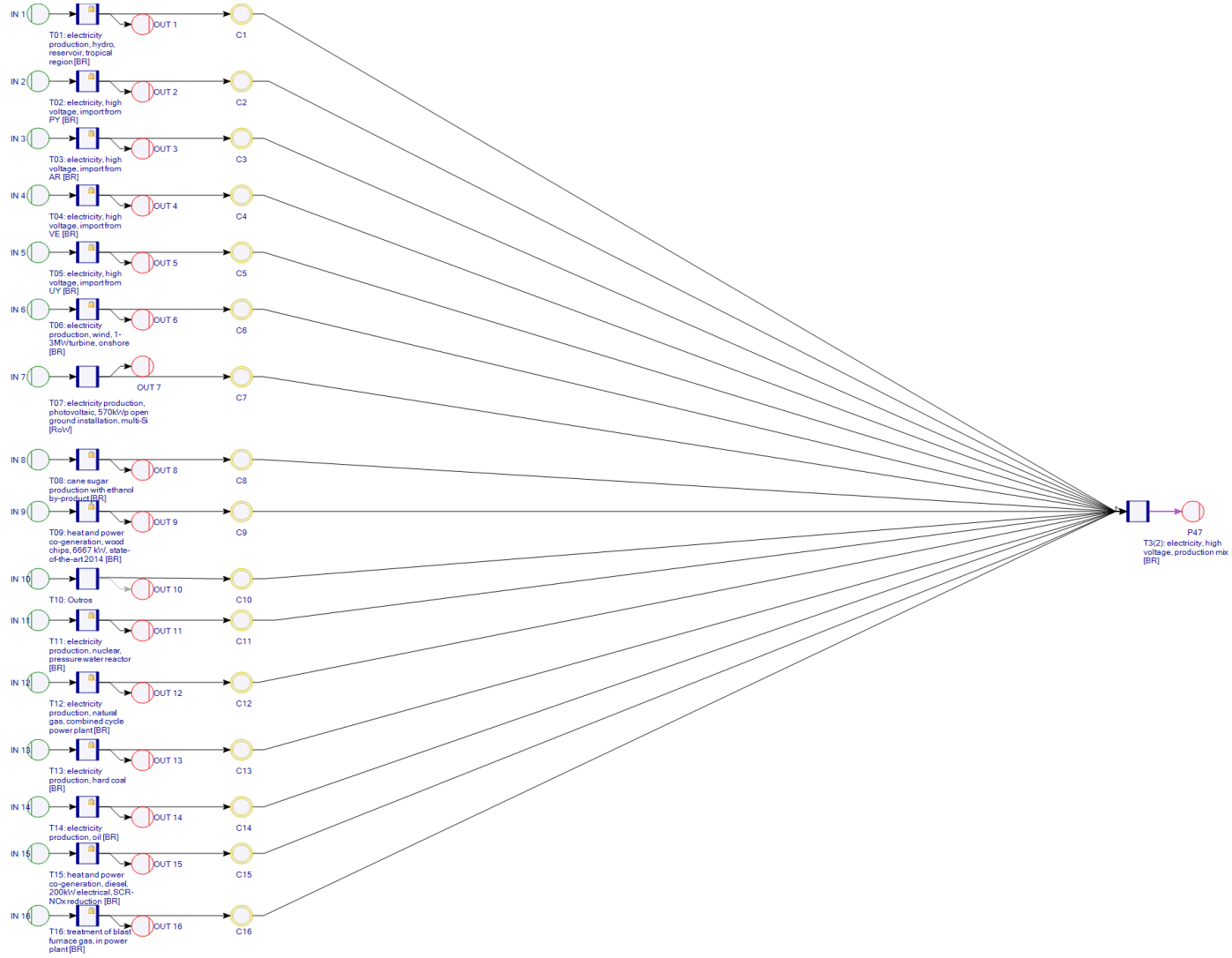
No Quadro 2, os trabalhos apresentaram alguns métodos principais e mais utilizados nessa abordagem mundialmente, dentre os quais, pode-se citar IPCC, ReCipe, CML, Impact 2002+, CED e outros. Deste modo, observa-se que a grande maioria dos trabalhos são internacionais, com foco principal nos países europeus.

#### 4.2 ANÁLISE DE CENÁRIOS APLICADO AO UMBERTO NXT UNIVERSAL

Conforme a Seção 3.2.3, foi construída a Tabela 3 compondo a quantidade total (MW) de cada fonte representando a matriz energética brasileira, usada como base de dados para inserção no Umberto NXT Universal. A Figura 5 apresenta o diagrama aplicado no *software* de todas as fontes utilizadas no presente estudo.

Foram analisadas 16 tipos de fontes de geração de energia elétrica no país, conforme dados da Tabela 3. Todos os processos apresentam suas respectivas entradas e saídas. As entradas correspondem a recursos naturais para a produção de energia elétrica, e as saídas representam as emissões para água, ar, solo. Nota-se que as 16 fontes energéticas estão ligadas no processo final, onde resulta o mix de produção de energia elétrica no Brasil.

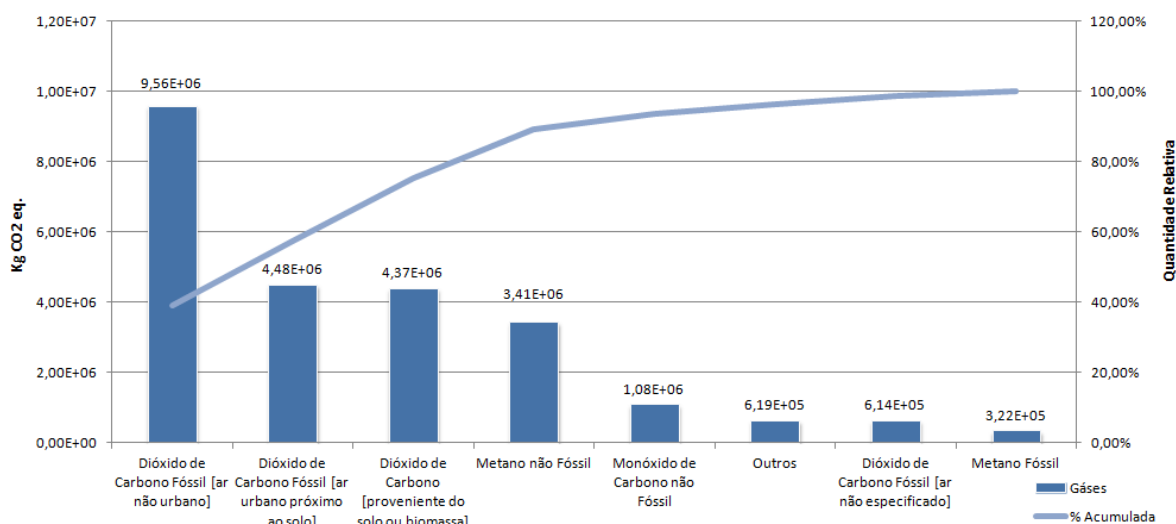
Figura 5 - Diagrama das fontes de energia elétrica no Brasil aplicadas no Umberto NXT Universal



Fonte: Autoria própria (2017)

O Gráfico 8, demonstra as principais substâncias (em Kg CO<sub>2</sub> eq.) emitidas de acordo com a matriz energética brasileira, segundo o IPCC 2013 para o ano de 2014, além da respectiva quantidade relativa (em %) para as substâncias.

**Gráfico 6 - Impacto relativo pelas principais substâncias pelo IPCC 2013 (GWP 100a)**



Fonte: Autoria própria (2017)

O IPCC aborda a temática referente ao clima do planeta, ou seja, possível indicativo de mudança climática e GWP para 100 anos levando em conta as emissões (Kg CO<sub>2</sub> eq.) de gases causadores do efeito estufa. O Gráfico 8 foi construído em formato de Pareto, desta forma, consegue-se analisar a quantidade de gases emitidos para a natureza (eixo a esquerda) e sua respectiva quantidade relativa acumulada (eixo a direita) para o ano de 2014.

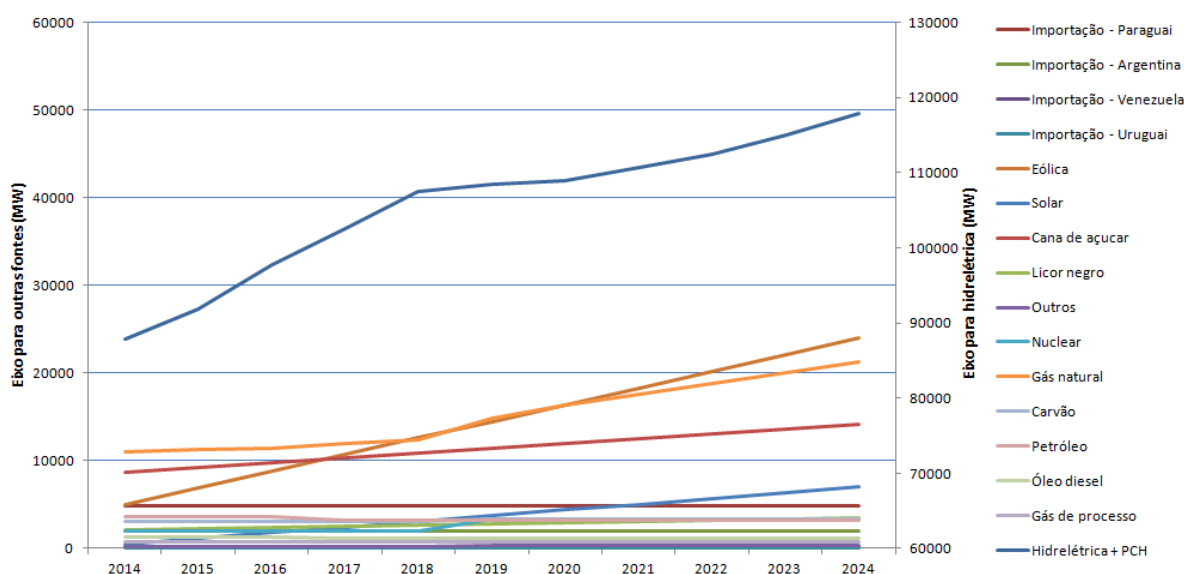
De acordo com o Gráfico 8 principal substância emitida para o meio ambiente foi o dióxido de carbono fóssil, onde [ar não urbano] representa próximo de 39,08%, [ar próximo ao solo] reflete 18,32% de emissões e dióxido de carbono [proveniente do solo ou biomassa] corresponde a 17,88%. Portanto, nota-se que a principal emissão é o CO<sub>2</sub>. As três ramificações desse gás representa próximo de 75,28% de emissões de todo o cenário energético brasileiro no ano de 2014.

Um estudo feito no Reino Unido, Raugeri e Leccisi (2016), mostrou que: carvão (37,0%), gás natural (26,7%) e nuclear (19,1%) são as principais fontes de geração de energia elétrica no país. Comparando com dados do presente trabalho e segundo o Gráfico 9, a geração brasileira para o mesmo ano, apresenta: carvão (4,5%), gás natural (12,9%) e nuclear (2,4%), ou seja, todas as fontes brasileiras

ficaram bem abaixo da inglesa, visto que, no Brasil a fonte predominante é a hidráulica.

O Gráfico 9 aborda o acréscimo da geração de eletricidade no país no período entre 2014 e 2024. O eixo a direita corresponde a identificação da hidrelétrica e PCH, e o eixo a esquerda é indicado para as outras fontes energéticas.

**Gráfico 7 - Aumento da geração de energia elétrica no país de 2014 a 2024**



**Fonte: Adaptado de EPE (2015), MME (2016), ANEEL (2017), autoria própria (2017)**

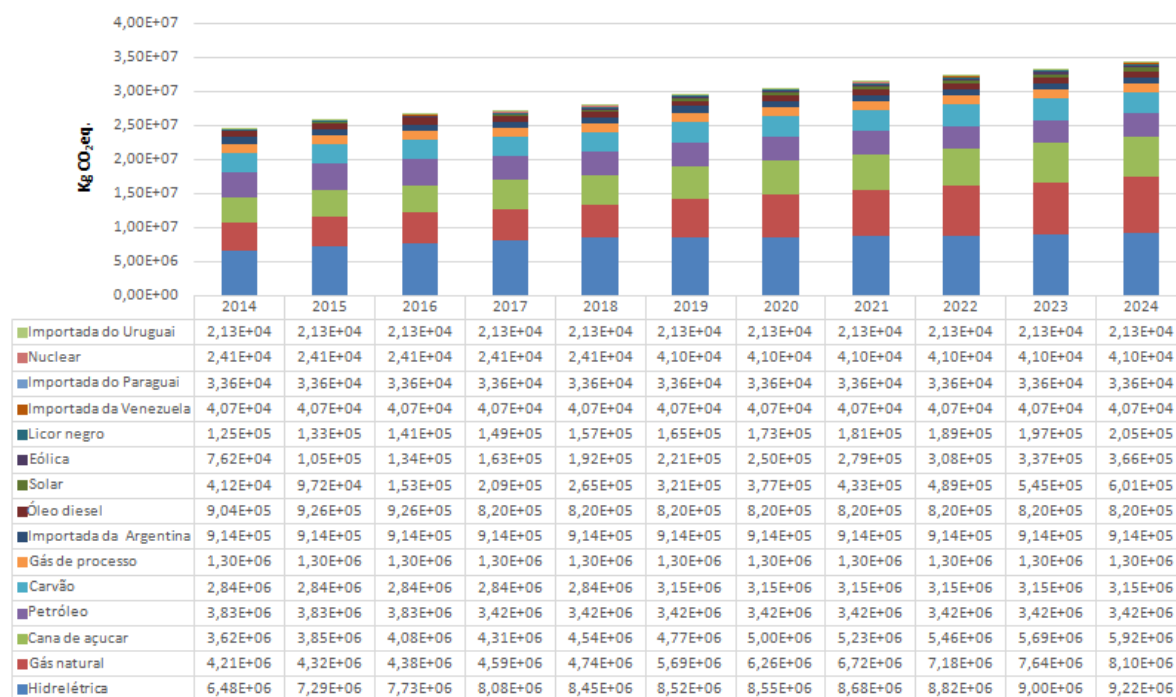
O crescimento da geração de eletricidade no Brasil é observado de acordo com o Gráfico 9, onde apresenta o aumento relativo a quantidade (em MW) ao longo do período analisado. A fonte hídrica continuará recebendo incentivo para sua expansão na capacidade de geração de energia elétrica no país, visto que, por se tratar de uma fonte limpa e renovável, os investimentos são mais representativos, comparado às fontes não renováveis.

Tratando de dados quantitativos, hidrelétricas e PCH juntas representaram em 2014, 87.789 MW de geração de energia elétrica, podendo atingir a produção de 117.972 MW em 2024. Analogamente, sua participação relativa em 2014 era de 66,07% e poderá atingir, 56,99% da geração de energia elétrica em 2024. A fonte eólica irá mais que dobrar sua capacidade de produção, impulsionado pelos grandes investimentos que ocorrerão na instalação e ativação de turbinas geradoras até 2024.

Fontes limpas sofrerão expansão no país, exemplo disso é a geração de energia elétrica pelas turbinas eólicas que no início da análise correspondia a 3,76% de geração em todo território nacional e em 2024 poderá representar 11,59%. Outro exemplo é a solar, cuja fonte está em constante avanço tecnológico e econômico. Durante o período da análise, seu crescimento será de 0,36% para 3,38% em 2024.

O Gráfico 10 apresenta os resultados do trabalho após serem aplicados no *software*, mostrando todas as fontes de geração de energia elétrica no Brasil com seu respectivo potencial de aquecimento global entre os anos de 2014 a 2024, utilizando o método de AICV IPCC 2013.

**Gráfico 8 - Potencial de impacto absoluto (Kg CO<sub>2</sub> eq.) na geração de energia elétrica no Brasil para os anos de 2014 a 2024 segundo IPCC 2013**



Fonte: Autoria própria (2017)

O Gráfico 10 apresenta o crescimento do impacto total de acordo com a quantidade produzida na geração de energia elétrica. Entre 2014 e 2024 o aumento do impacto ambiental total será próximo de 39,64%. Dentre as principais fontes impactantes, destaca-se hídrica, gás natural, cana de açúcar, petróleo, carvão.

Hidrelétricas representam os maiores impactos ambientais, pois é a maior e principal fonte energética do país, contando com centenas de usinas instaladas, além disso, o alto impacto corresponde a consideração de todo o ciclo de vida,

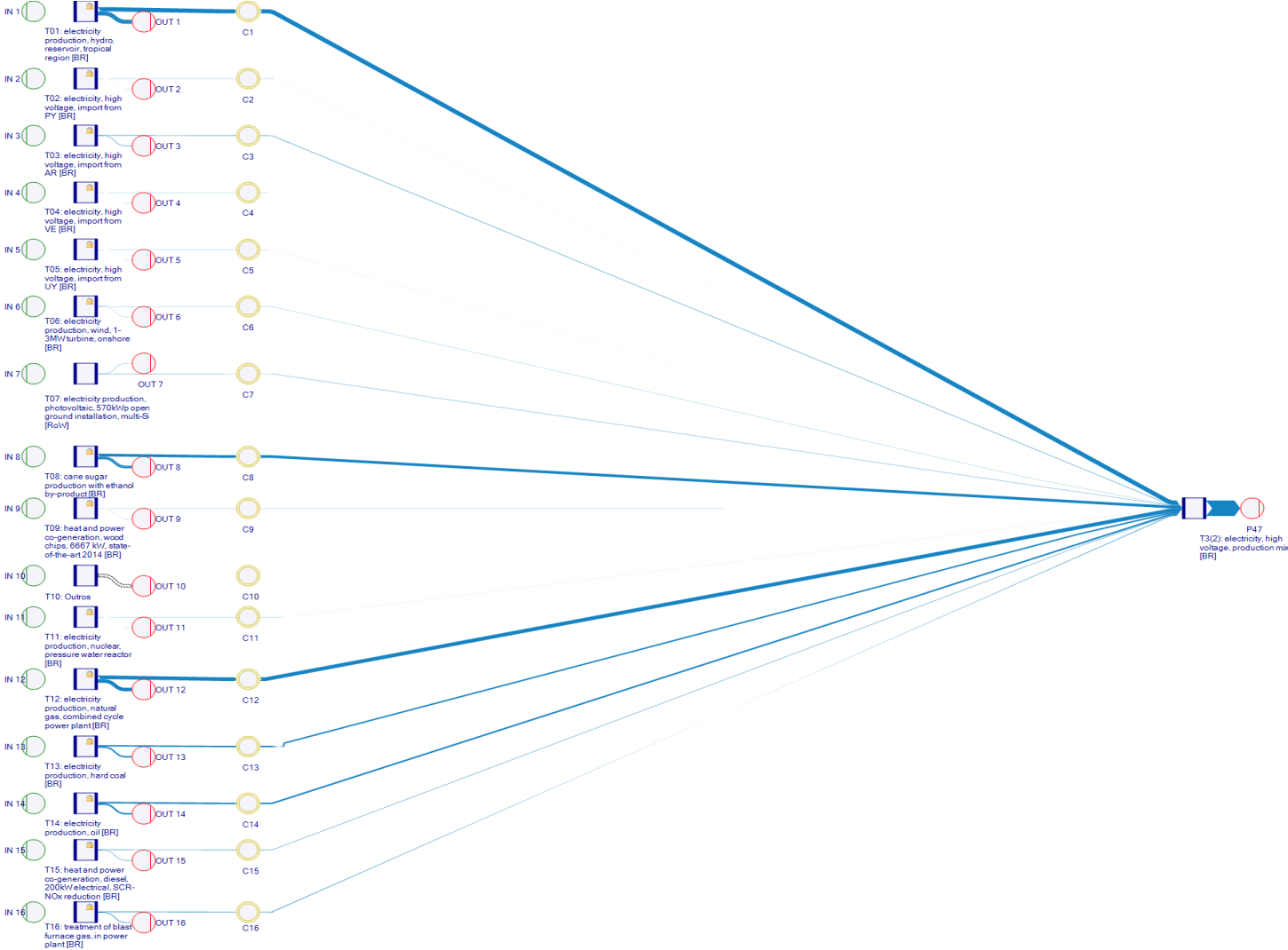


segundo a base de dados daecoinvent. A fonte nuclear poderá representar baixa produção de energia elétrica no país (3.395 MW) em 2024, entretanto, no Gráfico 10, a fonte apresenta expressivo impacto ambiental, justificado por ser uma fonte não renovável. Da mesma forma se comportam o petróleo e carvão, onde representam pequeno aporte para geração de energia no país e alto índice de contribuição para o impacto ambiental.

A Figura 6 apresenta o diagrama *sankey* na análise do IPCC 2013 para o ano de 2024. Nesse caso, o diagrama *sankey* foi utilizado para demonstrar de forma visual as principais fontes energéticas brasileira que geram os maiores impactos ambientais. Com o destaque par as fontes: hidráulica (mesmo sendo uma fonte renovável, seu alto impacto ocorre devido a consideração de todo o ciclo de vida); cana de açúcar (dá mesma forma que a hidráulica, é uma fonte renovável, e considera-se todo o ciclo de vida); gás natural, carvão e petróleo (mesmo apresentando pequena contribuição na geração nacional, as fontes são não renováveis, e desta forma, apresentaram impacto relacionado ao GWP).

De acordo com a Figura 6, os fluxos mais representativos foram as fontes - hidrelétrica, derivados da biomassa (cana de açúcar) e gás natural, de modo que um estudo elaborado em Portugal (GARCIA; MARQUES; FREIRE, 2014), realizam uma análise dos efeitos das mudanças recentes difundidas no sistema elétrico por meio dos impactos ambientais, a fim de compreender a demanda futura de eletricidade. Assim como no presente trabalho, os resultados do estudo português indicam a redução dos impactos ambientais no país de acordo com as fontes energéticas utilizando a categoria IPCC.

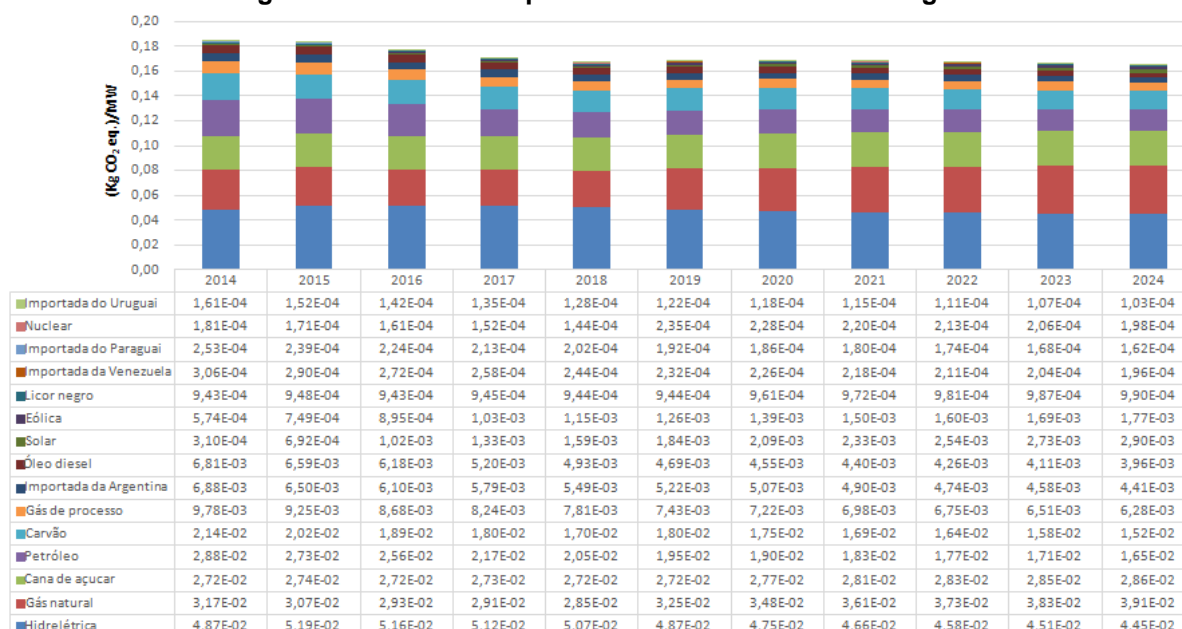
Figura 6 - Diagrama Sankey - IPCC 2013 (GWP 100a) para o ano de 2024



Fonte: Autoria própria (2017)

O Gráfico 11 é apresentado o potencial de aquecimento global de acordo com o IPCC 2013 para 1 MW de energia elétrica.

**Gráfico 9 - Potencial de impacto relativo (Kg CO<sub>2</sub> eq./MW) na geração de energia elétrica no Brasil para os anos de 2014 a 2024 segundo IPCC 2013**

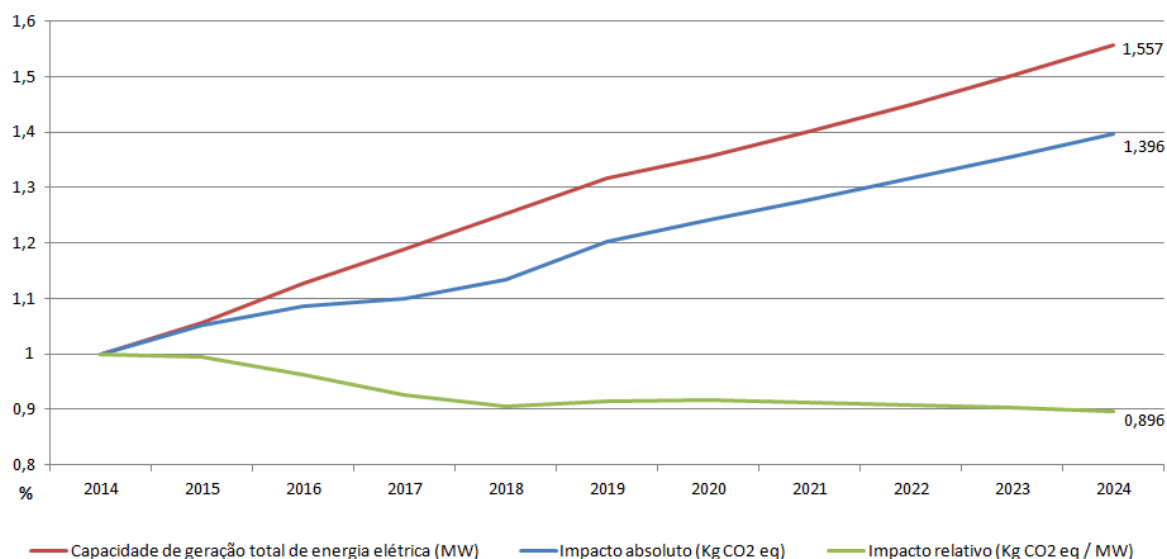


Fonte: Autoria própria (2017)

Todas as fontes estão dispostas na comparação para 1 MW, desta forma, pode-se comparar quais fontes realmente proporcionam os maiores impactos ambientais, de acordo com o Gráfico 11. Entre os anos de 2016 e 2017 todas as fontes sofrem uma leve queda no impacto, além da tendência de manter ou diminuir o impacto ambiental causado pela geração de eletricidade para os próximos anos. De acordo com o período de análise, a redução do impacto ambiental relativo ficará próximo de 10,40% ao final de 2024.

Por fim, o Gráfico 12 expõe de forma resumida a capacidade relativa dos três principais resultados do presente trabalho de acordo com a matriz energética nacional, como o acréscimo da capacidade de geração de energia elétrica, o aumento do impacto total na geração e a redução do impacto relativo quando comparado por MW.

**Gráfico 10 - Quantidade relativa da capacidade de geração, impacto total e impacto para 1 MW**



**Fonte: Autoria própria (2017)**

Portanto, o comportamento do potencial de impacto ambiental do sistema de geração de energia elétrica no Brasil, de acordo com a análise passada e futura, sofrerá aumento na capacidade de geração de energia elétrica em 55,70% até 2024. Conseqüentemente o impacto absoluto ou impacto total para todas as fontes brasileira também sofrerá acréscimo em 39,60%. Já o impacto relativo, ou seja, por unidade de MW apresentará uma redução de 10,40% até 2024 na matriz energética do país.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados da revisão da literatura obtidos permitem concluir que já estão sendo desenvolvidos estudos científicos internacionais de alto impacto, cujos países analisaram suas composições energéticas ou realizaram análises do setor utilizando ACV para gerar conhecimento sobre o sistema e apoiar decisões futuras e políticas públicas.

Os principais trabalhos elaborados nessa área referem-se a países europeus, cujos autores, utilizando os métodos de AICV apontam que no futuro as principais fontes de energia elétrica serão as fontes renováveis, pois se trata de geração limpa, contando com menores emissões de GEE e a redução do GWP de cada país. Segundo Berrill et al (2016), o aumento de fontes renováveis como a eólica e a solar irão criar aspectos positivos além das reduções das emissões de GEE.

Deste modo, o trabalho permite concluir que haverá crescimento na geração de energia elétrica no Brasil de 55,70% até 2024 e os investimentos serão direcionados as fontes renováveis, principalmente a eólica. Com relação ao impacto absoluto, haverá um acréscimo de 39,60% em toda a matriz de geração de eletricidade no país até 2024, e uma redução de 10,40% no impacto relativo por fonte energética.

Em relação as principais substâncias emitidas ao meio ambiente para a geração de energia elétrica no Brasil no ano de 2014, destacou-se as três ramificações do dióxido de carbono ([ar não urbano], [ar próximo ao solo] e [proveniente do solo ou biomassa]), onde representou próximo de 75,28% de emissões de todo o cenário energético brasileiro.

Analisando todo o cenário energético nacional, juntamente com o período de análise (2014 a 2024), conclui-se que as cinco principais fontes energéticas causadoras de impactos ao meio ambiente, foram hidrelétrica, gás natural, cana de açúcar, petróleo e carvão.

Com isso, os resultados do presente estudo podem caminhar seguindo os ODS na transformação de um planeta melhor, contribuindo para a redução das alterações climáticas e emissões de GEE a longo prazo. Portanto, o trabalho, pode ser compreendido a partir das influências dos impactos ambientais de acordo com a composição da matriz elétrica do Brasil, além de poder ser utilizado para

direcionamento de políticas públicas, promoções de ações de desenvolvimento e incentivos a diferentes matrizes energéticas.

## 5.1 LIMITAÇÕES

Dentre as limitações do trabalho: a pesquisa dos artigos de alto impacto se restringiu apenas procura na base de dados internacional Scopus; foi realizada algumas adaptações referente aos Inventários de Ciclo de Vida (ICVs); a não regionalização do método IPCC.

A subfonte cana de açúcar representa um alto impacto mesmo correspondendo a fonte renovável, isso ocorre devido seu processo considerar todo o ciclo de vida, entretanto, o presente trabalho não mensurou o sequestro de carbono referente a cana de açúcar, o que resultaria em uma menor contribuição de impacto relativo em termos de aquecimento global.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Estudos futuros poderão analisar a sensibilidade de investimentos em diferentes fontes; incluir outros métodos de impactos; entender a análise referente ao maior número de anos (histórico e composições futuras); incluir outras categorias de impacto; comparar a pegada de carbono ((Kg CO<sub>2</sub> eq.) / MW) referente as emissões e impactos ambientais com estudos de outros países.

## REFERÊNCIAS

ABEPRO (Associação Brasileira de Engenharia de Produção). **Associação Brasileira de Engenharia de Produção**. 2008. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/interna.asp?c=362>>. Acesso em: 16 out. 2016.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **ABNT NBR ISO 14044: 2009** Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR ISO 14040: 2009** Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e Estrutura. Brasil, 2009a.

ACV BRASIL, “**Umberto NXT Universal**”. 2016. Disponível em: <<http://www.acvbrasil.com.br/umberto-nxt/>>. Acesso em: 17 out. 2016.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). (Org.). **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. 2002. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf)>. Acesso em: 16 out. 2016.

\_\_\_\_\_. (Org.). **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**, 3ª edição, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf> >. Acesso em: 20 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. (Org.). **Banco de Informações de Geração (BIG)**, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

ASDRUBALI, Francesco et al. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1113-1122, 2015.

ATILGAN, Burcin; AZAPAGIC, Adisa. Assessing the Environmental Sustainability of Electricity Generation in Turkey on a Life Cycle Basis. **Energies**, v. 9, n. 1, p. 31, 2016.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Renewable electricity in Turkey: Life cycle environmental impacts. **Renewable Energy**, v. 89, p. 649-657, 2016.

BARTECZKO-HIBBERT, Christian et al. A multi-period mixed-integer linear optimisation of future electricity supply considering life cycle costs and environmental impacts. **Applied Energy**, v. 133, p. 317-334, 2014.

BERRILL, Peter et al. Environmental impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 1, p. 014012, 2016.

BRIZMOHUN, Ravina et al. Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius. **Journal of Cleaner Production**, v. 106, p. 565-575, 2015.

BURKHARDT, Jörg et al. Hydrogen mobility from wind energy—A life cycle assessment focusing on the fuel supply. **Applied Energy**, v. 181, p. 54-64, 2016.

CHERUBINI, Edivan; RIBEIRO, Paulo Trigo. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT, 2015.

CHOMA, Ernani Francisco; UGAYA, Cássia Maria Lie. Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet. **Journal of Cleaner Production**, 2015.

DALE, Alexander T. et al. Modeling future life-cycle greenhouse gas emissions and environmental impacts of electricity supplies in Brazil. **Energies**, v. 6, n. 7, p. 3182-3208, 2013.

DZIKUĆ, Maciej; PIWOWAR, Arkadiusz. Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: The case of Poland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 856-862, 2016.

ECOINVENT. **Data base**. 2017. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/database/database.html>>. Acesso em: 02 mai. 2017.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). (Org.). **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil - Condicionantes e Impactos**. 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20->



%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20(Revisada).pdf>. Acesso em: 16 abr. 2017.

GARCIA, Rita; MARQUES, Pedro; FREIRE, Fausto. Life-cycle assessment of electricity in Portugal. **Applied Energy**, v. 134, p. 563-572, 2014.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 1994. 207 p.

IFU HAMBURG, “**Umberto NXT Universal**”, 2017. Disponível em: <<http://www.umberto.de/en/versions/umberto-nxt-universal>>. Acesso em: 02 mai. 2017.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

LELEK, Lukasz et al. Life cycle assessment of energy generation in Poland. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 1, p. 1-14, 2016.

LÖFGREN, Birger; TILLMAN, Anne-Marie; RINDE, Björn. Manufacturing actor's LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 17, p. 2025-2033, 2011.

MALLIA, Eric; LEWIS, Geoffrey. Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generation in the province of Ontario, Canada. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 2, p. 377-391, 2013.

MEE (Ministério de Minas e Energia). (Org.). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. (Org.). **Balço Energético Nacional (BEN)**. 2016. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2016.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf)>. Acesso em: 16 out. 2016.

MUÑOZ, Edmundo; VARGAS, Sebastián; NAVIA, Rodrigo. Environmental and economic analysis of residual woody biomass transport for energetic use in Chile. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 7, p. 1033-1043, 2015.

PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109-2135, 2015.

RAUGEI, Marco; LECCISI, Enrica. A comprehensive assessment of the energy performance of the full range of electricity generation technologies deployed in the United Kingdom. **Energy Policy**, v. 90, p. 46-59, 2016.

REHBERGER, M.; HIETE, M. Considering supply and demand of electric energy in life cycle assessments—a review of current methodologies. **Matériaux & Techniques**, v. 103, n. 1, p. 105, 2015.

RENTIZELAS, Athanasios; GEORGAKELLOS, Dimitrios. Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix. **Energy Policy**, v. 65, p. 134-149, 2014.

RODRÍGUEZ, MA Rubio et al. Life cycle modeling of energy matrix scenarios, Belgian power and partial heat mixes as case study. **Applied energy**, v. 107, p. 329-337, 2013.

ŞENGÜL, Hatice et al. A cradle to gate life cycle assessment of Turkish lignite used for electricity generation with site-specific data. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 478-490, 2016.

SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013.

STAMFORD, Laurence; AZAPAGIC, Adisa. Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070. **Energy for Sustainable Development**, v. 23, p. 194-211, 2014.

TREYER, Karin; BAUER, Christian. Life cycle inventories of electricity generation and power supply in version 3 of the ecoinvent database—part I: electricity

generation. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1236-1254, 2016.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_.; SIMONS, Andrew. Human health impacts in the life cycle of future European electricity generation. **Energy Policy**, v. 74, p. S31-S44, 2014.

TURCONI, Roberto et al. Environmental impacts of future low-carbon electricity systems: detailed life cycle assessment of a Danish case study. **Applied Energy**, v. 132, p. 66-73, 2014.

\_\_\_\_\_.; BOLDRIN, Alessio; ASTRUP, Thomas. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: overview, comparability and limitations. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 28, p. 555-565, 2013.

UN (United Nations). **17goal to transform our world**: Goal 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. 2016. Disponível em: <<http://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

VÁZQUEZ-ROWE, Ian et al. Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes?. **Applied Energy**, v. 159, p. 108-116, 2015.

WANG, Xiaojun; CHAN, Hing Kai; LI, Dong. A case study of an integrated fuzzy methodology for green product development. **European Journal of Operational Research**, v. 241, n. 1, p. 212-223, 2015.

WOLFRAM, Paul; WIEDMANN, Thomas; DIESENDORF, Mark. Carbon footprint scenarios for renewable electricity in Australia. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 236-245, 2016.

**APÊNDICE A** - Descrição das fontes energéticas brasileira de acordo com a base de dados da Ecoinvent

**Hidrelétrica** (*electricity production, hydro, reservoir, tropical region [BR] 2016*  
*Allocation, cut-off*)

Produção de eletricidade de alta tensão em usinas hidrelétricas de reservatórios no Brasil em 2012. A modelagem foi realizada com plantas da região tropical com base nas centrais hidrelétricas suíças. As barragens são consideradas com uma altura superior a 30 metros. A vida útil é de 150 anos para a parte estrutural e 80 anos para as turbinas. **As atividades incluídas começam** - a partir da usina pronta para produzir eletricidade, ou seja, o reservatório cheio de água. (Potencial) na água, entrando na usina. **As atividades incluídas terminam** - com eletricidade de alta tensão produzida na usina. Conjunto de dados inclui: área / volume ocupado para a barragem, estação de energia, e o lago; uma estimativa das emissões de dióxido de carbono e metano; atividades e materiais de operação e manutenção das usinas, como óleo lubrificante ou massa de água passando pelas turbinas.

**Energia hidrelétrica importada do Paraguai, Argentina, Venezuela e Uruguai** (*electricity, high voltage, import from PY, AR, VE, UY [BR] 2016*  
*Allocation, cut-off*)

Este conjunto de dados representa a quantidade de eletricidade importada do Paraguai, Argentina, Venezuela e Uruguai para o Brasil. O valor de importação é válido para 2012. **As atividades incluídas começam** - ponto de "entregar" a eletricidade de um país para o outro na fronteira. **As atividades incluídas terminam** - nenhum dado. Este conjunto de dados não inclui perdas de eletricidade ou infraestruturas de transmissão.

**Eólica** (*electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore [BR] 2016*  
*Allocation, cut-off*)

Este conjunto representa a produção de eletricidade de alta tensão em usinas eólicas conectadas à rede com capacidade entre 1 (excluído) e 3 (incluídos) MW no Brasil em 2012. Inclui operação e despesas de manutenção e insumos de infraestrutura. As horas de carga do vento foram adaptadas às condições locais. A classe de turbinas eólicas *onshore* 1-3MW é aproximada com uma turbina de vento *onshore* de 2 MW consistindo nos conjuntos de dados de infraestrutura para a construção de turbinas eólicas. **As atividades incluídas começam** - nos módulos das turbinas instalada e pronta para ser utilizada. **As atividades incluídas terminam** - terminam com a eletricidade de alta tensão produzida nas turbinas 1-3MW.

**Solar** (*electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si [RoW] 2016 Allocation, cut-off*)

Produção de eletricidade, fotovoltaica, 570kWp em campo aberto, com instalação em terra, multi-Si. A geografia inclui resto do mundo [RoW]. Este conjunto de dados representa a produção de eletricidade de baixa tensão ligada à rede fotovoltaica em todo o mundo em 2012. **As atividades incluídas começam** - do módulo fotovoltaico instalado e pronto para ser utilizado. **As atividades incluídas terminam** - terminam com a eletricidade de baixa tensão produzida nos módulos de 570 kWp, assumindo um rendimento médio. O conjunto de dados inclui o uso da água da torneira para limpar o módulo e seu tratamento.

**Cana de açúcar** (*cane sugar production with ethanol by-product [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este conjunto de dados inclui o transporte de cana-de-açúcar para a refinaria de açúcar e a transformação de cana de açúcar em açúcar, etanol, bagaço, eletricidade e vinhaça da produção de etanol. O limite do sistema está na refinaria de açúcar. O tratamento de efluentes residuais não está incluído. Produção de eletricidade a partir da contagem de 1 kg de etanol. **As atividades incluídas começam** - Nenhum dado. **As atividades incluídas terminam** - terminam com a eletricidade gerada a partir da cana de açúcar.

**Licor negro (madeira)** (*heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este conjunto de dados representa a produção de calor e eletricidade com madeira em um estado da arte (a partir de 2014). A co-geração com uma capacidade de 6.667 kW (referente à entrada de combustível) na Suíça e foi aproximada para este conjunto de dados válido para no Brasil (incertezas ajustadas em conformidade). Portanto, o calor é considerado o produto principal e, portanto, o produto de referência, enquanto a eletricidade é um subproduto. A eletricidade é produzida com um gerador de vapor orgânico. As aparas de madeira são queimadas em uma caldeira a uma temperatura de 800-1300°C. A energia é liberada na forma de calor. O calor produzido pode ser usado diretamente ou para produção de vapor para gerar eletricidade com uma turbina. **As atividades incluídas começam** - a partir de aparas de madeira prontas a serem queimadas em unidade de cogeração (para produção de calor e energia). **As atividades incluídas terminam** - terminam com o calor e eletricidade produzida. Este conjunto de dados inclui a infraestrutura, a entrada de as emissões para o ar e a eliminação das cinzas. Estão também incluídas as substâncias necessárias para o funcionamento: óleo lubrificante, produtos químicos orgânicos, cloreto de sódio, cloro e água decarbonizada.

**Nuclear** (*electricity production, nuclear, pressure water reactor [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este conjunto inclui a produção de eletricidade de alta tensão em um sistema de pressão nuclear conectado à rede no Brasil em 2012. É uma cópia do conjunto de dados "produção de eletricidade nuclear de água sob pressão, 1995-2002", ou seja, de um conjunto de dados a partir das usinas nuclear suíças. **As atividades incluídas começam** - da usina construída pronta para produzir eletricidade e do combustível pronto na usina. **As atividades incluídas terminam** - terminam com a eletricidade gerada a partir da usina nuclear.

**Gás natural** (*electricity production, natural gas, combined cycle power plant [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este conjunto de dados representa a produção de eletricidade de alta tensão em uma usina de gás natural de ciclo combinado no Brasil em 2012. Numa central de ciclo combinado, uma turbina a gás é seguida por uma turbina a vapor. **As atividades incluídas começam** - da usina de gás natural construída pronta para produzir eletricidade. A partir da recepção de gás natural e operando na porta da usina / fábrica. **As atividades incluídas terminam** - terminam com 1kWh de eletricidade de alta tensão produzida na usina. O conjunto de dados inclui: todas as atividades de operação, manutenção e materiais das usinas; arrefecimento: é assumido que todas as usinas usam refrigeração úmida com uma torre de resfriamento, onde nenhuma torre de resfriamento está incluída neste conjunto de dados; utilização de água decarbonizada para a redução das emissões de NO<sub>x</sub>. Este conjunto de dados não inclui: extração de matérias-primas, desmantelamento e tratamento de resíduos.

**Carvão** (*electricity production, hard coal [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este conjunto de dados representa a produção de eletricidade de alta tensão em uma usina média de carvão. **As atividades incluídas começam** - a partir da usina de carvão construída pronta para produzir eletricidade. A partir da recepção de carvão e operando no portão da usina. **As atividades incluídas terminam** - na conversão de energia para produção de eletricidade. O uso de óleo combustível para a inicialização é contabilizado. A remoção de partículas é incluído neste módulo.

**Petróleo** (*electricity production, oil [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este módulo inclui produção de eletricidade de alta tensão em uma usina de capacidade de 500 MW no mundo em 2012. **As atividades incluídas começam** - da usina construída pronta para produzir eletricidade e do combustível pronto para ser usado. **As atividades incluídas terminam** - terminam com 1kWh de eletricidade de alta tensão produzida na usina. O conjunto de dados inclui todo o uso de energia, uso de produtos químicos, emissões para o ar e água, incluindo o tratamento de gases de combustão e efluentes.

**Óleo diesel** (*heat and power co-generation, diesel, 200kW electrical, SCR-NOx reduction [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este módulo inclui produção de eletricidade em uma usina a partir do óleo diesel. **As atividades incluídas começam** - a partir da usina de óleo diesel construída pronta para produzir eletricidade. **As atividades incluídas terminam** - na conversão de energia para produção de eletricidade. O uso de óleo combustível para a inicialização é contabilizado. O módulo inclui entrada de combustível, infraestrutura, emissões para o ar e substâncias necessárias para operação.

**Gás de processo** (*treatment of blast furnace gas, in power plant [BR] 2016 Allocation, cut-off*)

Este conjunto de dados foi criado como uma cópia do conjunto de dados da Europa. Os volumes de produção foram ajustados. O conjunto de dados representa o tratamento do gás de alto-forno em uma usina de gás não especificada com alta tensão de eletricidade e calor como subproduto na Áustria em 2012. **As atividades incluídas começam** - a partir do gás do alto-forno pronto a ser tratado numa central de gás e da central de gás pronta para produzir eletricidade. **As atividades incluídas terminam** - termina com 1MJ de gás de alto forno tratado em uma usina de gás. Este conjunto de dados inclui: as emissões da queima; todas as atividades de operação e manutenção e materiais das usinas; refrigeração: é assumido que todas as plantas usam refrigeração molhada com uma torre refrigerando. Este conjunto de dados não inclui: extração de matérias-primas, desmantelamento e tratamento de resíduos; transformação da energia do subproduto.

Fonte: (ECOINVENT, 2017)