



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA GERADA POR USINAS HIDROELÉTRICAS,  
EÓLICAS E TERMOELÉTRICAS NO BRASIL

THUANY MARRA DE FIGUEIREDO LOURENÇO

BELO HORIZONTE

2016

THUANY MARRA DE FIGUEIREDO LOURENÇO

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
GERADA POR USINAS HIDROELÉTRICAS, EÓLICAS E TERMOELÉTRICAS NO  
BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Ambiental e  
Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Brianezi

BELO HORIZONTE

2016



Serviço Público Federal – Ministério da Educação  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E  
SANITÁRIA

### ATA DE DEFESA FINAL TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Aos **trinta** dias do mês de **novembro** de 2016, no *campus* I do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, reuniram-se os professores **Daniel Brianezi**, **Arnaldo Freitas de Oliveira Júnior** e **Karina Venâncio Bonitese**, para participarem da banca de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "*Emissão de gases de efeito estufa na produção de energia elétrica por usinas hidroelétrica, eólicas e termoelétricas no Brasil*" de autoria da aluna **Thuany Marra F. Lourenço**, do curso de Engenharia de Ambiental e Sanitária. Uma vez avaliado, o trabalho foi declarado:

Aprovado.

Reprovado.

Belo Horizonte, 30 de novembro de 2016.

Banca Examinadora:

Prof. Orientador Daniel Brianezi

Prof. Arnaldo Freitas de Oliveira Júnior

Prof.<sup>ª</sup> Karina Venâncio Bonitese

Lourenço, Thuany Marra de Figueiredo.

Emissão de Gases de Efeito Estufa na produção de energia elétrica gerada por usinas hidroelétricas, eólicas e termoelétricas no Brasil. / Thuany Marra de Figueiredo Lourenço. -2016.

89 f. il.; 29,7cm

Orientador: Daniel Brianezi

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

1. Geração de Energia Elétrica. 2. Análise de Ciclo de Vida 3. Emissão de Gases Efeito Estufa. I. Brianezi, Daniel. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 333.79

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela bênção das oportunidades as quais me foram oferecidas, pela saúde e competência para fazer delas uma experiência inesquecível, e por alimentar minha fé a qual tem sido um refúgio para momentos de angústia e desamparo.

À minha família, pelo apoio, amor, compreensão e incentivo às minhas escolhas, agradeço as críticas conselhos e puxões de orelha os quais me deram impulso para decisões difíceis e consequente maturidade.

Aos amigos, obrigada pelo ponto de apoio, pelo companheirismo e por ser minha válvula de escape em momentos de alta pressão, comuns na engenharia. Há alguns que se perderam no caminho, independente das circunstâncias as quais nos afastamos, tenho enorme gratidão pelos momentos que compartilhamos. A todos, obrigada pela confiança de partilharem parte da vida comigo.

Aos professores, pela dedicação e conhecimento compartilhado. A grande maioria me passou ensinamentos que foram além dos conteúdos do currículo, mas aprendizados importantes para a vida como ética, generosidade, amizade e humildade. Em especial ao meu agradecimento ao orientador Prof. Dr. Daniel Brianezi, pela paciência e orientação, e aos professores Dr. Arnaldo Freitas de Oliveira Júnior e M.Sc. Karina Venâncio Bonitese, membros da banca examinadora, pela disponibilidade e contribuições pessoais.

Finalmente, obrigada ao CEFET, a University of Stirling e à GEDEF/FEAM onde tive grandes oportunidades de crescimento acadêmico e pessoal. Devo aqui estender este agradecimento à todas as instituições de ensino e colaboradores, que mesmo em condições adversas, empenham se na formação e qualificação de cidadãos.

*A man can be as great as he wants to be. If you believe in yourself and have the courage, the determination, the dedication, the competitive drive, and if you are willing to sacrifice the little things in life and pay the price for the things that are worthwhile, it can be done<sup>1</sup>.*

Vince Lombardi

---

<sup>1</sup> Um homem pode ser tão bom quanto ele deseja ser. Se você acreditar em si mesmo e ter a coragem, a determinação, a dedicação, o espírito competitivo e se estiver disposto a sacrificar as pequenas coisas da vida e pagar o preço por aquilo que realmente vale a pena, isso pode ser feito.

## RESUMO

LOURENÇO, T.M.F. *Emissão de Gases de Efeito Estufa na produção de energia elétrica gerada por usinas hidroelétricas, eólicas e termoelétricas no Brasil* 2016. 89f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

Recentemente a crise hídrica tem gerado grandes preocupações aos brasileiros, pois tem afetado não só o abastecimento de água, mas também a produção energética. Em períodos de forte estiagem, a produção energética por fontes não renováveis como gás, carvão e óleo ganha maior representatividade na matriz elétrica, porém esta é mais onerosa e de maior potencial poluidor. Em contrapartida, o Brasil possui grande potencial eólico estimado, sendo esta uma fonte de geração limpa, renovável e que tem atraído investimentos. Sendo assim, o presente estudo apresenta uma estimativa da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) relacionado à produção de energia elétrica destas três fontes de geração (hidroelétricas, eólicas e termoelétricas) com base no estudo comparativo de Análise do Ciclo de Vida considerando como fronteiras do sistema as etapas de construção e operação das usinas. A geração de energia foi então comparada em termos de potencial de emissões GEE (tonCO<sub>2e</sub>/GW) e custos de geração (R\$/MW). Além disso, as projeções futuras destas análises indicam que a diversificação da matriz elétrica brasileira, incluindo fontes combustíveis alternativas e energia renovável pode auxiliar de forma expressiva no cumprimento das metas de redução de emissões de GEE assumidas pela Política Nacional sobre Mudança do Clima atualizadas na COP21 em 2015. Desenvolveu-se então um estudo de caso de análise de ciclo de vida para a usina hidrelétrica binacional de Itaipu, que demonstra a aplicabilidade e importância de estudos de ACV no setor elétrico.

Palavras-Chave: Geração de energia elétrica, Análise de Ciclo de Vida, Emissões de Gases Efeito Estufa.

## ABSTRACT

LOUREÇO, T.M.F. *Emission of Greenhouse Gases in the production of electricity generated by hydroelectric, wind and thermoelectric plants in Brazil*. 2016 89p. Monograph (Degree in Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

Recently, the water crisis has caused great concern to Brazilians as it has affected not only the water supply, but also the energy production. In periods of severe drought, energy production by non-renewable sources such as gas, coal and oil gain greater representation in the energy composing, but this type of source is more expensive and has a greater polluting potential. On the other hand, Brazil has great wind energy potential estimated, this is a renewable source of clean generation, and has attracted investments. Thus, this study provides an estimate of greenhouse gas emissions (GHG's) related to the production of electricity from these three sources of generation (hydroelectric, wind and thermal) based on the comparative study of Life Cycle Analysis considering the stages of construction and operation of plants as the system borders. Power generation was then compared in terms of GHG's emissions potential (tonCO<sub>2e</sub>/GW) and generation costs (R\$/MW). Furthermore future projections of these analyses indicate that the diversification of the Brazilian energy composing, including alternative fuel sources and renewable energy can assist significantly in meeting the GHG emissions reduction targets assumed by the National Policy of Climate Change updated on the COP21 in 2015. Then a case study of life cycle analysis was developed for the Itaipu binational hydroelectric plant, which demonstrates the applicability and importance of LCA studies in the electric sector.

Keywords: Electrical Energy Generation, Life Cycle Assessment, Green House Gas emissions

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	20
Figura 2 - Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh).....	21
Figura 3 - Potencial eólico brasileiro por região. ....	26
Figura 4 - Projeção do consumo total de eletricidade no Brasil no período de 2013 a 2050. ...	32
Figura 5 - Modelo da estrutura das fronteiras do sistema.....	34
Figura 6 - Principais fontes utilizadas para geração de calor nas usinas termoeletricas no Brasil.....	38
Figura 7: Caracterização dos cenários de projeção .....	42
Figura 8 - Esquema sobre a estrutura de uma Análise de Ciclo de Vida. ....	43
Figura 9 - Modelo da estrutura das fronteiras do sistema.....	43
Figura 10 - Emissões de CO <sub>2e</sub> e Geração de energia hidroelétrica no período de 2005 a 2015 .....	51
Figura 11 - Emissões de CO <sub>2e</sub> e Geração de energia termoeletrica no período de 2005 a 2015 (cenários A e B).....	52
Figura 12 - Emissões de CO <sub>2e</sub> e Geração de energia eólica no período de 2007 a 2015 .....	53
Figura 13 - Emissões de CO <sub>2e</sub> baseado no fator de emissão estimado por ACV segundo Miranda (2012). ....	54
Figura 14 - Preço médio de geração de energia elétrica por fonte de geração nos períodos de 2005 a 2015. ....	56
Figura 15 - Preço médio do custo de geração de energia termoeletrica no período de 2005 a 2015 por fonte.....	57
Figura 16 - Projeção decenal da composição da matriz elétrica brasileira no período de 2020 a 2050 para o cenário 1.....	59
Figura 17 - Projeção decenal da composição da matriz elétrica brasileira no período de 2020 a 2050 para o cenário 2.....	60
Figura 18 - Comparação dos cenários de projeção entre 2010 e 2050 para geração de energia e emissões de CO <sub>2e</sub> .....	63
Figura 19: Meta estabelecida e emissões de CO <sub>2e</sub> no setor elétrico em 2030.....	64
Figura 20 - Geração de energia elétrica pela Usina Itaipu Binacional no período de 1984 a 2015 .....	67
Figura 21 - Principais insumos na fase de construção da usina de Itaipu .....	70
Figura 22 - Alterações no uso do solo causadas pela construção da Usina de Itaipu.....	71
Figura 23 - Emissões de CO <sub>2e</sub> na fase de construção.....	72
Figura 24 - Composição das emissões de GEE no reservatório de Itaipu. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de emissão para Usinas Termoeletricas por diferentes fontes.....	39
Tabela 2: Fatores de emissão de CO <sub>2e</sub> para cada tipo de fonte geradora .....	39
Tabela 3 - Fator de ponderação de GWP para conversão de GEE em CO <sub>2e</sub> .....	40
Tabela 4 - Fatores de emissão fornecidos pelo MCTI no período de 2006 a 2015 para a matriz energética.....	47
Tabela 5 - Comparação dos fatores de emissão para os cenários A e B.....	48
Tabela 6 - Variação média entre os fatores de emissão considerando ACV.....	49

## LISTA DE SIGLAS

ACV – Análise de Ciclo de Vida
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG – Banco de Informações de Geração
CH <sub>4</sub> – Metano
CO <sub>2</sub> – Gás Carbônico
CO <sub>2e</sub> – Gás Carbônico Equivalente
COP – Conferência das Partes
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FE – Fator de Emissão
GEE – Gases Efeito Estufa
GW – Gigawatt
GWh – Gigawatt por hora
iNDC – <i>intended Nationally Determined Contribution</i>
IPCC – <i>International Panel of Climate Change</i>
kW – Kilowatt
kWh – Kilowatt por hora
MCTI – Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MTon – Milhões de Toneladas
MW – Megawatt
MWh – Megawatt por hora
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU – Organização das Nações Unidas
PCH – Pequena Central Hidroelétrica
PIB – Produto Interno Bruto
PNE – Plano Nacional de Energia
RCE – Reduções Certificadas de Emissões
SIN – Sistema Interligado Nacional
SIPOT – Sistema de Informações do Potencial Hidroelétrico Brasileiro
UHE – Usinas Hidroelétricas
UTE – Usinas Termoeletricas

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
2.	<b>OBJETIVO GERAL</b>	15
2.1.	<b>Objetivos Específicos</b>	15
3.	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	16
3.1.	<b>Análise de Ciclo de Vida</b>	16
3.1.1.	<u>Histórico da Análise do Ciclo de Vida</u>	17
3.1.2.	<u>Vantagens e limitações da ACV</u>	18
3.2.	<b>Matriz elétrica brasileira</b>	18
3.2.1.	<u>Hidroelétrica</u>	21
3.2.2.	<u>Termoelétrica</u>	23
3.2.3.	<u>Energia Eólica</u>	24
3.3.	<b>Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE)</b>	27
3.3.1.	<u>Metas de redução de emissões</u>	27
3.4.	<b>Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE)</b>	29
3.4.1.	<u>Fatores de emissão de Gases Efeito Estufa</u>	29
3.4.2.	<u>Emissões de GEE na produção de energia elétrica</u>	29
3.5.	<b>Custos da energia elétrica</b>	30
3.5.1.	<u>Iniciativas de compensação energética</u>	30
3.5.2.	<u>Leilões regulados de geração e transmissão de energia</u>	31
3.6.	<b>Projeções Futuras</b>	31
4.	<b>METODOLOGIA</b>	33
4.1.	<b>Obtenção de dados de geração de energia elétrica</b>	33
4.2.	<b>Metodologia de Análise de Ciclo de Vida</b>	33
4.2.1.	<u>Análise de Ciclo de vida auxiliada pelo Software Umberto</u>	35
4.3.	<b>Fatores de Emissão</b>	35
4.3.1.	<u>Fator de emissão para hidroelétricas</u>	37
4.3.2.	<u>Fator de emissão para termoelétricas</u>	37
4.3.3.	<u>Fator de emissão para usinas eólicas</u>	39
4.4.	<b>Estimativas da emissão de CO<sub>2</sub></b>	40
4.5.	<b>Custo de geração de energia elétrica</b>	40
4.6.	<b>Projeções Futuras</b>	41
4.6.1.	<u>Projeção de demanda por energia elétrica</u>	41
4.6.2.	<u>Cenários de projeção das emissões de GEE</u>	41
4.7.	<b>Metodologia do estudo de caso</b>	42
4.7.1.	<u>Definição do objetivo e do escopo</u>	43
4.7.2.	<u>Análise de inventário</u>	44
4.7.3.	<u>Avaliação de Impactos Ambientais</u>	45
4.7.4.	<u>Interpretação</u>	45
5.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	46
5.1.	<b>Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) na matriz energética</b>	46
5.1.1.	<u>Fatores de emissão utilizados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI)</u>	46
5.1.2.	<u>Fator de Emissão de Gases Efeito Estufa por Análise de Ciclo de Vida</u>	47
5.2.	<b>Comparação dos fatores de emissão considerando ACV</b>	49
5.3.	<b>Estimativa das emissões de GEE por fonte</b>	50
5.3.1.	<u>Emissões provenientes da geração Hidroelétrica</u>	50
5.3.2.	<u>Emissões provenientes da geração Termoelétrica</u>	51
5.3.3.	<u>Emissões provenientes da geração Eólica</u>	52

5.4.	<b>Composição das emissões de GEE no período de 2005 à 2015</b> .....	54
5.5.	<b>Custos de geração de energia elétrica</b> .....	55
5.6.	<b>Projeção futura da demanda por energia elétrica</b> .....	58
5.6.1.	<u>Projeção da Composição da Matriz Elétrica</u> .....	58
5.6.2.	<u>Projeção das Emissões de GEE</u> .....	61
5.7.	<b>Atendimento às metas de redução de GEE</b> .....	64
5.8.	<b>Dificuldades encontradas nos estudos de ACV</b> .....	65
6.	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	66
6.1.	<b>Análise do ciclo de vida da geração de energia hidroelétrica baseado no inventário de dados da usina binacional de Itaipu</b> .....	66
7.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	75
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	76
	<b>ANEXO A</b> .....	83
	<b>ANEXO B</b> .....	84
	<b>ANEXO C</b> .....	86

## 1. INTRODUÇÃO

Recentemente a crise hídrica tem gerado grandes preocupações aos brasileiros, pois a estiagem tem afetado não só o abastecimento de água, mas também a produção energética. Grande parte da eletricidade gerada no país é proveniente de hidroelétricas e os reservatórios que abastecem tais usinas estão com níveis mínimos devido ao longo período sem chuvas, o que tem levado a um aumento das tarifas energéticas nos últimos tempos, além da iminente ameaça de racionamento energético.

Deste modo, em períodos de forte estiagem, a produção energética por fontes não renováveis como gás, carvão e óleo ganham força e maior representatividade na matriz energética brasileira, porém a geração termoelétrica é mais onerosa e possui maior potencial poluidor. Em contrapartida, o Brasil possui grande potencial de geração de energia eólica, que é uma fonte de geração limpa, renovável e independe de condições climáticas cíclicas, como épocas de chuva. O setor eólico tem atraído diversos investimentos nos últimos anos e tem ganhado expressividade na matriz energética brasileira, entretanto a geração de energia eólica é prejudicada em locais onde os ventos são intermitentes.

Este crescimento da participação de fontes alternativas na matriz energética brasileira pode ser constatado pelos registros dos empreendimentos em construção, ou com construção não iniciada, porém com potencial energético de produção, disponibilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Nota-se ainda uma grande expressividade de empreendimentos que utilizam combustíveis fósseis como suprimento, com 36% dos empreendimentos de geração de energia com construção não iniciada, acompanhada pela produção hidroelétrica, com cerca de 33%. Porém a energia eólica tem ganhado espaço considerável no mercado, com maior parcela dos empreendimentos em construção (35%), e 11% dos empreendimentos com potencial para construção (ANEEL, 2015).

Além disso, a produção de energia elétrica é responsável pela geração de diferentes externalidades ambientais que afetam direta e indiretamente a população, levando a necessidade de se desenvolver métodos para avaliação do desempenho ambiental dos empreendimentos de geração de energia.

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que vem sendo utilizada para a avaliação do desempenho ambiental. A ACV é um método que inclui a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos de um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, levando em consideração, por exemplo, a disposição de rejeitos, o consumo de recursos naturais e as emissões de poluentes e gases de efeito estufa. Os resultados desta

análise são utilizados para escolher alternativas mais favoráveis para uma aplicação específica (CHEHEBE, 1997).

No Brasil, a Análise do Ciclo de Vida ainda não é uma ferramenta muito difundida. O país enfrenta dificuldades em relação ao desenvolvimento de uma metodologia adaptada a cada região, uma vez que um estudo com maior precisão depende de um levantamento de dados mais específicos, que muitas vezes estão indisponíveis. Apesar das dificuldades, algumas iniciativas estão sendo implementadas em diversos setores produtivos como: construção civil, automobilístico, embalagens, energia, agropecuário, mineração, químico, etc. Entretanto, não existe uma evolução progressiva dos trabalhos, o que reafirma a relevância deste estudo. (BARBOSA JÚNIOR et.al., 2007).

Deste modo, o trabalho foi dividido em duas partes: a primeira refere-se a um estudo comparativo da análise do ciclo de vida na produção de energia elétrica gerada por usinas hidroelétricas, eólicas e termoelétricas considerando a emissão de gases efeito estufa. Na segunda parte, desenvolveu-se um estudo de caso de análise de ciclo de vida para a usina hidrelétrica binacional de Itaipu, a fim de mostrar a aplicabilidade e importância de estudos de ACV no setor elétrico.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a aplicabilidade e importância de estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) para a estimativa de Gases Efeito Estufa no setor elétrico brasileiro considerando como fontes de geração as usinas hidroelétricas, termoeleétricas e eólicas.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Utilizar o método de Análise do Ciclo de Vida baseado nas diretrizes contidas na NBR ISO 14.040:2006 a fim de comparar a geração de Gases Efeito Estufa (GEE) relacionados à produção de energia elétrica, custos e segurança de fornecimento de energia elétrica de diferentes fontes de geração;
- Comparar o processo de geração de energia, considerando como fronteiras do sistema as etapas de construção e operação;
- Contrastar diferentes matrizes energéticas brasileiras em termos de potencial de emissões de GEE (tonCO<sub>2e</sub>/GW) e segurança de atendimento à demanda e custos de geração (R\$/kW);
- Realizar um estudo de caso com base no inventário de dados de Itaipu, a fim de demonstrar a importância da ACV para avaliação de impactos;
- Colaborar com o desenvolvimento de metodologia e estudos de Análise de Ciclo de Vida aplicado à área de energia que possam servir de base para outras pesquisas do tema.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1. Análise de Ciclo de Vida**

Sabe-se que, o modelo econômico capitalista desenvolvimentista é caracterizado por grandes incentivos ao consumo de bens manufaturados e fornecimento de serviços, para tal existe uma crescente demanda por recursos naturais, os quais têm passado por intensa exploração e conseqüente degradação da qualidade do meio ambiente. O amadurecimento da compreensão dos problemas ambientais globais iniciou-se na década de 1970 e teve como conseqüência o questionamento dos processos produtivos e práticas de exploração ambiental, o que viabilizou consensos quanto à necessidade de regulamentação da relação do homem com o meio ambiente, iniciando assim uma tendência pelo desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2012).

Desta forma, muitas corporações se viram obrigadas a promover mudanças de conduta no sentido de reduzir impactos ambientais negativos decorrentes de suas atividades. Inicialmente, foram tomadas apenas medidas de controle para reduzir os efeitos adversos provocados pela ação antrópica sobre o ambiente. Entretanto, viu-se a necessidade de adequações no processo produtivo incluindo ações preventivas, de forma a otimizar a produção, conciliando assim o desenvolvimento econômico e sustentável, sem deixar de cumprir legislações ambientais cada vez mais restritivas (SEO & KULAY, 2006).

Com isso, a avaliação do desempenho ambiental de um bem ou serviço, tornou-se essencial para gestão dos processos produtivos. Esta avaliação deve ser realizada de forma holística abrangendo todas as atividades potencialmente poluidoras, considerando todas as etapas de produção, desde a obtenção dos recursos naturais até a fabricação do produto ou fornecimento de um serviço. Esta é a visão da Análise de Ciclo de Vida (ACV), a qual atualmente atua como uma ferramenta de gestão, permitindo avaliar o impacto ambiental de um produto, processo ou serviço do “berço ao túmulo”, ou seja, desde a extração da matéria-prima até a disposição final (CHEHEBE, 1997).

O método de ACV consiste na compilação e avaliação de dados de entrada (matéria prima e energia) e saída (emissão de poluente, rejeitos, etc.) que permite uma visão global de toda a cadeia produtiva, permitindo a identificação de potenciais impactos e verificação de pontos onde se pode realizar o uso otimizado de energia e de materiais, através do uso de processos de reciclagem e de reuso. Os resultados desta análise podem ainda ser utilizados para escolher dentre diferentes alternativas a mais favorável para uma aplicação específica (CHEHEBE, 1997) (BARBOSA JÚNIOR et al., 2007;).

### 3.1.1. Histórico da Análise do Ciclo de Vida

Os primeiros estudos comparativos quantificando as necessidades de recursos, emissões e resíduos foram realizados na década de 1970, impulsionadas pela tendência do desenvolvimento sustentável. Em 1972, o *Midwest Research Institute* (MRI) em parceria com a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) iniciou um dos primeiros estudos para indústria de embalagens de cervejas com o objetivo de avaliar as implicações ambientais da utilização de embalagens de vidro reutilizáveis em vez de latas e garrafas não reutilizáveis.

A análise envolveu vários setores da indústria e caracterizou mais de 40 materiais. Os resultados demonstraram que uma garrafa reutilizável tem o desempenho ambiental claramente superior as demais alternativas estudadas (latas e garrafas não reutilizáveis). Este estudo marcou o início do desenvolvimento da ACV como se conhece hoje (FERREIRA, 2004).

Já em 1984, o Laboratório Federal Suíço para Teste e Investigação de Materiais (EMPA) publicou um relatório que tinha como objetivo disponibilizar um inventário de dados para auxiliar nos estudos de análise de ciclo de vida que englobassem os materiais de maior utilização em embalagens, como alumínio, vidro, plásticos, papel e cartão, chapa de lata. Além do fornecimento de dados, este relatório também iniciou uma metodologia para análise de emissões para o ar e para a água baseado nos limites impostos pelas legislações vigentes para tais emissões (LIMA, 2007).

Na década de 1990 houve um notável crescimento dos estudos de ACV na Europa e nos EUA o que levou a Organização Internacional para a Normalização (ISO, sigla em inglês) a criar, em 1992, um comitê técnico (TC 207/SC 5) visando a normalização de um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo a Análise de Ciclo de Vida (FERREIRA, 2004).

A ACV teve início no Brasil na metade dos anos 1990, com o subcomitê dentro do Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANNA) dedicado ao estudo do desenvolvimento da série de normas ISO 14000 que tratam da gestão ambiental dentro de empresas. Em 1998, foi lançada a primeira publicação nacional sobre a metodologia, o livro “Análise de Ciclo de Vida Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000”, de José Ribamar Brasil Chehebe, e no ano seguinte, foi realizado um estudo completo de ACV de embalagens para o mercado brasileiro pelo Centro de Tecnologia de Embalagem do Instituto de Tecnologia de Alimentos (CETEA/ITAL). No mesmo ano, o EMPA, juntamente com institutos governamentais, fundou o Centro Suíço de Inventário de Ciclo de Vida e lançaram o projeto *Ecoinvent*, que fornece um extenso banco de dados de inventário de ciclo de vida (LIMA, 2007).

Somente em 2001 a normatização no Brasil foi iniciada, com o lançamento da norma ABNT NBR ISO 14040 (IBICT, 2016).

Nota-se que, nos estudos de ACV realizados no Brasil, há uma tendência a estudos que focam na fase de análise de inventário, ou seja, no levantamento de aspectos e impactos ambientais associados à cadeia produtiva. De forma geral, a aplicação da ACV no Brasil ainda enfrenta diversas dificuldades e necessita de um maior desenvolvimento, e estabelecimento de uma metodologia adaptada à realidade brasileira (BARBOSA JÚNIOR et al., 2007).

### 3.1.2. Vantagens e limitações da ACV

O estudo de análise de ciclo de vida possui diversas vantagens de aplicação, dentre elas, pode-se citar: (a) a identificação de pontos a serem otimizados no processo produtivo, permitindo a otimização de processos e melhoria da qualidade produtiva; (b) quantificação e comparação do desempenho ambiental de diferentes produtos; (c) fornecimento de informações referentes à utilização de recursos, consumo energético e nas emissões; e por fim (d) auxiliar a tomada de decisões na indústria, governo e ONG's possibilitando planejamento estratégico, na definição de prioridades e no desenvolvimento de projetos e processos (NREL, 2016).

Quanto às dificuldades encontradas na realização de uma ACV, destaca-se a falta de pessoal adequadamente capacitado, uma vez que esta é uma metodologia relativamente nova e pouco adaptada à realidade brasileira, que ainda sofre com a influência de metodologias estrangeiras e a disponibilidade de bancos de dados contendo informações sobre insumos industriais básicos como energia, aço, cimento, combustível etc. (BARBOSA JÚNIOR et al., 2007).

A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta que pode efetivamente ser utilizada na avaliação do potencial sustentável de várias fontes de energia e pode ajudar os gestores na tomada de decisões referentes à alocação das fontes geradoras na matriz energética, garantindo a escolha de uma melhor fonte de energia para uma finalidade específica, incluindo na avaliação dos impactos ambientais relacionados e prezando pelo desenvolvimento sustentável (SINGH et al, 2013).

## **3.2. Matriz elétrica brasileira**

No Brasil, apesar da abundância de recursos naturais, existem regiões com sérios problemas de suprimento energético. Isto porque há no país uma forte concentração de pessoas e atividades econômicas nos grandes centros urbanos, enquanto que grande parte dos

recursos energéticos brasileiros se localiza em regiões pouco desenvolvidas, distantes dos grandes centros consumidores e com fortes restrições ambientais. Portanto, a matriz energética brasileira exige um bom planejamento energético que considere a disponibilidade de recursos energéticos, as tecnologias disponíveis, os sistemas de aproveitamento e as necessidades energéticas setoriais e regionais do país (ANEEL, 2002).

No entanto, no início da década de 2000, o Brasil passou por uma fase de estagnação econômica, acompanhada da necessidade de um racionamento de energia elétrica, o que provocou diversas discussões sobre as mudanças necessárias no modelo adotado pelo setor elétrico (GOMES, 2007).

Medidas de correção foram então propostas para alguns dos problemas detectados e em dezembro de 2003, foram editadas duas Medidas Provisórias (MP): a MP nº 144 que instituiu o novo marco institucional e regulatório do setor elétrico; e a MP nº 145, que aprovou a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), destinada a realizar estudos e pesquisas para subsidiar o planejamento do setor energético. Estas medidas foram incluídas nas Leis nº 10.847 e nº 10.848, ambas sancionadas em 2004 e responsáveis pela reestruturação no setor elétrico brasileiro (GAVINO, 2009).

Com essas mudanças, objetivou-se garantir a segurança de suprimento de energia elétrica a partir de uma contratação eficiente de energia; e realizar programas de universalização no fornecimento de energia elétrica. Para atingir os objetivos, foi instaurado um novo regime de comercialização de energia, baseado nos instrumentos de leilão de eletricidade; além da retomada do processo de planejamento de longo prazo (FERREIRA JR., 2009).

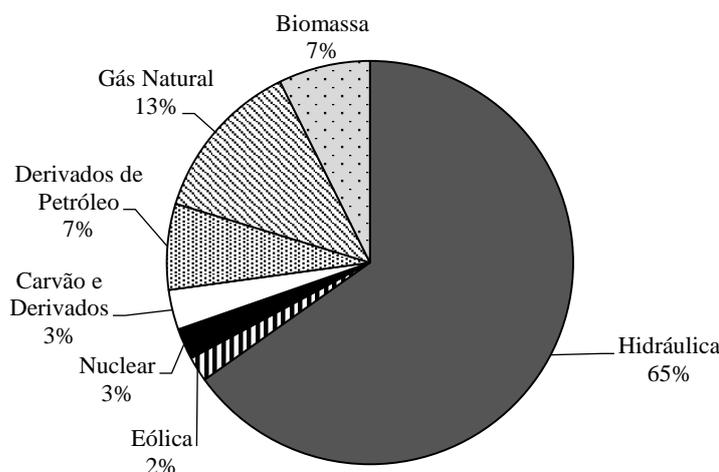
Nos leilões para a concessão de novas obras de geração para expansão da oferta de energia, o novo critério de seleção passou a ser o menor preço da energia a ser gerada, desta forma têm-se a competição de preços por ocasião do leilão, que beneficia o consumidor. Após vencer o leilão, o empreendedor e as distribuidoras assinam os contratos de venda da energia. Esses contratos têm duração de 30 anos (para empreendimentos hidrelétricos), ou 15 anos (empreendimentos termelétricos), e viabilizam a obtenção de financiamento para o empreendimento (FERREIRA JR., 2009).

A política de leilões de energia possibilitou a expansão da matriz elétrica brasileira com o incentivo às fontes renováveis de energia através de programas de subsídios, como o ProInfa (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), que em sua primeira fase fomentou as fontes eólica, biomassa, e Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs). O ProInfa exige a nacionalização de 60% dos custos de construção dos projetos e possibilita maior

inserção de pequenos produtores de energia, o que contribui para a diversificação dos agentes do setor (JANNUZZI et al., 2012).

Segundo o Balanço Energético Nacional (2015), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica com cerca de 80% da oferta interna de eletricidade oriunda de fonte renovável, com destaque para a geração hidráulica, que representa mais de 60% da oferta de eletricidade (Figura 1) (EPE, 2015).

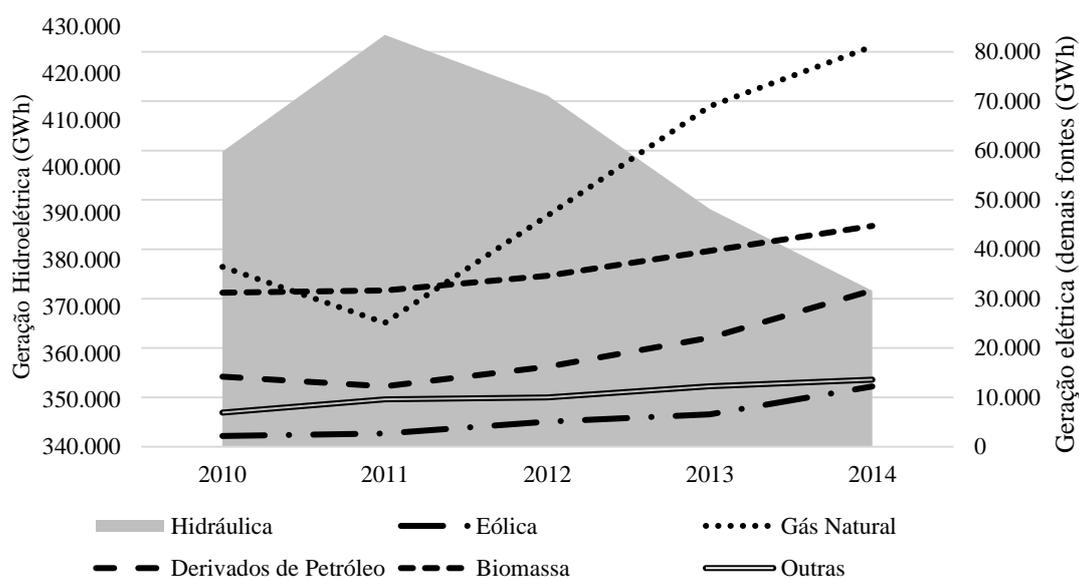
Figura 1- Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.



Fonte: EPE (2015) adaptado pelo autor.

Apesar de ser o maior representante na expansão da matriz elétrica nacional, com produção anual média de 400.000 GWh, nota-se que a geração de energia hidráulica tem perdido espaço no mercado para as demais fontes, como pode ser visto na Figura 2. Em 2014, houve um crescimento da capacidade de geração de energia elétrica do Brasil, que chegou a alcançar 133.914 MW. Nesta expansão, as centrais hidráulicas contribuíram com 44,3%, enquanto as centrais térmicas responderam por 18,1% da capacidade adicionada e as usinas eólicas e solares foram responsáveis pelos 37,6% restantes (EPE, 2015).

Figura 2 - Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh).



Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2015) adaptado pelo autor..

Considerando o crescimento na demanda por energia elétrica e a grande representatividade na expansão da matriz energética brasileira, optou-se por realizar uma avaliação do desempenho ambiental da produção energética a partir de fontes hidráulica, termoelétrica e eólica.

A energia hidráulica possui maior expressividade, porém vem perdendo espaço para as demais fontes de geração. A energia termoelétrica é a atual fonte de atendimento emergencial o que lhe garante grande representatividade na matriz, apesar de uma participação oscilante (conforme demanda) e, por fim, a energia eólica, fonte de energia renovável de grande potencial de crescimento, que ganhou maior expressividade nos últimos anos (ONS, 2016).

As fontes energéticas selecionadas para realização da avaliação do desempenho ambiental da produção energética serão melhor descritas a seguir.

### 3.2.1. Hidroelétrica

A energia hidroelétrica é caracterizada pelo aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio, utilizando seus desníveis naturais como quedas de água, ou artificiais, produzidos através do desvio do curso original do rio e construção de reservatórios. As obras de uma usina hidroelétrica incluem o desvio do curso do rio e a formação do reservatório. A água é utilizada para movimentar as turbinas ligadas a geradores que, em conjunto, realiza a conversão da energia mecânica do movimento da água em elétrica (CAMARGO et. al., 2003) (CCEE, 2016).

As características físicas e geográficas do Brasil, como disponibilidade dos mananciais e extensão de territórios, possuem grande influência na implantação de um parque gerador de energia elétrica de base predominantemente hídrica (CAMARGO et al., 2003).

A primeira hidroelétrica do mundo foi construída no final do século XIX, aproveitando o potencial das Cataratas do Niágara. No mesmo período, o Brasil construiu sua primeira hidroelétrica, no município de Diamantina (MG), utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha. Essa hidroelétrica possuía 0,5 megawatts (MW) de potência. Desde então a potência instalada das usinas tem aumentado exponencialmente, como base comparativa, a maior usina do Brasil, a Itaipu Binacional, possui capacidade de 14.000 MW (CCEE, 2016).

As usinas hidroelétricas tradicionais são basicamente compostas por barragem, sistema de captação e adução de água, a casa de força e vertedouro, estruturas estas que funcionam de maneira integrada.

A barragem interrompe o curso normal do rio e forma o reservatório que, além de estocar água, permite a formação do desnível necessário para a energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e o controle de vazão dos rios. Do reservatório a água passa para os sistemas de captação e adução que a conduzem até a casa de força, onde o movimento da água gira as turbinas e convertem a energia cinética em energia elétrica por meio dos geradores de energia elétrica. Depois de passar pela turbina, a água retorna ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Já o vertedouro permite a saída da água sempre que os níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados (ANEEL, 2008).

O Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), desenvolvido pela Eletrobrás, tem o objetivo de armazenar e processar informações sobre estudos e projetos de usinas hidroelétricas. Estes estudos abrangem os estágios de inventário, viabilidade e projeto básico, o que permite identificar as restrições econômicas, ambientais e técnicas existentes, que muitas vezes reduzem o potencial inicialmente estimado (ELETROBRAS, 2015).

Segundo informações do SIPOT, o potencial hidrelétrico brasileiro total em dezembro de 2015 foi estimado em 247.465,01 MW de potência, sendo que deste valor, 13.949,32 MW encontram-se no estágio de construção e 94.125,39 MW estão em operação. O restante da potência representa estimativas de expansão conforme estudos de viabilidade. Sabe-se ainda que, considerando este potencial, mais de 70% está concentrado nas bacias do Amazonas e do Tocantins/Araguaia (ELETROBRAS, 2015).

Os problemas enfrentados pela hidroeletricidade estão ligados aos impactos ambientais em razão das grandes dimensões das áreas inundadas para construção dos reservatórios, o que tem levado a movimentos ambientalistas contra as grandes represas. Em razão disso, há uma tendência de fuga de investimentos na geração de energia hidroelétrica. Devido à alta demanda e potencial de geração hidrelétrica, a estratégia adotada por parte do governo é uma negociação para reduzir dimensões das áreas inundadas por futuras barragens no Brasil, como no caso de Belo Monte cujo projeto foi revisto pela Eletronorte reduzindo substancialmente a área atingida pelo reservatório (ROSA, 2007).

### 3.2.2. Termoelétrica

Apesar da matriz hidroelétrica ser a principal fonte de geração energética no Brasil, segundo dados do Balanço Energético Nacional (2015), existem diversos desafios associados aos conflitos pelo uso da água, especialmente em situações de escassez do recurso hídrico, como a que o Brasil enfrentou recentemente entre os anos de 2013 e 2015.

Como alternativa, o país utiliza a energia termoelétrica como complementação à sua principal fonte de geração. Isso ocorre quando há redução do potencial de geração hídrica, provocada pela carência de chuvas nas represas que abastecem as usinas hidroelétricas. Esta operação muitas vezes é questionada devido aos custos e impactos ambientais relacionados à geração termoelétrica, porém é um recurso disponível, e que ainda deve ser utilizado para manutenção da segurança no atendimento (TOLMASQUIM, 2016).

As usinas termoelétricas convencionais funcionam através de um processo que consiste em três etapas: a) Primeiramente, ocorre queima de um combustível fóssil, como carvão, óleo ou gás, a fim de gerar calor na caldeira para transformar a água em vapor. b) Em seguida, este vapor é utilizado, em alta pressão, para girar a turbina que, por sua vez, aciona o gerador elétrico. c) Finalmente, o vapor é condensado, transferindo o resíduo de sua energia térmica para um circuito de refrigeração, e a água retorna à caldeira, completando o ciclo (FURNAS, 2007).

Já as usinas de ciclo combinado utilizam um processo que combina a operação de uma turbina a gás, movida pela queima de gás natural ou óleo diesel, diretamente acoplada a um gerador, e os gases de escape da turbina a gás, devido às altas temperaturas, são utilizados para o acionamento de uma turbina a vapor, como ocorre em uma termoelétrica convencional (FURNAS, 2007).

Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG), o Brasil possui 2.923 usinas termoelétricas em operação, estas são responsáveis pela geração de 40.674.252 kW, o que

representa cerca de 27% da potência total instalada no país. Destas usinas, a maior parte funciona com ciclo combinado e opera utilizando a queima de óleo diesel como principal fonte de geração de calor, seguido do bagaço de cana-de-açúcar e gás natural (ANEEL, 2016).

O “IX Fórum Instituto Acende Brasil – O Papel das Termoelétricas na Matriz Elétrica Brasileira” discutiu quatro principais atributos da termoeletricidade que garantem a viabilização de novas usinas. Estes atributos são:

- Segurança no Suprimento: Usinas termoelétricas dependem apenas da disponibilidade de combustível para gerar eletricidade, o que as torna uma fonte de alta confiabilidade.
- Flexibilidade Operacional: Termoelétricas podem ser acionadas ou desligadas de maneira rápida e eficiente. Isto garante o atendimento às necessidades de energia e respostas imediatas às flutuações da demanda por eletricidade.
- Flexibilidade Locacional e de Fornecimento de Combustível: é possível construir termoelétricas próximas aos centros de carga e também em locais de difícil acesso, o que diminui o custo total do sistema elétrico com a redução dos investimentos bilionários em expansão da Rede Básica de transmissão para escoamento de energia. Além disto, algumas usinas permitem o uso de mais de uma fonte de energia para produzir calor.
- Complementariedade: Por não depender diretamente de condições climáticas, as termoelétricas são complementares às usinas hidroelétricas, eólicas e solares em situações de escassez de chuvas, ventos e de pouca insolação, reduzindo a vulnerabilidade de geração de energia às condições climáticas (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2014).

### 3.2.3. Energia Eólica

O interesse em projetos de energia eólica cresceu muito durante a segunda Guerra Mundial, devido à necessidade de economizar combustíveis para utilização em veículos de guerra. Entretanto, os baixos preços do petróleo, a expansão das usinas hidroelétricas e termoelétricas, e a expectativa de que a energia nuclear fosse uma fonte barata, freou o desenvolvimento da tecnologia de geração de energia eólica. Somente com a crise internacional do petróleo, na década de 1970, é que houve interesse em investimentos para o desenvolvimento e a aplicação de equipamentos com grande potencial eólico-elétrico e somente a partir da década de 1990 nota-se um crescimento da produção de energia eólica, com usinas de grande porte e produção comercial em consequência da criação de políticas ambientais mais rígidas (DUTRA 2008).

O vento, no sentido de força motriz, está associado à energia cinética presente nas massas de ar em movimento. As formas de aproveitamento dessa energia estão associadas à conversão da mesma em energia mecânica e elétrica. A radiação solar e a rotação da Terra influem diretamente na formação dos ventos que decorre do aquecimento desigual da superfície terrestre, tanto em escala global (diferentes latitudes, estações do ano e ciclo dia-noite), quanto local (mar-terra, montanha-vale). A diferença de temperatura e pressão determina as velocidades e direções das massas de ar que apresentam tendências sazonais e diurnas bem definidas (ROSA, 2007).

O vento pode variar no intervalo de horas ou dias, porém, tenderá a um regime diurno predominante, regido por influências locais e regionais. No intervalo de meses ou anos, os regimes de vento passam a apresentar uma regularidade. Ao longo de décadas, em geral, as velocidades médias anuais apresentam variações inferiores a 10% da média de longo prazo. Essa regularidade permite montar um perfil de ventos e determinar locais onde a energia eólica possui melhor eficiência, tornando-a ainda mais viável do modo de vista socioeconômico (AMARANTE; 2010).

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente e economicamente viável exige-se uma densidade maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$  a uma altura de 50 metros, o que demanda uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s. Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, esta velocidade média é atendida em apenas 13% da superfície terrestre. Essa proporção varia muito entre regiões e continentes (SOUZA et al. 2015).

O número de aereogeneradores depende da potência dos mesmos, geradores de alta potência permite uma significativa redução na quantidade instalada o que demonstra uma vantagem do ponto de vista econômico e ambiental. Porém, uma maior potência está associada a uma maior altura das torres e a um maior diâmetro das pás. Deste modo, o desenvolvimento de um projeto eólico, assim como qualquer outro grande empreendimento, está susceptível de gerar efeitos ambientais negativos que devem ser minimizados ou eliminados.

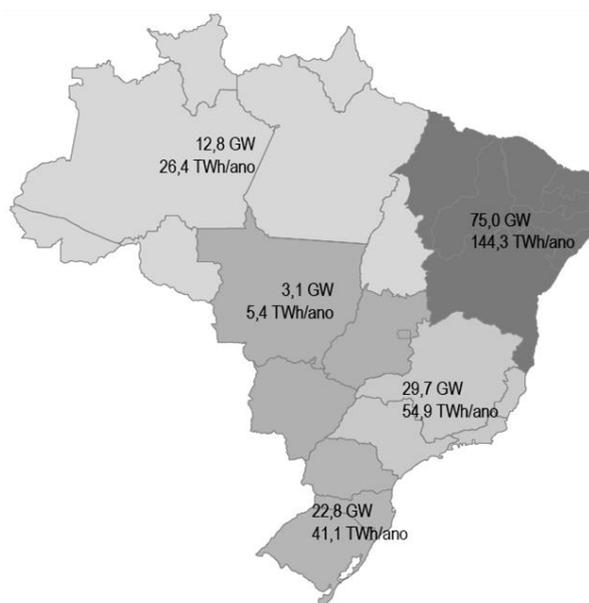
Os argumentos favoráveis à utilização da energia eólica são, além de ser uma fonte renovável, perene e de grande disponibilidade, o fato dela não produzir resíduos, possuir independência de importações e gerar custo zero para obtenção de suprimento (ao contrário do que ocorre com as fontes fósseis). O principal argumento contrário é o custo relacionado à obtenção de equipamentos de alta tecnologia e construção das usinas que, embora seja decrescente, ainda é elevado na comparação com outras fontes (UGGIONI, 2010).

Em 2001, o potencial de geração de energia eólica no Brasil foi estimado em 143 GW, baseado em medições com aereogeneradores de 50 m de altura. A Figura 3 mostra que as regiões

brasileiras com maior potencial medido são Nordeste, principalmente no litoral (75 GW); Sudeste, particularmente no Vale do Jequitinhonha (29,7 GW); e Sul (22,8 GW) (ANEEL, 2008).

Entretanto, o aumento da altura das torres eólicas comerciais tem influenciado no crescimento do potencial, pois possibilita alcançar maiores velocidades e melhor qualidade de vento, gerando maior potência instalada por unidade de área, sendo assim realizou-se a atualização do potencial eólico brasileiro, considerando torres mais altas (de mais de 120 m) e hoje se estima que esse potencial esteja próximo de 350 GW (ENERGIA EÓLICA, 2014).

Figura 3 - Potencial eólico brasileiro por região.



Fonte: ANEEL (2008).

Uma vez conhecidas as principais fontes geradoras de energia no Brasil, a fim de avaliar as emissões de Gases Efeito Estufa por fonte de Geração, os benefícios sociais associados à implementação de uma usina, bem como os custos de geração, foi realizada uma revisão bibliográfica dos dados de geração de energia elétrica na matriz brasileira conforme descrito na metodologia a seguir.

### 3.3. Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE)

Há evidências de que a intensificação do efeito estufa e suas consequentes mudanças climáticas, como o aumento de aproximadamente 0,7°C na temperatura média da superfície da Terra, estão relacionadas ao aumento da concentração de determinados gases na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Estes são os chamados Gases Efeito Estufa (GEE). A emissão destes gases pode ocorrer em decorrência de atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis nas atividades de transporte, geração de energia, indústria e agricultura, e outras atividades relacionadas a processos industriais, atividades agropecuárias, disposição de lixo e desmatamento (BRASIL, 2009).

#### 3.3.1. Metas de redução de emissões

Reconhecendo que as mudanças climáticas representam uma ameaça urgente e potencialmente irreversível, torna-se necessária uma ampla cooperação de todos os países numa resposta internacional eficaz visando acelerar a redução das emissões globais de gases de efeito estufa (ONU, 2015).

Neste âmbito a Conferência das Partes (COP) é o encontro anual entre os países membros da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (na sigla em inglês UNFCCC) que estabelece as linhas gerais das discussões entorno do tema e define protocolos com as diretrizes específicas no que diz respeito às ações de redução de emissão de GEE. Suas decisões, coletivas e consensuais, só podem ser tomadas se forem aceitas unanimemente pelas Partes, sendo soberanas e valendo para todos os países signatários (ONU, 2015) (BRASIL, 2016).

Como decisão junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas, em 2009 foi instituída no Brasil a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei no 12.187/2009) que diz respeito à uma Contribuição Nacionalmente Determinada o iNDC (*intended Nationally Determined Contribution*), que assume o compromisso voluntário em adotar ações de mitigação a fim de reduzir as emissões de GEE entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020, esta projeção estima a liberação de 3,236 Gt CO<sub>2e</sub> para a atmosfera, sendo assim, o país assume o compromisso de reduzir as emissões para valores entre 1,168 Gt CO<sub>2e</sub> e 1,259 Gt CO<sub>2e</sub>.(BRASIL, 2013).

“Parágrafo único. Decreto do Poder Executivo estabelecerá, em consonância com a Política Nacional sobre Mudança do Clima, os Planos setoriais de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas visando à consolidação de uma economia de baixo consumo de carbono, na geração e distribuição de energia elétrica, no transporte público urbano e nos sistemas modais de transporte interestadual de cargas e passageiros, na indústria de transformação e na de bens de consumo duráveis, nas indústrias químicas fina e de base, na indústria de papel e celulose, na mineração, na indústria da construção civil, nos serviços de saúde e na agropecuária, com vistas em atender metas gradativas de redução de emissões antrópicas quantificáveis e verificáveis, considerando as especificidades de cada setor, inclusive por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL e das Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas – NAMAs” (BRASIL,2009).

O Brasil enfrenta grandes dificuldades para atingir metas de redução de emissões de gases de efeito estufa uma vez que estas acontecem no contexto de um aumento contínuo da população e do PIB, bem como da renda *per capita*, cenário típico de um país com necessidade de desenvolvimento socioeconômico, e conseqüente elevado índice de emissões o que torna suas metas estabelecidas bastante ambiciosas. (BRASIL, 2013).

Na última conferência, ocorrida em novembro de 2015, a 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, em Paris, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima. Nesta conferência, o Brasil atualizou os compromissos com sua INDC com o propósito de alcançar o objetivo último da Convenção, comprometendo-se reduzir as emissões de gases de efeito estufa para 1,3 GtCO<sub>2e</sub> em 2025 e 1,2 GtCO<sub>2e</sub> em 2030, correspondendo, respectivamente, a reduções de 37% e 43%, com base no nível de emissões em 2005 de 2,1 GtCO<sub>2e</sub> (BRASIL,2015).

Como forma de atingir as metas pré-estabelecida, no setor da energia, o Brasil busca alcançar uma participação de cerca de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, através da expansão do uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar, além de alcançar 10% de ganhos de eficiência no setor elétrico até 2030 (BRASIL,2015).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é uma forma regulada pelos acordos de Marraqueche, estabelecidos em novembro de 2001, durante a Sétima Conferência das Partes (COP 7), que permite que projetos de países em desenvolvimento, como o Brasil, possam gerar Reduções Certificadas de Emissões (RCE's) que, conforme o Protocolo de Quioto podem ser negociadas no mercado como créditos de carbono, sendo parte importante para o cumprimento das metas de redução de emissões. Podem candidatar-se projetos relativos à implementação de energias renováveis como solar e eólica, a cogeração e o aproveitamento de biomassa, plantios florestais e reflorestamento (BRASIL, 2009).

### **3.4. Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE)**

#### **3.4.1. Fatores de emissão de Gases Efeito Estufa**

As estimativas de emissão de gases efeito estufa são de extrema importância para o desenvolvimento de estratégias de controle de emissões e de mitigação apropriadas, além de uma série de outras aplicações em diversos setores, incluindo esferas federais, estaduais, agências locais, consultores e indústria.

Dados obtidos em testes de emissão específicos da origem ou monitoramento de emissões contínuas são geralmente preferidos para estimar as emissões de uma fonte, devido à melhor representação. No entanto, dados de teste a partir de fontes individuais não estão sempre disponíveis e, mesmo assim, elas podem não refletir a variabilidade das emissões reais ao longo do tempo. Assim, os fatores de emissão são muitas vezes o melhor ou único método disponível para estimar as emissões, apesar de suas limitações (EHSO, 2013).

Os Fatores de Emissão (FE) podem ser definidos como valores representativos que estimam a quantidade de um determinado poluente liberado em função de uma atividade associada à liberação desse poluente. Eles podem ser expressos como uma taxa de fluxo de massa (kg/h), como a massa de poluente emitido pela quantidade de combustível queimado (kg/t) ou ainda pela massa de poluente emitido em termos de potência disponível e tempo de trabalho (g/kWh), o qual será utilizado neste trabalho (MEDEIROS, 2010).

#### **3.4.2. Emissões de GEE na produção de energia elétrica**

Considerando a análise de ciclo de vida de tecnologias de geração de energia, as emissões de gases de efeito estufa oriundas de fontes renováveis são usualmente menores comparadas às emissões provindas de tecnologias baseadas em combustíveis fósseis. As comparações mostram também que a proporção de emissões de GEE de cada estágio do ciclo de vida difere pela tecnologia utilizada.

Para as tecnologias de combustíveis fósseis, a queima de combustíveis durante a operação da instalação emite a grande maioria dos GEE, enquanto que a maioria das emissões da bioenergia é gerada durante a produção de matéria-prima, onde as práticas agrícolas desempenham um papel importante. Já para as tecnologias renováveis (solar, eólica, hidráulica, de oceano e geotérmica), a maioria das emissões do ciclo de vida de GEE decorre antes da etapa de operação, na fabricação de componentes e, em menor medida, na construção de instalações. Com exceção de grandes empreendimentos de geração hidráulica, que

demandam grandes áreas de alagamento, elevando as emissões devido à construção e manutenção dos reservatórios (NREL, 2016).

### **3.5. Custos da energia elétrica**

A tarifa de energia elétrica que chega ao consumidor é basicamente o preço cobrado por unidade de energia (R\$/kWh), o qual é composto por custos incorridos desde a geração, operação e expansão até a sua disponibilização aos consumidores, incluindo ainda sua disponibilidade contínua. Os custos citados estão diretamente relacionados aos componentes físicos do sistema, deve-se ainda considerar os encargos e impostos atrelados ao fornecimento de energia elétrica. Em resumo, a tarifa de energia elétrica para os consumidores é composta por:

- Custos de aquisição de energia elétrica: decorrentes da contratação de montantes de energia por meio dos leilões regulados.
- Custos relativos ao uso do sistema de distribuição e transmissão: inseridos na Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), como as despesas de capital e os custos de operação e manutenção das redes de distribuição.
- Perdas técnicas e não técnicas: As perdas técnicas são inerentes a qualquer circuito elétrico, já as perdas não técnicas são resultantes de furtos e problemas de medição.
- Encargos diversos e impostos: Os principais tributos da tarifa energética são o PIS/PASEP, COFINS e ICMS. Há ainda outros encargos que são contribuições instituídas por Lei, cujos valores são estabelecidos por resoluções ou despachos da ANEEL visando obter recursos e financiamentos para necessidades específicas do setor elétrico (ABRADEE, 2016).

#### **3.5.1. Iniciativas de compensação energética**

Em relação aos custos de geração, existem diversas iniciativas governamentais que buscam incentivar a expansão do mercado de compensação de energia elétrica, dentre elas, podemos citar a proposta de revisão da Resolução da ANEEL n° 482/2012, que trata das condições gerais de acesso da micro e da mini geração distribuída à rede de distribuição, e a revisão do Convênio SEFAZ sobre ICMS (principal tributo na produção/consumo de energia) cobrado no sistema de compensação. Tal revisão permite aos estados isenção na cobrança de

ICMS sobre a parcela de energia injetada, com o imposto incidindo apenas sobre a quantidade de energia fornecida pela distribuidora (PEREIRA, SD).

Tais iniciativas são um grande incentivo para investimentos no setor energético e, conseqüentemente, influenciam na diversificação das fontes de energia e expansão da potência de geração instalada.

### 3.5.2. Leilões regulados de geração e transmissão de energia

Os leilões regulados de geração e transmissão de energia são um marco para a nova legislação do Setor Elétrico Brasileiro, em vigor desde 2004. Tais leilões têm promovido a concorrência entre os agentes do setor e permitido maiores e mais diversos investimentos. Por conseguinte há uma redução de custos e prazos para construção de novas instalações de geração e transmissão, o que resulta em benefícios diretos ao consumidor por meio da regulação das tarifas (FERREIRA JR., 2009).

Nos leilões de energia são negociados contratos de suprimento de energia de longo prazo para investimentos em novas instalações que englobam as fases de construção, operação e manutenção das novas instalações de transmissão visando à contratação de empreendimentos que prestarem o serviço ao menor custo. Os leilões de energia também são empregados para a recontração de energia, o que proporciona maior flexibilidade para lidar com as variações de custos e do consumo de energia (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2012).

## **3.6. Projeções Futuras**

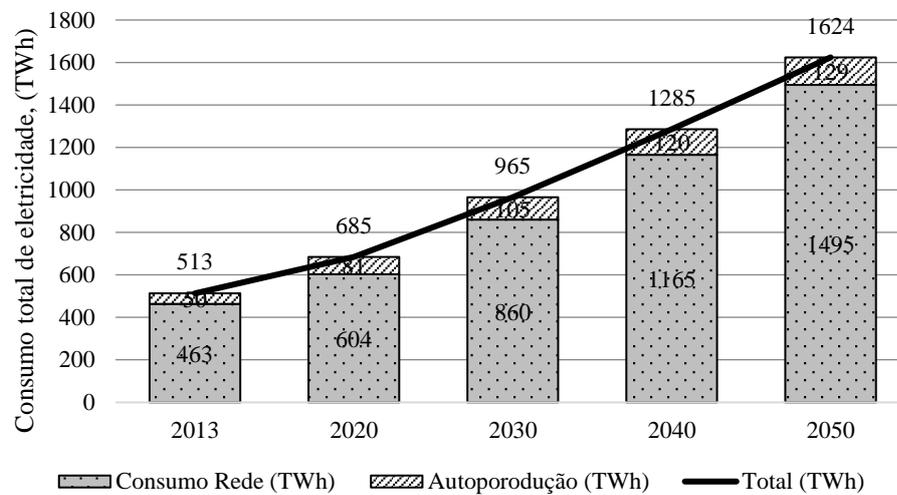
A elaboração de cenários futuros para demanda e suprimento de energia, constitui-se em uma tarefa complexa e multidisciplinar que depende de vários fatores como projeções demográficas, econômicas e setoriais, além de premissas relativas à eficiência energética e à autoprodução. No Brasil, este estudo de projeção de demanda por energia é realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), que tem como objetivo a prestação de serviços na área de estudos e pesquisas a fim de subsidiar o planejamento do setor energético (EPE, 2015).

Em 2014, a EPE publicou um estudo de demanda de energia, que compõe os estudos do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050). Neste documento são apresentadas as evoluções das demandas dos energéticos aderentes ao cenário econômico de longo prazo. Este estudo contempla complexas variáveis e considera variações de mercado e evolução tecnológicas, ele apresenta-se como uma resposta aos eventos que impactaram o setor energético, como, por

exemplo, as dificuldades de aproveitamento hidroelétrico e a crise hídrica, o aumento da competitividade obtido pela energia eólica, o evento de Fukushima e seu impacto no setor nuclear, o prolongamento da crise econômica mundial de 2008, a crescente preocupação com as mudanças climáticas, dentre outros (EPE, 2014).

Segundo este estudo, a parcela de autoprodução de energia elétrica cresce a uma taxa média de 2,6% ao ano, no período 2013-2050, enquanto que o consumo na rede, isto é, a demanda de eletricidade a ser atendida pelo Sistema Elétrico Nacional, aumenta 3,2% ao ano, a crescente demanda no setor elétrico pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 - Projeção do consumo total de eletricidade no Brasil no período de 2013 a 2050.



Fonte: EPE, 2014 adaptado pelo autor.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. Obtenção de dados de geração de energia elétrica**

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Dentre as atribuições do ONS, encontra-se a publicação dos resultados da operação do SIN, consolidados pela área de pós-operação, por meio de Boletins e Informes (ONS, 2016).

O SIN é responsável por cerca de 98% da energia requerida pelo país, somente não são considerados os pequenos sistemas isolados de geração de energia elétrica localizados principalmente na região amazônica, portanto, os dados de geração de energia elétrica fornecidos pelo ONS possuem expressiva representatividade da atual matriz energética brasileira (ONS, 2016)

Este trabalho considerou dados de geração de energia elétrica fornecidos pelo ONS no período de 2005 a 2015 e foram utilizados aqui para a avaliação das emissões de GEE, as quais podem ser diretamente calculadas a partir dos fatores de emissão e dados do histórico de geração de energia elétrica. Os fatores de emissão aqui aplicados foram obtidos de dados secundários.

### **4.2. Metodologia de Análise de Ciclo de Vida**

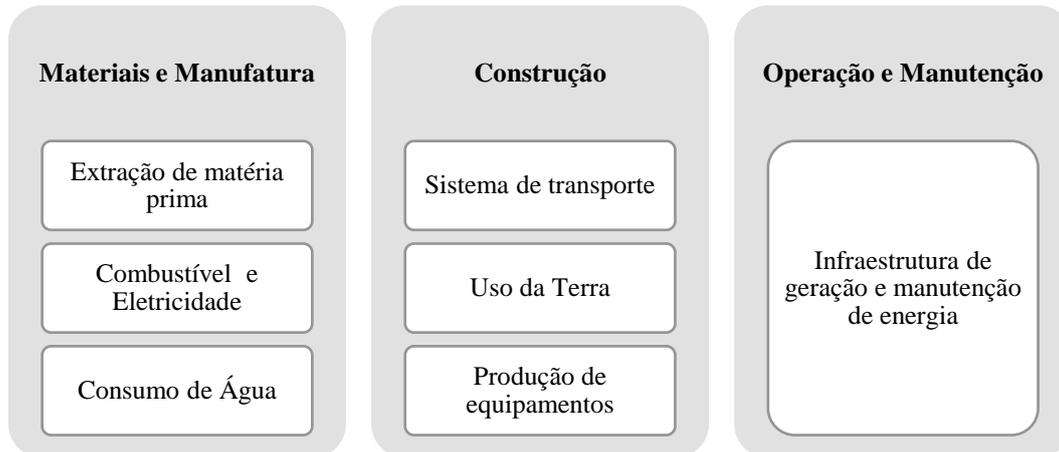
A metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) tem sua estrutura normalizada pela NBR ISO 14040:2006, a qual trata dos princípios gerais e das diretrizes direcionada para as quatro fases da ACV, as quais englobam a definição do objetivo e escopo; análise de inventário do ciclo de vida; avaliação de impactos ambientais e a interpretação dos resultados.

O objetivo definido foi realizar um estudo comparativo da geração de Gases Efeito Estufa (GEE) relacionada à produção de energia elétrica, custos e segurança de fornecimento de energia elétrica contrastando diferentes fontes de geração. Para isso, deve-se realizar a definição das fronteiras, que consiste na descrição do sistema de geração e da extensão do estudo, por meio do estabelecimento de suas fronteiras.

As fronteiras devem abordar toda a cadeia produtiva levando em consideração a complexidade e limitações do estudo. Quanto mais extensa a rede de análise, maior sua complexidade, por isso, as fronteiras do sistema devem ser constantemente refinadas, de forma a adaptar-se as limitações de disponibilidade de dados, leitura do *software* dentre outras.

Para este estudo, as emissões de GEE serão consideradas a partir das fronteiras pré-estabelecidas que englobem as fases de construção e operação das usinas geradoras de energia elétrica (Figura 5).

Figura 5 - Modelo da estrutura das fronteiras do sistema.



Fonte: Aden et al (2010) adaptado pelo autor.

Este estudo foi dividido em duas etapas, a primeira realiza a quantificação de emissões de CO<sub>2e</sub> envolvendo todas as etapas de ACV a partir dos estudos com os fatores de emissão fornecidos por Miranda (2012) e pelo MCTI, a segunda parte compreende um estudo de caso realizado com o auxílio de um *software* para análise de ciclo de vida, o qual analisou-se as quantificações de emissões e demais insumos na construção e operação Usina Binacional de Itaipu, considerando um horizonte de tempo de 100 anos.

As emissões quantificadas pelos fatores de emissão fornecidos pelo MCTI não englobam toda a fase de ACV, uma vez que os fatores para inventários consideram apenas a margem de operação, e os fatores de MDL consideram a combinação da margem de operação e em construção, o que não representa o ciclo de vida da geração de uma fonte específica, mas todas as emissões provenientes da matriz elétrica, o que dificulta a análise de cenários comparativos.

Nesta fase também é importante definir a unidade funcional, principalmente em estudos comparativos. Considerando as fronteiras pré-estabelecidas para este projeto, com objetivo de avaliar os potenciais impactos ambientais relacionados à geração de energia elétrica, a unidade funcional definida foi a geração de 1 GWh, sendo assim, os impactos ambientais serão comparados em termos de potencial de emissões de GEE (tonCO<sub>2e</sub>/GWh)

#### 4.2.1. Análise de Ciclo de vida auxiliada pelo Software Umberto

Este *software* foi desenvolvido pelo IfEU (Instituto de Pesquisa Ambiental e Energética da Universidade de Heidelberg) e pelo IfU (Instituto de Informática Ambiental da Universidade de Hamburgo). O programa permite uma análise de fluxo de materiais e energia que participam de um processo produtivo pré-estabelecido, através de suas redes de fluxo, tornando possível uma análise tanto de aspectos ambientais como de aspectos financeiros de todas as atividades componentes do sistema (DELGADO et al, 2007).

A utilização do *software* Umberto no estudo de caso permitiu estruturar os dados a partir da inserção em redes de fluxo, organizadas em projetos, cenários e períodos de forma que descrevam a realidade do processo de geração de energia hidroelétrica pela usina de Itaipu.

Para estruturar as redes de fluxo de materiais e energia, o *software* utiliza a metodologia de redes de Petri, compostas por lugares, transições e setas. É importante descrever as relações entre os dados levantados e suas quantidades de entrada e saída, todos os fluxos de entrada devem ter fluxos correspondentes de saída, mesmo que sejam decompostos em produtos diferentes, como por exemplo, resíduos e emissões de gases poluentes (DELGADO et al, 2007).

O *software* Umberto permitiu então gerar os balanços de forma a representar o que ocorre no processo, fornecendo um relatório de todos os materiais consumidos, fluxo de energia, geração de emissões em cada parte do processo.

### **4.3. Fatores de Emissão**

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) publica periodicamente dois fatores de emissão para a matriz elétrica brasileira.

O primeiro é o Fator de Emissão Médio que tem o objetivo de estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> associada a uma geração de energia elétrica determinada, calculando a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia e não somente aquelas que estejam funcionando na margem. Nesse sentido, ele deve ser usado quando o objetivo for quantificar as emissões da energia elétrica que está sendo gerada em determinado momento e é geralmente utilizado para inventários em geral, corporativos ou de outra natureza (MCTI, 2016).

O segundo fator de emissão utilizado é disponibilizado pelo MCTI para fins de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Este fator baseia-se na combinação do fator de emissão da margem de operação, que reflete a intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> da energia

que está sendo gerada, com o fator de emissão da margem de construção, que reflete a intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> das últimas usinas construídas.

A combinação do fator de emissão da margem de operação e da margem de construção é realizada a partir de uma média ponderada, na qual ambos recebem peso de 0,5 para o primeiro ano de implementação, seguindo a seguinte equação (CNI, 2012) (Equação 1).

$$FE_{MDL} = FE_{construção} \times Peso_1 + FE_{operação} \times Peso_2 \quad [1]$$

em que:

$FE_{MDL}$  = Fator de Emissão para Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

$FE_{construção}$  = Fator de emissão durante a fase de construção das usinas

$FE_{operação}$  = Fator de emissão durante a fase de operação das usinas

$Peso_1$  = Fator de ponderação para MDL

$Peso_2$  = Fator de ponderação para Fase de Construção

De forma comparativa, um terceiro fator de emissão, baseado em estudos de ACV da geração de energia elétrica foi utilizado. Miranda (2012) realizou estudos para a estimativa do fator de emissão de CO<sub>2</sub>, porém considerando estudos de ACV para cada fonte de geração. Desta forma, os fatores de emissão estimados levam em consideração as etapas de construção, geração e operação das usinas.

Para tal, aplicou-se uma revisão sistemática de literatura para a identificação de estudos de estimativa de emissões de GEE do ciclo de vida das tecnologias aplicadas na geração de energia elétrica na matriz brasileira, após tratamento estatístico dos dados e harmonização estudos de ACV com fronteiras igualmente definidas, obteve-se então um fator de emissão para cada fonte de geração e, conseqüentemente, para a matriz energética brasileira o qual é estimado a partir da Equação 2:

$$FE_{matriz} = \frac{\sum FE_i \times G_i}{G_{matriz}} \quad [2]$$

em que:

$FE_{matriz}$  = Fator de emissão de CO<sub>2e</sub> na matriz elétrica (g/KWh ou ton/GWh)

$FE_i$  = Fator de emissão por fonte geradora (g/KWh ou ton/GWh)

$G_i$  = Quantidade de energia gerada por fonte (KWh ou GWh)

$G_{matriz}$  = Quantidade de energia gerada na matriz elétrica.

Este estudo selecionou as fontes de interesse aqui estudadas (hidroelétrica, termoelétrica e eólica) e de maior representatividade na matriz elétrica e utilizando-se da equação 1, realizou-se então a atualização do fator de emissão da matriz elétrica brasileira no período de 2005 a 2015, de forma a permitir uma comparação entre os fatores de emissão publicados pelo MCTI e aquele que considera a ACV para produção de energia elétrica.

A fim de realizar estudos comparativos considerando-se ainda dois diferentes cenários para a matriz termoelétrica, o primeiro (Cenário A) considerou a expansão da matriz considerando o óleo diesel como fonte principal, utilizando apenas o fator de emissão referente a esta fonte combustível, o qual é estimado em 828,96 gCO<sub>2</sub>/KWh.

Já o segundo cenário (Cenário B) avaliou os benefícios da expansão do uso do gás natural e bagaço de cana-de-açúcar para as emissões de CO<sub>2e</sub>, a partir da combinação dos fatores de emissão destas três principais fontes utilizadas, que foi estimado a partir dos fatores de emissão individuais para cada fonte combustível e na análise da geração energética dos últimos 10 anos.

#### 4.3.1. Fator de emissão para hidroelétricas

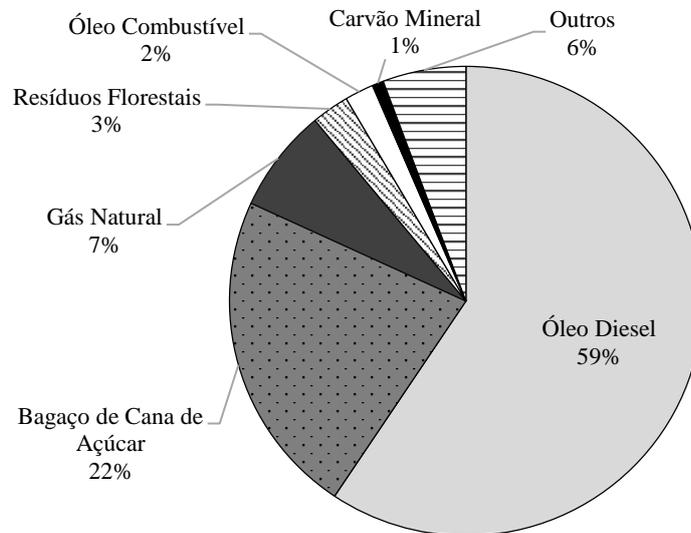
Para estimativa de emissão de CO<sub>2e</sub> na geração de energia hidroelétrica foi considerado o fator de emissão de 86,21 gCO<sub>2e</sub>/KWh (ou ton/GWh), estimado por Miranda (2012) considerando estudos de ACV que englobassem etapas de construção e geração e emissões de reservatórios, uma vez que estes possuem emissões significativas e caracterizam a fase de operação da usina.

Segundo Miranda (2012), há uma grande variação nos estudos de estimativa das emissões de reservatório, devido às variações em parâmetros como clima, quantidade e tipo de biomassa inundada, profundidade do reservatório e a relação entre a produção de energia e a área do reservatório. Esta elevada variação elevou consideravelmente o fator de emissão para a geração hidrelétrica. A hidroelétrica, a exemplo disso, pode-se citar estudos da empresa sueca Vattenfall, um dos únicos inventários de ciclo de vida para hidroelétricas completos que incluiu as emissões de reservatório, divulgados na literatura, que apresentaram um fator de emissão de 9,0 ton CO<sub>2e</sub>/GWh (MIRANDA, 2012) (VATTENFALL, 2012).

#### 4.3.2. Fator de emissão para termoelétricas

Miranda (2012) considerou diferentes fatores de emissão de acordo com as principais fontes de combustível adotadas na matriz termoelétrica brasileira (Figura 6).

Figura 6 - Principais fontes utilizadas para geração de calor nas usinas termoelétricas no Brasil.



Fonte: Adaptado de Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2016)

Diante disso, avaliou-se dois diferentes cenários para a matriz termoelétrica, o primeiro (Cenário A) considera a expansão da matriz utilizando óleo diesel como fonte principal cujo fator de emissão é estimado em 828,96 gCO<sub>2</sub>/KWh. Já o segundo cenário (Cenário B) considerou a combinação das três principais fontes utilizadas, o óleo diesel (combustível fóssil de baixo custo de obtenção), o bagaço de cana-de-açúcar (subproduto da produção etanol) e o gás natural (combustível fóssil não renovável composto por uma mistura de hidrocarbonetos) e os benefícios da expansão do uso das mesmas para as emissões de CO<sub>2e</sub>.

Para estimativa das emissões da geração termoelétrica por bagaço de cana-de-açúcar partiu-se do pressuposto de que toda a energia utilizada nestas usinas é gerada a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar; não havendo emissões por combustíveis fósseis. Os fluxos não associados ao uso de combustíveis fósseis são principalmente o óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) e o metano (CH<sub>4</sub>) que podem ocorrer na queima do bagaço em caldeiras. Entretanto estas emissões são muito pequenas quando comparadas com os fluxos de energia “convertidos” tradicionalmente, podendo aqui ser desconsideradas (GOLDEMBERG et al., 2004).

Assim, as emissões diretas de GEE estão associadas principalmente à liberação de CO<sub>2</sub> durante a queima do bagaço e fermentação do caldo de cana, que também podem ser desconsideradas na quantificação dos GEE, uma vez que o carbono liberado será reassimilado pela vegetação (cana-de-açúcar) durante o próximo cultivo (GARCIA & SPERLING, 2010).

Neste caso, estimou-se então o fator de emissão combinado para a geração termoelétrica a partir da equação 2, o qual se obteve um valor de 624,23 gCO<sub>2</sub>/KWh considerando os seguintes valores para os fatores de emissão (Tabela 1):

Tabela 1 - Fatores de emissão para Usinas Termoelétricas por diferentes fontes

Fonte de Geração	Fator de emissão
UTE Gás Natural	518,11 gCO <sub>2e</sub> /KWh
UTE Óleo Diesel	828,96 gCO <sub>2e</sub> /KWh
UTE Bagaço de Cana de açúcar	0 gCO <sub>2e</sub> /KWh

Fonte: MIRANDA (2012) adaptado pelo autor.

#### 4.3.3. Fator de emissão para usinas eólicas

Para estimativa das emissões de CO<sub>2e</sub> para as unidades eólica, o fator de emissão considerado baseou-se nos estudos de Miranda (2012) e foi igual a 16,15 gCO<sub>2e</sub>/KWh, o menor dentre as três fontes geradoras aqui analisadas. Para a estimativa deste valor considerou-se o tempo de vida útil de 20 anos e a ACV em três grandes fases:

- *Upstream* – que inclui extração de matéria-prima, manufatura e transporte de materiais, e construção da usina.
- Operação – Operação e manutenção da usina
- *Downstream* – Descomissionamento e Disposição de resíduos

Em suma, os fatores de emissão estimados para cada fonte geradora estão representados na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores de emissão de CO<sub>2e</sub> para cada tipo de fonte geradora

Fonte de Geração	Fator de emissão
Hidroelétricas	86,21 gCO <sub>2e</sub> /KWh
UTE Óleo Diesel	828,96 gCO <sub>2e</sub> /KWh
UTE Fontes combinadas	624,23 gCO <sub>2e</sub> /KWh
Eólicas	16,15 gCO <sub>2e</sub> /KWh

Fonte: MIRANDA (2012) adaptado pelo autor.

#### 4.4. Estimativas da emissão de CO<sub>2</sub>

Considerando então os fatores de emissão, as estimativas da emissão de CO<sub>2e</sub> são feitas conforme Equação 3.

$$Emissões\ de\ CO_2 = Fator\ de\ Emissão \times Produção\ Energia\ elétrica\ [3]$$

A emissão de GEE são expressas em função da unidade de CO<sub>2e</sub>. (dióxido de carbono equivalente) uma vez que as emissões energéticas diretas consideram as emissões de CO<sub>2</sub> bem como de metano (CH<sub>4</sub>), compostos voláteis orgânicos à exclusão do metano (NMVOC's), monóxido de carbono (CO) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que são convertidas em CO<sub>2e</sub>. pelo critério GWP (*Global Warming Power*), que utiliza um fator de ponderação para se chegar à unidade comum, o CO<sub>2e</sub>. Na Tabela 3 encontram-se os gases GEE e seus respectivos GWP's.

Tabela 3 - Fator de ponderação de GWP para conversão de GEE em CO<sub>2e</sub>.

Gás	Símbolo	GWP
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	28
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	265
Hidrofluorcarbonos	HFC-23	12400
	HFC-125	3170
	HFC-134a	1300
	HFC-143a	4800
	HFC-152a	138
Perfluorcarbonos	CF <sub>4</sub>	6630
	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	11100
Hexafluoreto de Enxofre	SF <sub>6</sub>	23500

Fonte: IPCC (2014).

Considerando os fatores de emissão buscou-se avaliar as emissões de GEE das principais fontes geradoras de eletricidade no Brasil nos últimos anos, e realizar uma projeção de emissões conforme as demandas futuras, demonstrando a importância dos estudos de análise ciclo de vida na previsão de impactos ambientais, como a emissão de GEE.

#### 4.5. Custo de geração de energia elétrica

Este estudo tem como objetivo utilizar o método de Análise do Ciclo de Vida baseado nas diretrizes contidas na NBR ISO 14.040:2006 para realizar um estudo relacionado à geração de energia elétrica, portanto, dentre os custos que compõem a tarifa energética, o de maior interesse aqui está relacionado aos leilões de aquisição, pois representam as fronteiras do sistema adotadas, que englobam a produção e a geração, ignorando assim as etapas de transmissão e distribuição para simplificação das análises.

O custo de geração de energia elétrica pode então ser estimado conforme o preço de aquisição de energia dos leilões de energia. Neste trabalho, realizou-se uma análise dos preços de aquisição de energia elétrica em leilões nos últimos 10 anos.

Para melhor visualização na variação dos custos, utilizou-se modelos de regressão os quais representam melhor ajuste de curva para os custos da energia leiloados no período de 2005 a 2015, e com base nos dados dos resultados destes leilões disponibilizados pela ANEEL, estimou-se a média do custo de geração por MWh (R\$/MWh) para as três tecnologias de geração aqui avaliadas.

#### **4.6. Projeções Futuras**

##### **4.6.1. Projeção de demanda por energia elétrica**

As projeções de demanda por energia elétrica foram obtidas no estudo por demanda de energia publicada pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em 2014, que compõe os estudos do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050). Neste documento são apresentadas as evoluções das demandas dos energéticos aderentes ao cenário econômico até o ano de 2050.

##### **4.6.2. Cenários de projeção das emissões de GEE**

Considerando dados de geração dos últimos anos, juntamente com estimativas de consumo projetadas pelo PNE 2050, realizou-se a projeção futura das emissões de GEE baseando-se em quatro cenários:

**Cenário de projeção 1A:** Considera a tendência de queda apresentada nos últimos anos na geração de energia por fonte hidroelétrica acompanhada da tendência atual de crescimento da geração de energia eólica, mantendo a energia termoelétrica movida basicamente a óleo diesel como fonte complementar de atendimento à demanda.

**Cenário de projeção 1B:** Considera a tendência de queda apresentada nos últimos anos na geração de energia por fonte hidroelétrica acompanhada da tendência atual de crescimento da geração de energia eólica, mantendo a energia termoelétrica como fonte complementar de atendimento à demanda, porém com variação nas fontes combustíveis, introduzindo o gás natural e bagaço de cana na matriz termoelétrica como forma de avaliar a redução nas emissões de CO<sub>2</sub>.

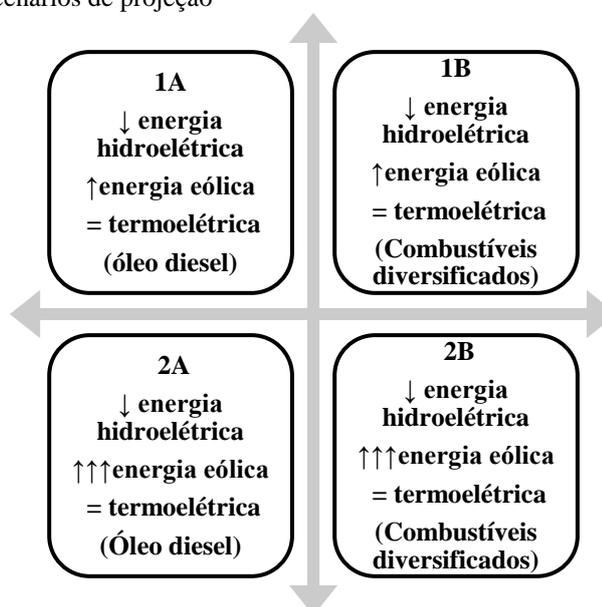
**Cenário de projeção 2A:** Considera a tendência de queda apresentada nos últimos anos na geração de energia por fonte hidroelétrica, mantendo a energia termoelétrica movida basicamente a óleo diesel como fonte complementar de atendimento à demanda, porém

acompanhada da tendência de crescimento da geração de energia eólica chegando a cerca até 30% de seu potencial estimado de geração até 2050.

**Cenário de projeção 2B:** Considera a tendência de queda apresentada nos últimos anos na geração de energia por fonte hidroelétrica acompanhada da tendência de crescimento da geração de energia eólica chegando a cerca de 30% de seu potencial estimado de geração até 2050, mantendo a energia termoelétrica como fonte complementar de atendimento à demanda, porém com variação nas fontes combustíveis, introduzindo o gás natural e bagaço de cana na matriz termoelétrica como forma de avaliar a redução nas emissões de CO<sub>2</sub>.

A caracterização dos cenários pode ser melhor visualizada na Figura 7.

Figura 7: Caracterização dos cenários de projeção



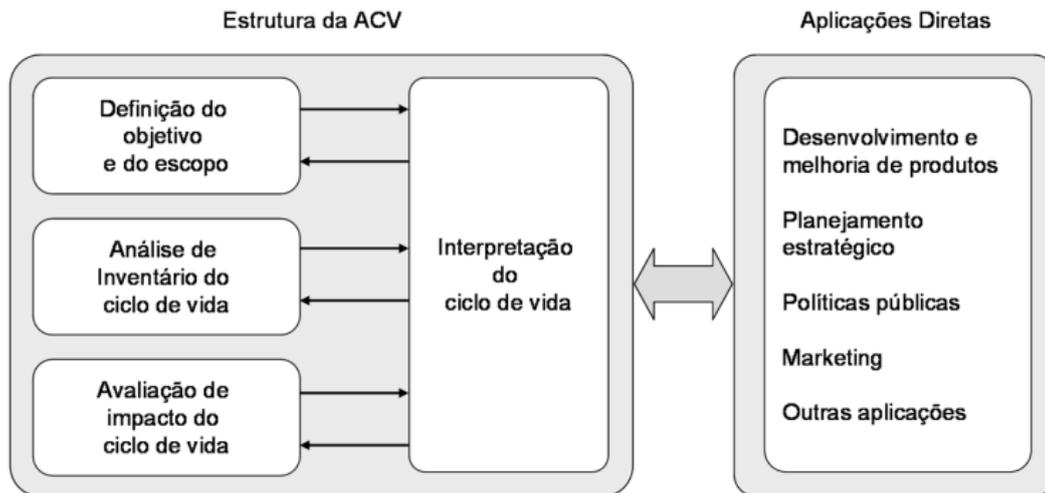
Fonte: Lourenço (2016).

#### 4.7. Metodologia do estudo de caso

Na segunda parte deste trabalho, desenvolveu-se um estudo de caso de análise de ciclo de vida para a usina hidrelétrica binacional de Itaipu, a fim de mostrar a aplicabilidade e importância de estudos de ACV no setor elétrico.

Para realização deste estudo utilizou-se a metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV), que tem sua estrutura normalizada pela NBR ISO 14040:2006, a qual trata dos princípios gerais e das diretrizes direcionada para as quatro fases da ACV, as quais englobam a definição do objetivo e escopo; análise de inventário do ciclo de vida; avaliação de impactos ambientais e a interpretação dos resultados. Estas etapas podem ser melhor visualizadas no esquema a seguir (Figura 8).

Figura 8 - Esquema sobre a estrutura de uma Análise de Ciclo de Vida.

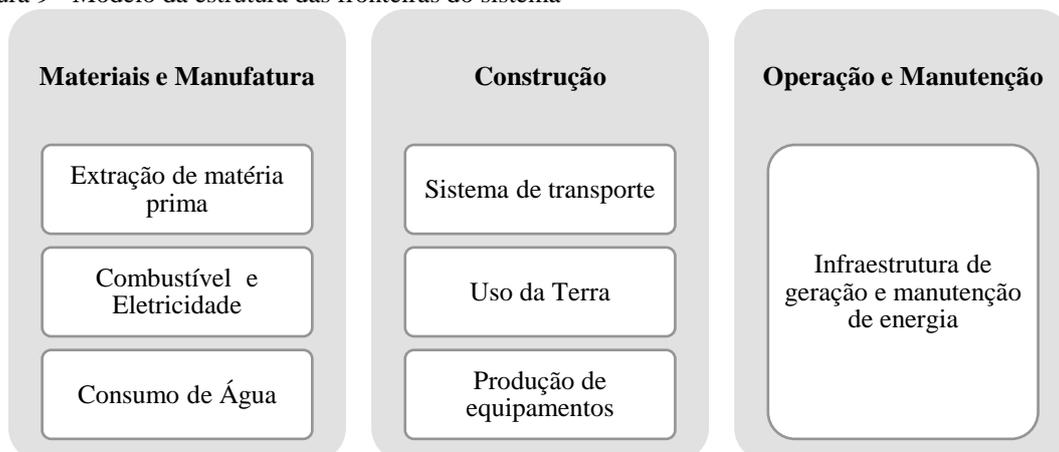


Fonte: ABNT NBR ISO 14040:2006

#### 4.7.1. Definição do objetivo e do escopo

Esta etapa consiste na descrição do sistema de produto e a extensão do estudo, por meio do estabelecimento de suas fronteiras. As fronteiras devem abordar toda a cadeia produtiva levando em consideração a complexidade e limitações do estudo. Quanto mais extensa a rede de análise, maior sua complexidade, por isso, as fronteiras do sistema devem ser constantemente refinadas, de forma a adaptar-se as limitações de disponibilidade de dados, leitura do *software*, dentre outras. Para este estudo, as fronteiras pré-estabelecidas englobam a fase de construção e operação da usina hidroelétrica de Itaipu (Figura 9).

Figura 9 - Modelo da estrutura das fronteiras do sistema



Fonte: Aden et al (2010) adaptado pelo autor

Nesta fase também é importante definir a unidade funcional, principalmente em estudos comparativos de diferentes produtos, de forma a quantificar o sistema e permitir a

determinação de fluxos de referência. Considerando as fronteiras pré-estabelecidas para este projeto, com objetivo de avaliar os potenciais impactos ambientais relacionados à geração de energia elétrica, a unidade funcional definida foi a geração de 1 GWh, sendo assim, os impactos ambientais serão comparados em termos de potencial de emissões de gases efeito estufa (GEE) ( $\text{kgCO}_2\text{/GWh}$ ), uso da terra ( $\text{km}^2\text{/GWh}$ ), insumo de matéria-prima ( $\text{kg/GWh}$ ) e uso da água ( $\text{kg/GWh}$ )

#### 4.7.2. **Análise de inventário**

A fase de inventário auxilia na avaliação quantitativa de impactos ambientais. Engloba a coleta e compilação de dados e quantificação de fluxos de entrada e saída de matéria e energia para um determinado sistema de produto.

##### 4.7.2.1. *Coleta e Análise de dados*

Durante esta etapa foi realizado um levantamento de dados secundários, considerando o inventário de dados para a Usina de Itaipu realizado por Ribeiro et al (2003) o qual apresenta dados detalhados de todos os insumos utilizados na construção e operação da Usina Binacional de Itaipu. Os dados coletados foram organizados em um relatório de dados inventariados (ANEXO B), considerando as fronteiras estabelecidas, e contendo a descrição da tecnologia avaliada, e informações acerca dos dados de consumo de matéria-prima, uso da terra, emissões de gases, entre outros.

Para a compilação de dados e análise dos resultados, foi utilizado como forma de apoio o *software* Umberto 5.5. Todos os dados foram adaptados à unidade funcional previamente estabelecida (1 GWh) para que sejam inseridos no banco de dados do *software* e sejam trabalhados com coerência. Foram considerados apenas os insumos de maior significância, levando em consideração a complexidade e limitações do estudo.

##### 4.7.2.2. *Estimativa de geração para 100 anos*

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, em inglês) recomenda um intervalo de 100 anos como um horizonte temporal para a comparação das emissões de gases de efeito estufa, este período foi então adotado para o Inventário de Dados de Itaipu fornecido por Ribeiro (2003) e conseqüentemente para a ACV. Além disso, sabe-se que as usinas hidrelétricas têm sua vida útil determinada pela qualidade de sua manutenção, podendo operar por períodos muito longos.

A estimativa de geração para os 100 anos de operação considerou que a Usina de Itaipu possui 20 unidades geradoras, sendo que duas destas são unidades adicionais instaladas para permitir maior flexibilidade na operação e manutenção da usina. Portanto, obteve-se uma

média de geração no período entre 1992, quando Itaipu acionou as 18 principais unidades geradoras, até o período atual.

A geração média anual foi estimada em 85.503,25 GWh/ano e a estimativa para os 100 anos de operação é de 8.212.415,25 GWh, considerando que nos primeiros 30 anos, segundo Itaipu (2016) foram produzidos 2.312.691GWh.

#### *4.7.2.3. Estimativas de emissões em reservatórios*

Em 2002 foi realizado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) um estudo referente às emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros. Neste estudo foram realizadas medições em pontos específicos dos reservatórios seguido por uma estimativa de um valor extrapolado para as emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> no período de um ano e por área do reservatório. Segundo estas, o reservatório de Itaipu possui os seguintes valores de emissão de GEE (Brasil, 2002):

- Emissão de CO<sub>2</sub>: 171 kg CO<sub>2</sub>/ km<sup>2</sup>/ dia
- Emissão de CH<sub>4</sub>: 20,8 kg CH<sub>4</sub>/ km<sup>2</sup>/ dia

Cabe dizer que nos estudos realizados pela COPPE utilizou medições pontuais, não sendo possível uma análise temporal da variação das emissões. Desta forma, tomou-se a emissão anual de gases, admitida como o produto das emissões diárias por 365 dias/ano.

#### 4.7.3. Avaliação de Impactos Ambientais

Os impactos ambientais como potencial de emissões de gases efeito estufa (GEE) (kg CO<sub>2e</sub>), demanda de energia (MJ), uso da terra (km<sup>2</sup>), uso da água (kg) foram quantificados em função da unidade funcional estabelecida (geração de 1GWh de energia elétrica).

Uma vez quantificados os impactos, a avaliação de impacto do ciclo de vida permite avaliar a significância de aspectos ambientais e o potencial sustentável do processo analisado a partir da identificação das etapas de maior potencial poluidor e pontos onde se podem aplicar medidas mitigadoras e otimização de processos.

#### 4.7.4. Interpretação

Esta quarta fase da ACV consistiu na avaliação do estudo, de acordo com os objetivos estabelecidos, ou seja, na análise dos resultados e na formulação de conclusões e recomendações para a minimização de impactos ambientais potencialmente gerados pelo sistema.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) na matriz energética

Todos os sistemas geradores de energia elétrica emitem os chamados Gases de Efeito Estufa (GEE) que, conseqüentemente, contribuem para as alterações climáticas antropogênicas.

Diante disso existem diversas dificuldades acerca do cálculo preciso das emissões por quilowatt-hora (kWh), podendo este ser auxiliado pelo conhecimento do ciclo de vida da geração de energia elétrica. Tais estudos podem fornecer informações durante qual fase do ciclo de vida as emissões significativas ocorrem e, por conseguinte, podem se tornar um importante indicador para as estratégias de mitigação das emissões de GEE no setor de energia indicando em quais áreas devem-se concentrar os esforços para maior eficiência na redução de emissões de GEE (WEISSER, 2007).

Em geral, as estimativas de emissões de GEE para geração de energia elétrica são realizadas através de fatores de emissão expressos em massa de poluente emitido em termos de potência disponível e tempo de trabalho (g/kWh ou ton/GWh). A seguir serão discutidas as estimativas das emissões de GEE de acordo com diferentes fatores de emissão.

#### 5.1.1. Fatores de emissão utilizados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI)

O fator médio de emissão de CO<sub>2</sub> para inventários de gases de efeito estufa tem como objetivo estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> associada ao sistema de geração de eletricidade. Ele é calculado pela média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia. O fator de emissão fornecido pelo MCTI não há discriminação da fonte de energia, portanto é representativo somente para a matriz elétrica como um todo.

Em contrapartida, o fator de emissão utilizado para fins de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é baseado na combinação do fator de emissão da margem de operação e da margem de construção. Os dados fornecidos pelo MCTI para os períodos de 2006 a 2015 são apresentados na

Tabela 4

Tabela 4 - Fatores de emissão fornecidos pelo MCTI no período de 2006 a 2015 para a matriz energética.

<b>Ano</b>	<b>FE Combinado MDL (tCO<sub>2</sub>/GWh)</b>	<b>F.E. Inventários (tCO<sub>2</sub>/GWh)</b>	<b>Δ%</b>
<b>2006</b>	202,31	32,30	84%
<b>2007</b>	184,20	29,30	84%
<b>2008</b>	311,19	48,40	84%
<b>2009</b>	163,48	24,60	85%
<b>2010</b>	309,53	51,20	83%
<b>2011</b>	198,78	29,20	85%
<b>2012</b>	359,31	65,30	82%
<b>2013</b>	432,25	96,00	78%
<b>2014</b>	439,98	135,50	69%
<b>2015</b>	406,65	124,40	69%

Fonte Adaptado de MCTI (2016).

Nota-se que no período de 2012 a 2015 há uma redução na variação percentual entre os fatores de emissão para inventários e MDL, isso se deve ao fato de um maior incremento na margem de operação em relação à margem de construção. Além disso, neste período, o país passou por situações de escassez hídrica, o que levou o setor energético a recorrer a geração termoelétrica para suprimento da demanda, elevando consideravelmente o fator de emissão para a margem de operação, uma vez que estas usinas possuem maiores emissões de GEE quando comparadas às fontes renováveis.

A fim de melhor comparar as emissões de GEE conforme a fonte de geração buscou-se então avaliar as emissões a partir do fator de emissão de gases efeito estufa por análise de ciclo de vida.

#### 5.1.2. Fator de Emissão de Gases Efeito Estufa por Análise de Ciclo de Vida

Miranda (2012) realizou estudos para as estimativas do fator de emissão de CO<sub>2e</sub> para diversas fontes de geração considerando estudos de ACV, adotando como fronteiras de análise as etapas de construção, geração e operação das usinas. Com os fatores disponibilizados para cada tecnologia de geração, foi possível então estimar o fator de geração da matriz energética e as emissões de GEE relacionadas à cada fonte.

Os fatores disponibilizados pela metodologia de Miranda (2012) foram 518,11 gCO<sub>2e</sub>/KWh para usinas termoelétricas (UTE) a gás natural e 828,96gCO<sub>2e</sub>/KWh para UTE's a óleo diesel. Para UTE's que utilizam o bagaço de cana-de-açúcar, considerou-se que o fator de emissão fosse zero, uma vez que o carbono liberado será reabsorvido pela vegetação (cana-de-açúcar) durante o próximo cultivo. Sendo assim, tal estimativa resultou em um fator

combinado para a matriz termoelétrica de 624,83 gCO<sub>2e</sub>/KWh, o que representa uma redução de aproximadamente 25% no fator de emissão na matriz termoelétrica quando inclui-se o uso de bagaço de cana.

#### 5.1.2.1. Comparação do fator de emissão da matriz elétrica para os Cenários A e B

Em análise aos fatores de emissão estimados para a matriz elétrica brasileira a partir da equação 2, nota-se que o cenário B apresenta fatores de emissão menores, devido à inserção de fontes combustíveis alternativas na geração termoelétrica, que resultou em uma redução de cerca de 25% no fator de emissão para esta fonte de geração.

Por conseguinte, houve uma redução no fator de emissão da matriz elétrica como um todo, como pode ser visto na redução percentual exposta na Tabela 5. Nota-se ainda que esta redução percentual entre os cenários A e B torna-se mais expressiva no período entre 2012 e 2015.

Tabela 5 - Comparação dos fatores de emissão para os cenários A e B

<b>Ano</b>	<b>F.E. Matriz energética Cenário A</b>	<b>F.E. Matriz energética Cenário B</b>	<b>Variação Δ%</b>
<b>2005</b>	121,92	111,53	9%
<b>2006</b>	119,36	109,48	9%
<b>2007</b>	115,90	107,15	8%
<b>2008</b>	144,05	127,42	13%
<b>2009</b>	111,35	103,84	7%
<b>2010</b>	142,21	126,10	13%
<b>2011</b>	122,91	112,12	10%
<b>2012</b>	160,43	139,20	15%
<b>2013</b>	214,73	178,61	20%
<b>2014</b>	252,24	205,60	23%
<b>2015</b>	249,04	202,94	23%

Fonte: Lourenço (2016).

Como discutido anteriormente, a partir de 2012, o Brasil passou por um período de escassez hídrica e conseqüente redução na geração hidroelétrica. A fim de preservar o nível dos reservatórios com a falta de chuva, o governo acabou privilegiando o uso de termoelétricas.

Neste sentido deve-se destacar a atuação das usinas de cogeração de energia utilizando o bagaço de cana-de-açúcar que apresentaram uma expressiva expansão neste período. Isto se

deve ao fato de que a safra da cana coincide com o período de seca dos reservatórios das usinas hidroelétricas o que eleva o caráter complementar de geração da cogeração. Além disto, houve ainda novas iniciativas governamentais para incentivar a expansão do mercado de compensação de energia elétrica, como a isenção na cobrança de ICMS sobre a parcela de energia injetada na rede, com o imposto incidindo apenas sobre a quantidade de energia fornecida pela distribuidora, o que foi um grande incentivo para o setor sucroenergético investir na cogeração por bagaço de cana-de-açúcar (ZANCANER, 2013) (PEREIRA, SD).

Entretanto, nota-se ainda uma tendência ascendente em ambos os cenários, o que pode ser relacionado à crescente demanda por energia elétrica com a expressiva participação das termoelétricas a óleo diesel como fonte complementar e atendimento emergencial à esta demanda.

A partir de tal redução no fator de emissão de GEE com a diversificação da matriz termoelétrica, pode-se inferir que investir em cogeração e em fontes combustíveis alternativas faz-se necessário para melhorar a segurança do sistema elétrico e aumentar a participação de energias renováveis na matriz, minimizando as consequências do efeito estufa.

## 5.2. Comparação dos fatores de emissão considerando ACV

Quando a análise de ciclo de vida é desconsiderada no cálculo do fator de emissão, e leva-se em conta apenas as emissões à margem de operação, como no caso dos valores fornecidos pelo MCTI para inventários, há uma redução média no fator de emissão de cerca de 65% para o cenário A e 59% para o cenário B, como pode ser observado na Tabela 6 o que evidencia a importância da inclusão de estudos de ACV durante o planejamento da expansão do setor, de forma a englobar melhor os impactos ambientais associados à esta expansão, evitando, assim, subestimar as emissões de GEE no processo de geração de energia.

Tabela 6 - Variação média entre os fatores de emissão considerando ACV.

$\Delta\%$ Entre fatores de emissão		F.E. Matriz Cenário A	F.E. Matriz Cenário B
$\Delta\%$ Média	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	14%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-12%	0%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-65%	-59%
	FE Combinado MDL	86%	111%

Fonte: Lourenço (2016).

Nota-se ainda que esta variação média dos fatores obtidos por estudos de ACV em relação aos fatores de emissão para fins de MDL é ainda maior. Isso se deve ao fato de que as estimativas do fator de emissão para a matriz por ACV considerou os fatores de emissão por fonte e os dados de geração considerando a margem de operação, conforme metodologia descrita anteriormente na equação [1], enquanto, os fatores de MDL consideram a margem de construção atual que se encontra em expansão, elevando consideravelmente o fator de emissão.

A variação média dos fatores de emissão foi obtida a partir da variação anual para o período de 2006 a 2015, os quais possuem dados disponíveis de geração e fatores de emissão do MCTI, que pode ser visto no ANEXO A.

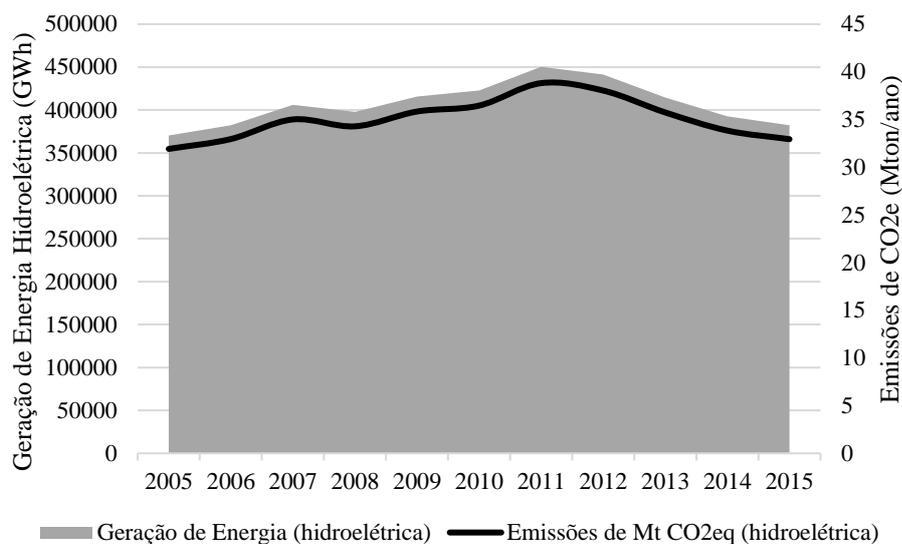
Uma vez que os estudos de análise de vida são específicos ao processo de produção, podem-se estimar valores de emissão segregados para cada fonte geradora de energia. A seguir serão analisadas as emissões de cada uma das fontes geradoras (hidroelétrica, termoelétrica e eólica).

### **5.3. Estimativa das emissões de GEE por fonte**

#### **5.3.1. Emissões provenientes da geração Hidroelétrica**

A fim de avaliar as emissões de CO<sub>2e</sub> provenientes da geração hidroelétrica no Brasil, considerou-se então dados de geração dos últimos 10 anos. A partir dos resultados expressos na Figura 10, nota-se que as emissões são diretamente proporcionais à geração, uma vez que o fator de emissão atua de forma linear.

Figura 10 - Emissões de CO<sub>2</sub>e e Geração de energia hidroelétrica no período de 2005 a 2015



Fonte: Lourenço (2016).

No período de 2005 a 2011 nota-se um crescimento na geração de energia hidroelétrica, isso se deve ao fato de que o país vinha se recuperando de uma crise no setor energético. No ano de 2001, o Brasil sofreu com a Crise do Apagão, entre as causas da mesma está a falta de chuvas suficientes para abastecimento dos reservatórios das usinas hidroelétricas e problemas estruturais associados ao processo de privatização do setor elétrico o que resultou em uma oferta de energia não suficiente para suprir a demanda de consumo. A partir de 2003 foi iniciado um processo de reestruturação do setor, no qual o governo buscou construir novas bases para um modelo de parceria público-privado e com aprimoramentos da regulação do setor (GOMES, 2007).

Após significativa recuperação do setor, em 2012, iniciou-se um período de redução na geração hidroelétrica e, conseqüentemente, em suas emissões de GEE, em razão do governo ter privilegiado o uso de termoelétricas, para preservar o nível dos reservatórios desde o final de 2012 com a falta de chuvas (MIRANDA, 2016).

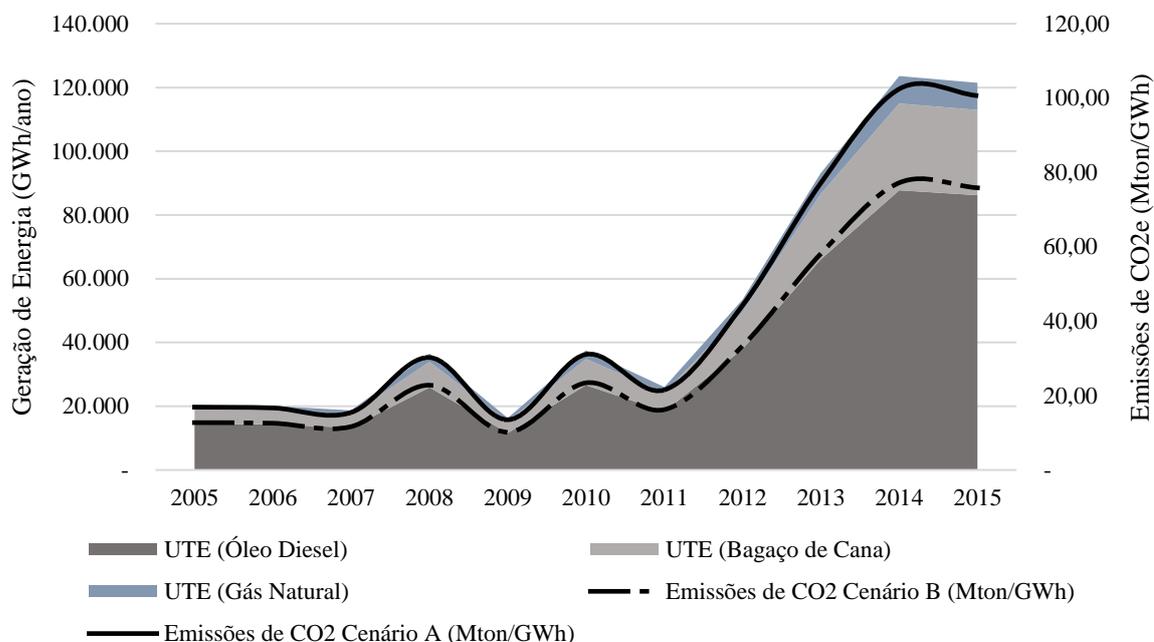
### 5.3.2. Emissões provenientes da geração Termoelétrica

As termoelétricas possuem um papel significativo na geração de energia elétrica no Brasil, uma vez que são as maiores responsáveis por complementar o déficit de energia das hidroelétricas, quando estas passam por momentos de baixa de produção, como em períodos de estiagens (LIMA & SOUZA, 2014).

O crescimento na geração termoelétrica como forma complementar a hidroelétrica pode ser observado na Figura 11. Conforme exposto anteriormente, a partir de 2012, iniciou-

se um período de redução na geração hidroelétrica e, conseqüentemente, em razão do governo ter privilegiado o uso de termoelétricas como forma de suprir a demanda energética, nota-se um crescimento exponencial da geração termoelétrica. Como resultado, observa-se aumento das emissões de GEE no período de 2012 a 2015.

Figura 11 - Emissões de CO<sub>2</sub>e e Geração de energia termoelétrica no período de 2005 a 2015 (cenários A e B).



Fonte: Lourenço (2016).

A Figura 11 representa ambos os cenários considerados, no cenário A, o total de emissões foi estimado com base na hipótese de que toda a geração termoelétrica fosse baseada no óleo diesel como fonte combustível, enquanto que no cenário B, a hipótese considerou o percentual de demais fontes combustíveis na matriz termoelétrica (gás natural e bagaço de cana-de-açúcar). Quando se considera o cenário composto da matriz termoelétrica (Cenário B), há uma redução de cerca de 14% nas emissões de CO<sub>2</sub>e, o que mais uma vez evidencia a importância da inclusão de fontes alternativas de combustível na matriz termoelétrica.

### 5.3.3. Emissões provenientes da geração Eólica

No início da década de 2000, com a crise do setor energético houve também um incentivo adicional ao desenvolvimento das energias renováveis, entre elas, a energia eólica. Em 2004, foi instituído o novo marco regulatório do setor elétrico com objetivo de garantir a segurança de suprimento de energia elétrica a partir de uma contratação eficiente de energia. Para tanto, foi instaurado um novo regime de comercialização de energia, o qual criou um ambiente

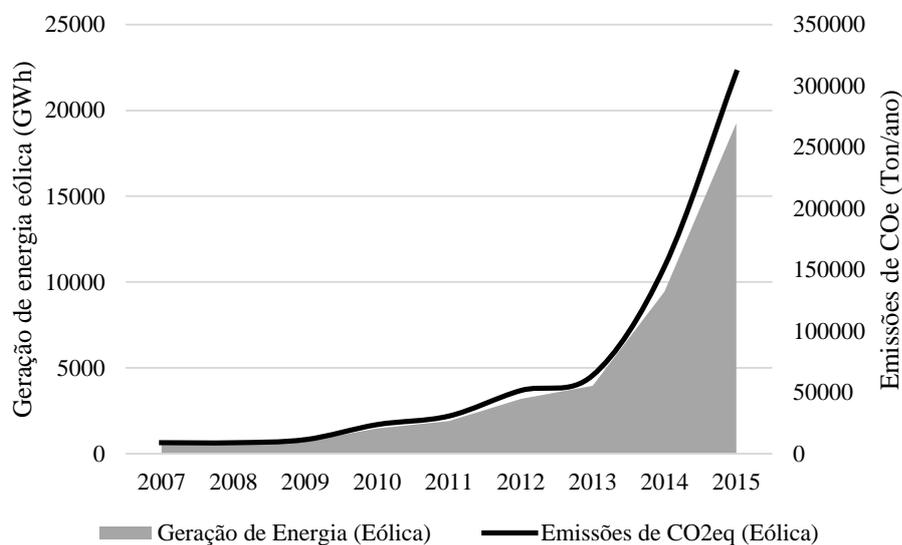
regulado composto por leilões e processos de licitação por menor tarifa (GAVINO, 2009) (FERREIRA JR., 2009).

O setor eólico então passou a se desenvolver com as mudanças do Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) para o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) juntamente com o novo regime de leilões que reduziu incertezas do investidor quanto ao retorno de remuneração do seu projeto (GAVINO, 2009).

Como forma de incentivo ao crescimento do setor o Decreto nº 6.048 de 2007 criou o Leilão de Fontes Alternativas, que permitiu o aumento da capacidade eólica instalada. Os leilões ocorridos em 2009 e 2010 deram grande destaque para o setor eólico com previsão do início da operação das primeiras plantas contratadas em 2012. (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2012) (GAVINO, 2009).

Como se pode observar na Figura 12, os reflexos dos processos de regulamentação do setor elétrico na geração de energia eólica começaram a aparecer nas estatísticas somente a partir de 2012, quando as primeiras plantas contratadas entraram em operação, desde então, nota-se maiores investimentos no setor e, conseqüentemente, um crescimento exponencial no potencial de geração.

Figura 12 - Emissões de CO<sub>2</sub>e e Geração de energia eólica no período de 2007 a 2015 <sup>2</sup>



Fonte: Lourenço (2016).

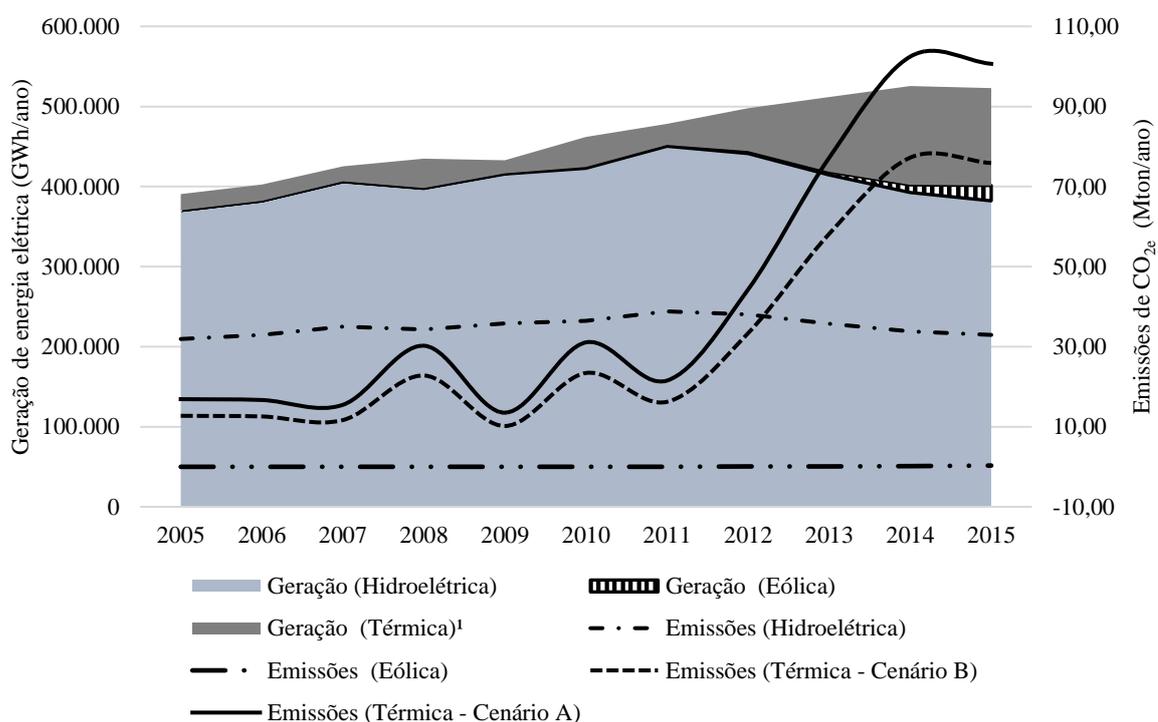
<sup>2</sup> Os dados de geração para energia eólica só estão disponibilizados pelo ONS a partir de 2007.

#### 5.4. Composição das emissões de GEE no período de 2005 à 2015

A Figura 13 expõe uma análise conjunta das fontes de geração aqui estudadas, permitindo uma análise holística da composição da geração de energia elétrica e emissões de CO<sub>2e</sub> na matriz elétrica brasileira nos últimos anos. Como pode ser observado, com a falta de chuvas em 2012 iniciou-se um período de queda da produção hidroelétrica e, em consequência disso, a fim de atender a demanda energética e preservar o nível dos reservatórios, elevou-se o uso de termoelétricas.

Sendo assim, nota-se um aumento na geração termoelétrica e como resultado, um crescimento exponencial emissões de CO<sub>2e</sub> no período de 2012 a 2015, uma vez que estas são as fontes de maiores fatores de emissão observados. Quando se considera o cenário de matriz termoelétrica composto por diferentes matérias-primas há ainda uma redução de cerca de 14% nas emissões de CO<sub>2e</sub> evidenciando a importância de uma matriz energética heterogênea, garantindo maior segurança de fornecimento (Figura 13).

Figura 13 - Emissões de CO<sub>2e</sub> baseado no fator de emissão estimado por ACV segundo Miranda (2012).



Fonte: Lourenço (2016)

Em relação à geração de energia eólica, os reflexos dos processos de regulamentação começaram a aparecer somente a partir de 2012, quando as primeiras plantas contratadas entraram em operação, desde então, nota-se maiores investimentos no setor, e conseqüentemente um crescimento em seu potencial de geração, entretanto as mudanças nas emissões de CO<sub>2e</sub> são praticamente nulas em relação às demais fontes. Isso se deve ao fato de que as emissões no ciclo de vida de geração de energia eólica ocorrem em sua maior parte na etapa de construção dos componentes e equipamentos, ainda na fase de construção, o que resulta em um fator de emissão relativamente baixo.

### **5.5. Custos de geração de energia elétrica**

Com base nos dados dos resultados dos leilões disponibilizados pela ANEEL, estimou-se a média do custo de geração por MWh (R\$/MWh) para as três tecnologias de geração aqui avaliadas.

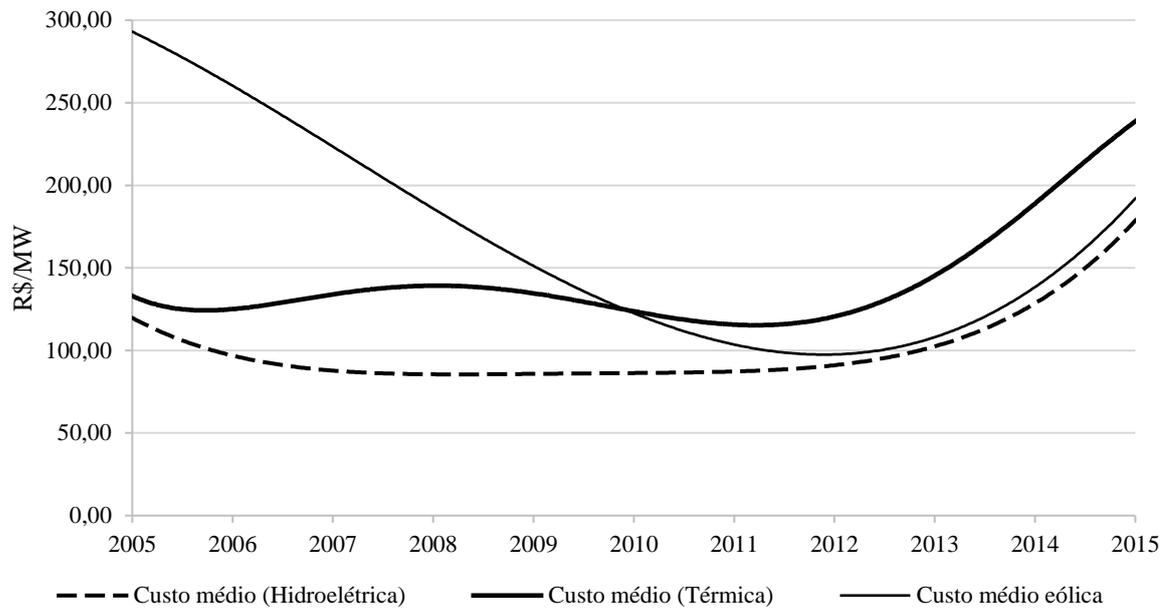
A geração por usinas hidroelétricas teve um custo médio em 2015 de 182,25 R\$/MWh, sendo R\$/MWh, sendo esta a fonte geradora de custo mais baixo, como pode ser visto na

Figura 14. No mesmo ano, as usinas eólicas tiveram custo de geração de 191,41 R\$/MWh, custo este ainda menor do que as usinas termoelétricas, estimado em 234,40 R\$/MWh. A variação dos custos pode ser visualizada na

Figura 14, a qual representa os modelos com melhor ajuste para os custos da energia leilado no período de 2005 a 2015.

Os dados para energia eólica são disponibilizados apenas a partir de 2009, portanto os valores anteriores a este ano são apenas uma previsão, baseada no comportamento dos preços de mercado e alinhada a valores citados na literatura.

Figura 14 - Preço médio de geração de energia elétrica por fonte de geração nos períodos de 2005 a 2015.



Fonte: ANEEL (2016) adaptado pelo autor.

Vale destacar a significativa redução de nos preços de geração de energia eólica ao longo dos últimos anos. Em 2005, o fornecimento de energia eólica somente se tornava viável a um custo de R\$300,00/MWh. Já em 2011, a energia eólica foi comprada ao preço médio de R\$125,00/MWh (

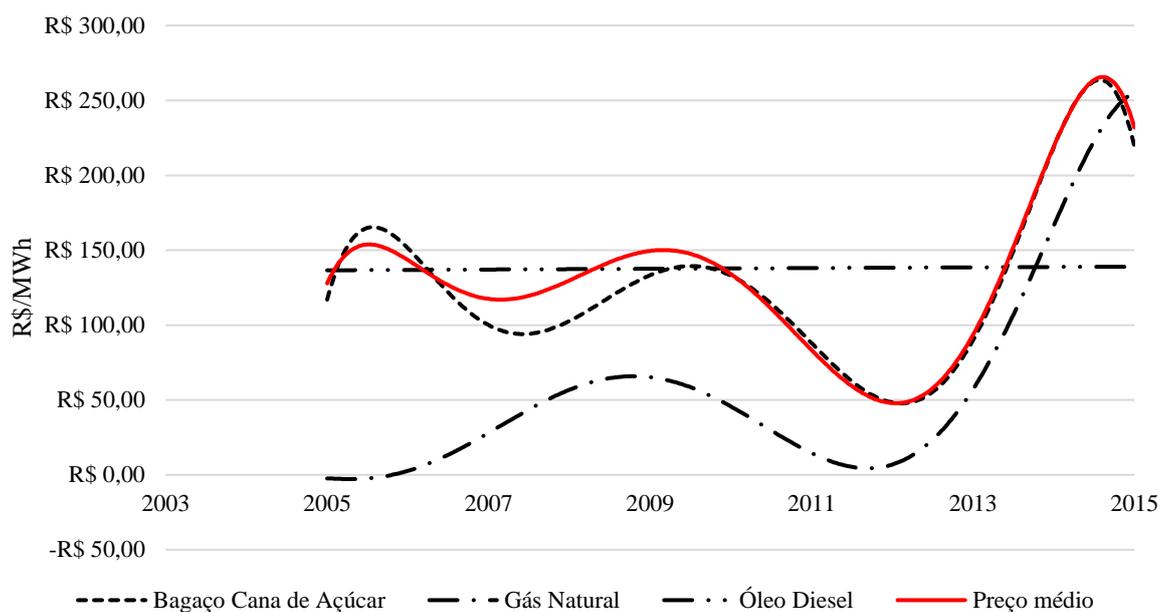
Figura 14), quase um terço do valor de referência de seis anos atrás. A redução nos custos da geração eólica pode ser relacionada às iniciativas do governo de incentivo às fontes de energia alternativa, como o ProInfa, que em sua primeira fase fomentou as fontes eólica, biomassa, PCHs (TOLMASQUIM,2012) (JANNUZZI et al., 2012).

Além disso, há outras iniciativas governamentais que buscam incentivar a expansão do mercado de compensação de energia elétrica, o que é um grande incentivo para a diversificação das fontes de energia e expansão dos limites de potência de geração instalada, incluindo ainda maiores oportunidades para inserção da micro e da mini geração distribuída, como pequenas centrais hidroelétricas ou usinas de menor potencial de geração, na matriz energética (PEREIRA, SD).

Com isso, o mercado de geração de energia eólica tem crescido expressivamente e, deste modo, os fabricantes mundiais de aro geradores têm vindo se instalar no país, o que permite ainda maiores reduções nos custos. Esta tendência tem aproximado o valor de custo de geração eólica aos valores das usinas hidroelétricas, que hoje têm dominado o mercado. Como resultado, as usinas eólicas elevaram sua participação e assim tem explorado melhor seu potencial de geração (TOLMASQUIM, 2012).

Considerando-se a matriz termoelétrica, há ainda variação de custos relacionados à fonte combustível utilizada. Atualmente, a fonte de maior representatividade é o óleo diesel, entretanto há uma crescente tendência de inserção da queima do bagaço de cana-de-açúcar na composição da matriz, uma vez que este é um subproduto da produção do etanol e possui um bom potencial energético. Como reflexo disso, ao analisar os custos dos leilões de energia para termoelétricas (Figura 15), nota-se uma aproximação do preço médio de geração com o preço da geração por bagaço de cana-de-açúcar, comprovando sua maior inserção no mercado.

Figura 15 - Preço médio do custo de geração de energia termoelétrica no período de 2005 a 2015 por fonte.



Fonte: ANEEL (2016) adaptado pelo autor.

As políticas de subsídio à expansão das fontes renováveis na matriz elétrica são ainda um reflexo do compromisso voluntário assumido pelo Brasil em adotar ações de mitigação a fim de reduzir as emissões de GEE. Durante a COP21 em 2015, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima no qual o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa para 1,3 GtCO<sub>2e</sub> em 2025 e 1,2 GtCO<sub>2e</sub> em 2030.

O setor da energia possui significativa importância para o atendimento das metas, a partir da expansão do uso de fontes renováveis, que além da energia hídrica, deve incluir o aumento da participação de eólica, biomassa e solar, além de alcançar maiores ganhos de eficiência no setor elétrico.

Sabe-se que o Brasil enfrenta grandes dificuldades para atingir metas de redução de emissões de gases de efeito estufa uma vez que estas acontecem no contexto de um aumento contínuo da população e do PIB, bem como da renda *per capita*, cenário típico de um país com necessidade de desenvolvimento socioeconômico e consequente elevado índice de emissões, o que torna suas metas estabelecidas bastante ambiciosas.

Neste âmbito, buscou-se avaliar as projeções futuras de atendimento à demanda por energia elétrica a partir alguns cenários de expansão da matriz elétrica, a fim de avaliar o potencial de redução das emissões pelo setor elétrico e a importância do setor elétrico no atendimento às metas de redução.

## **5.6. Projeção futura da demanda por energia elétrica**

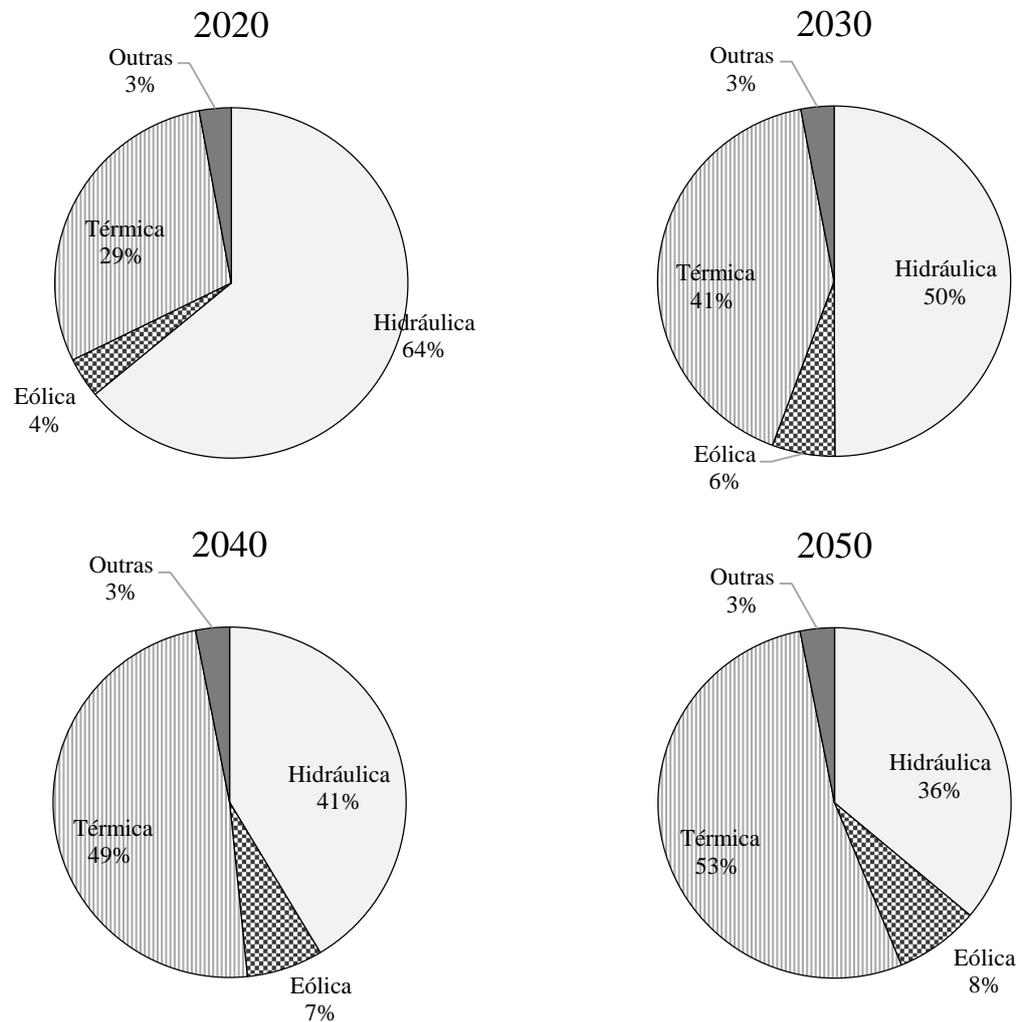
Nos últimos anos houve avanços tecnológicos e uma consequente dependência da energia elétrica que tem apresentado grande influência sobre o crescimento econômico e o desenvolvimento humano. Assim, a garantia de abastecimento energético deve constituir-se como uma das principais prioridades dos governos que, para suprir tal demanda, devem aumentar a diversidade em sua matriz energética e realizar previsões futuras de demanda e potencial de geração (OLIVEIRA, 2009).

Em 2014, a EPE publicou um estudo de demanda de energia, que compõe os estudos do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050). Neste documento são apresentadas as evoluções das demandas dos energéticos aderentes ao cenário econômico de longo prazo (EPE, 2014).

### **5.6.1. Projeção da Composição da Matriz Elétrica**

Com base na projeção do consumo até 2050, realizou-se a projeção da geração de energia elétrica por fonte seguindo então as tendências de alteração do cenário da matriz elétrica nos últimos anos. As projeções realizadas para o Cenário 1 (Figura 16), seguindo as tendências dos últimos anos, indicam que a fonte termoelétrica é a que possui maior tendência a se tornar a fonte complementar às hidroelétricas, atingindo em 2050 uma participação de 53% na geração de energia elétrica.

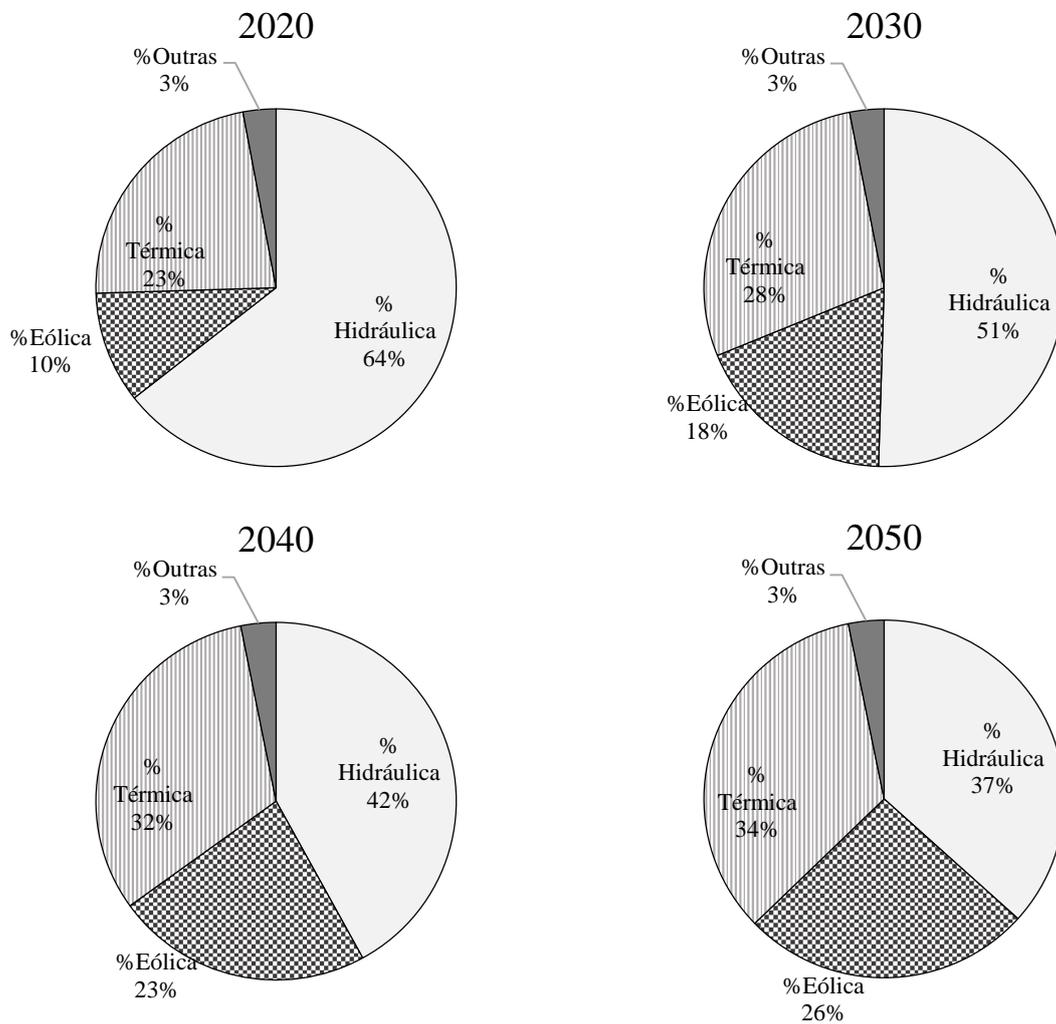
Figura 16 - Projeção decenal da composição da matriz elétrica brasileira no período de 2020 a 2050 para o cenário 1.



Fonte: Lourenço (2016).

Contudo, nas projeções realizadas para o Cenário 2 (Figura 17) foram consideradas projeções mais otimistas para o aproveitamento do potencial eólico brasileiro, considerando um incremento significativo observado nos leilões de empreendimentos a serem implementados nos próximos anos, com isso, as projeções indicam que a energia eólica pode chegar a representar 26% da matriz elétrica brasileira em 2050, chegando assim a alcançar cerca de 28% do potencial de geração estimado em 350GW em 2015.

Figura 17 - Projeção decenal da composição da matriz elétrica brasileira no período de 2020 a 2050 para o cenário 2.



Fonte: Lourenço (2016)

## 5.6.2. Projeção das Emissões de GEE

### 5.6.2.1. *Cenário de projeção 1*

O cenário de projeção 1 considera a tendência de queda apresentada nos últimos anos na geração de energia por fonte hidroelétrica acompanhada da tendência atual de crescimento da geração de energia eólica, mantendo a energia termoelétrica como fonte complementar de atendimento à demanda.

Este cenário foi subdividido em cenários 1A e 1B, como forma de considerar a diversificação das fontes combustíveis na composição das usinas termoelétricas. Sendo assim, o primeiro (Cenário 1A) considera a expansão da matriz, sendo que a parcela representada pelas termoelétricas adota apenas o óleo diesel como fonte principal na geração, já o segundo cenário (Cenário 1B) também leva em consideração a expansão da matriz, porém utiliza a combinação das três principais fontes combustíveis na geração termoelétrica buscando avaliar os benefícios da expansão do uso do gás natural e bagaço de cana-de-açúcar combinados ao óleo diesel para as emissões de CO<sub>2e</sub>.

A partir das estimativas de geração e composição da matriz elétrica foi possível então realizar as estimativas das emissões de CO<sub>2e</sub>. O expressivo crescimento da fonte termoelétrica tem como consequências diretas altas emissões de CO<sub>2e</sub>, chegando a 800 milhões de toneladas de CO<sub>2e</sub> para o cenário 1A em 2050, sendo que cerca de 90% deste valor é proveniente de termoelétricas.

Quando se considera a inclusão de fontes combustíveis alternativas, de menor fator de emissão ou com a capacidade de assimilação de gás carbônico em seu ciclo de vida, como o caso do gás natural e bagaço de cana-de-açúcar aqui considerados no cenário 1B, nota-se há redução das emissões para cerca de 600 milhões de toneladas de CO<sub>2e</sub>.

Sendo assim, evidencia-se a importância de estudos de ACV que auxiliem na otimização dos processos de geração e na escolha de melhores fontes combustíveis, com menor fator de emissão ou biomassa, que durante seu ciclo de vida é capaz de realizar o sequestro de gás carbônico, reduzindo significativamente o saldo de emissões, como verificado no cenário 1B.

### 5.6.2.2. Cenário de projeção 2

O Cenário 2 também considera a tendência de queda apresentada nos últimos anos na geração de energia por fonte hidroelétrica, mantendo a energia termoelétrica como fonte complementar de atendimento à demanda, porém acompanhada da tendência de crescimento da geração de energia eólica chegando a atingir cerca de 30% de seu potencial estimado de geração até 2050, conforme projeção realizada.

De forma similar ao Cenário 1 este também foi subdividido em cenário 2A e 2B, como forma de considerar a diversificação das fontes combustíveis na composição das usinas termoelétricas.

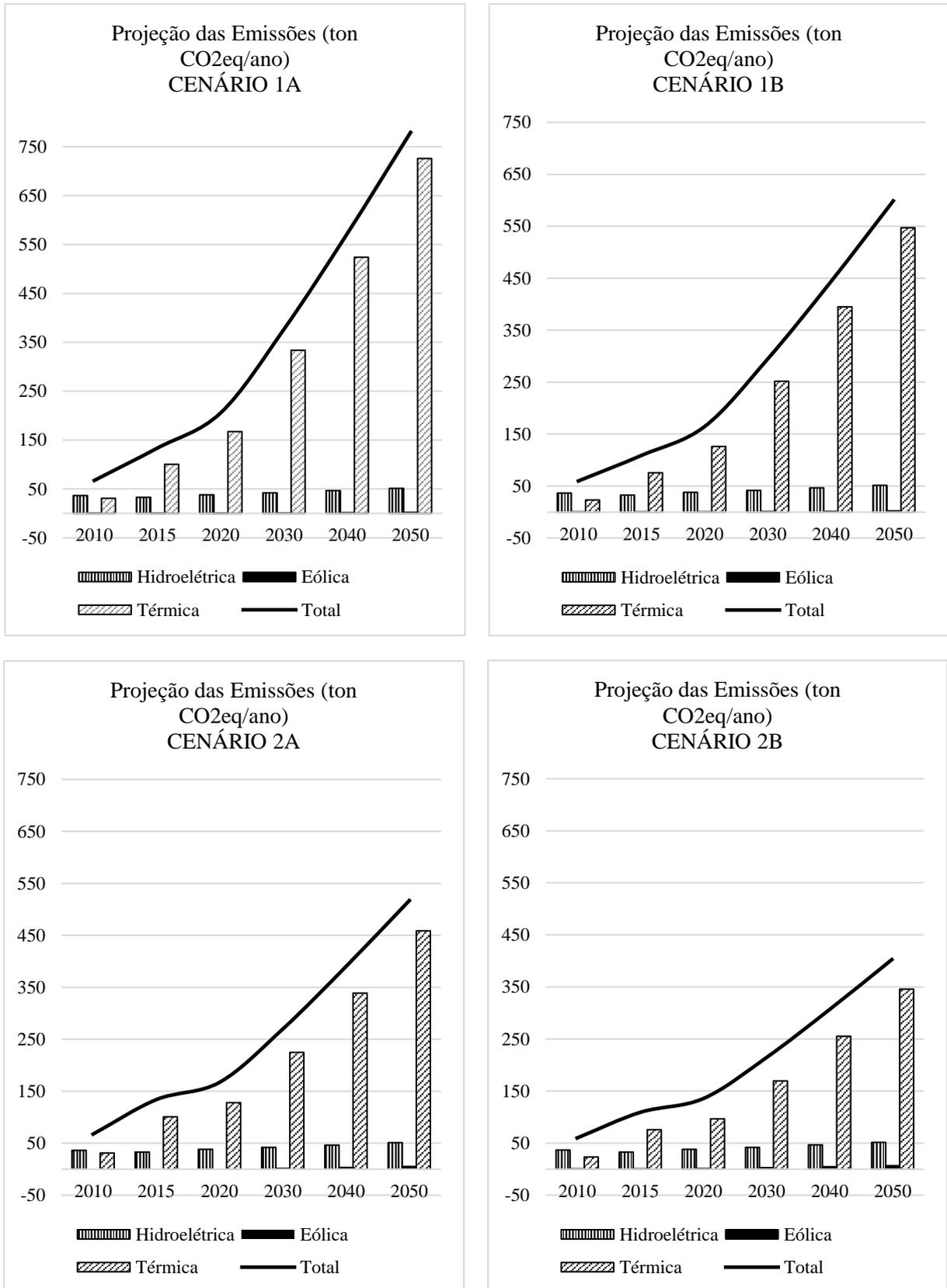
Ao considerar apenas a expansão da energia eólica em substituição às termoelétricas como fonte complementar de atendimento a demanda energética, como simulada pelo cenário 2A, ainda mantendo o óleo diesel como principal fonte de combustível, nota-se que para a projeção de 2050 pode-se atingir uma redução de cerca de 280 milhões de toneladas de CO<sub>2e</sub> em relação ao cenário 1A.

Ao considerarmos um cenário composto pela expansão da energia eólica em substituição às termoelétricas como fonte complementar de atendimento a demanda energética e pela diversificação das fontes combustíveis na matriz termoelétrica tem-se o cenário mais otimista para as reduções das emissões de CO<sub>2e</sub> o qual é representado pelo cenário 2B.

As estimativas neste cenário para 2050 são de 400 milhões de toneladas de CO<sub>2e</sub> uma redução de cerca de 50% em relação ao cenário 1A, o qual mantém as atuais tendências de expansão da matriz. Tal redução somente confirma a necessidade de um planejamento energético que forneça condições para diversificação da matriz elétrica e expansão de fontes renováveis para produção de eletricidade.

A Figura 18 mostra uma comparação dos cenários de projeção realizados, e permite melhor visualização dos impactos da diversificação das fontes combustíveis e expansão eólica nas reduções das emissões de CO<sub>2e</sub>

Figura 18 - Comparação dos cenários de projeção entre 2010 e 2050 para geração de energia e emissões de CO<sub>2</sub>e.



Fonte: Lourenço (2016)

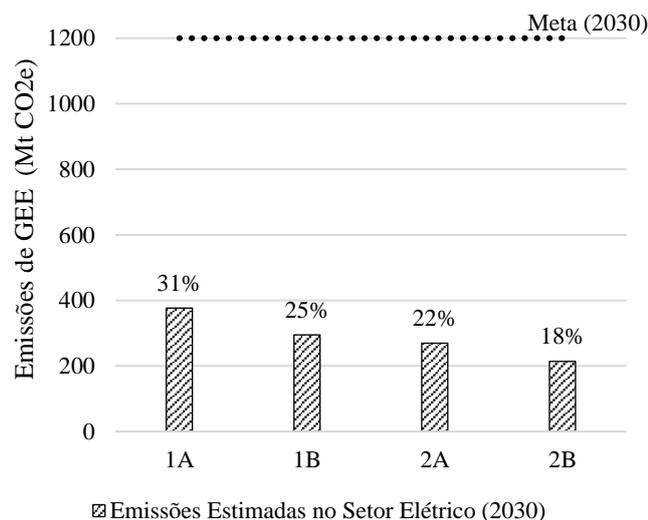
### 5.7. Atendimento às metas de redução de GEE

No âmbito do novo acordo adotado na última Conferência das Partes ocorrida em novembro de 2015 com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima, o Brasil atualizou os compromissos com sua iNDC comprometendo-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa para 1200 MtCO<sub>2e</sub> em 2030 (BRASIL,2015).

Como discutido aqui, o setor elétrico possui importante parcela nas emissões de GEE no Brasil e, com o aumento da demanda por energia elétrica, para atendimento às metas é importante que medidas mitigadoras para emissões de CO<sub>2e</sub> sejam parte integrante do planejamento energético.

A partir da análise de projeções, pode-se inferir a importância da inserção das fontes renováveis e diversificação da matriz para atendimento às metas. Quando se considera a atual tendência de expansão, estima-se que em 2030 o setor elétrico será responsável por cerca de 30% das emissões de CO<sub>2e</sub> no Brasil. Em contrapartida, se o planejamento energético incentivar uma maior exploração do nosso potencial eólico e diversificação da matriz elétrica, esse percentual pode baixar para 18% (Figura 19), tendo assim, maior garantia de atendimento às metas estabelecidas e cedendo maior margem de emissões para os demais setores (indústria e agropecuária), que eventualmente enfrentam dificuldades na redução de emissões na atual situação econômica do Brasil.

Figura 19: Meta estabelecida e emissões de CO<sub>2e</sub> no setor elétrico em 2030



Fonte: Lourenço (2016)

Sendo assim, mesmo considerando as metas de redução assumidas pelo Brasil ambiciosas para um país que visa o crescimento econômico, no que tange a parcela de emissões representada pelo setor elétrico, ela pode ser considerada viável, uma vez que o país mostra-se comprometido em elevar à participação das energias renováveis na matriz elétrica.

### **5.8. Dificuldades encontradas nos estudos de ACV**

O desenvolvimento de estudos de ACV no Brasil ainda enfrenta grandes dificuldades, a exemplo deste trabalho, pode-se citar a disponibilidade e confiabilidade dos dados fornecidos. Muitas vezes ainda é necessário recorrer aos dados de outros países, o que efetivamente pode afetar os resultados uma vez que não representam a realidade brasileira, como é o fato da produção eólica, que possui poucos estudos desenvolvidos no Brasil.

Em relação ao setor elétrico especificadamente, as análises ainda enfrentam uma segunda dificuldade relacionada à diversificação nos processos produtivos, a exemplo disso, está a geração hidroelétrica, a qual enfrenta grandes variações em seu fator de emissão devido à influência dos parâmetros do reservatório como clima, quantidade e tipo de biomassa inundada, profundidade do reservatório e a relação entre a produção de energia e a área do reservatório.

## **6. ESTUDO DE CASO**

### **6.1. Análise do ciclo de vida da geração de energia hidroelétrica baseado no inventário de dados da usina binacional de Itaipu.**

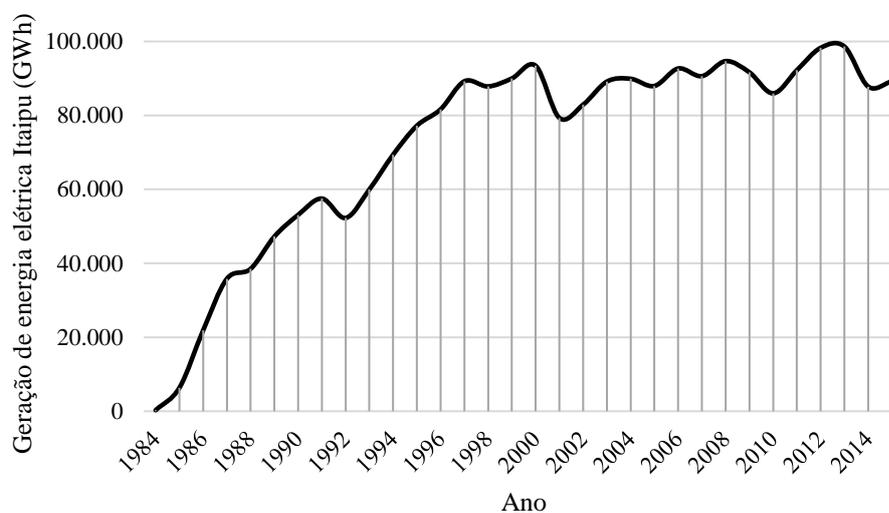
O projeto hidrelétrico Itaipu é um empreendimento binacional pertencente ao Brasil e Paraguai, localizado no Rio Paraná, o qual constitui a fronteira internacional entre os dois países. Tal projeto é resultado de um acordo assinado em 1966, e ratificado em 1973, por um tratado que criou uma entidade binacional - Itaipu Binacional. Tais acordos regulamentaram os estudos conjuntos do potencial hidrelétrico Rio Paraná e criou diretrizes para conduzir a construção e, posteriormente, operação da usina (MACHADO, 2012).

O Acordo Binacional estabelece que a energia hidrelétrica produzida deve ser dividida igualmente entre os dois países, sendo que cada país tem o direito preferencial de adquirir o poder de propriedade do outro país que não o usar para seu próprio consumo interno. Sendo assim, cerca de 95% da energia produzida é alimentada no sistema elétrico brasileiro e os 5% restantes representa o consumo nacional paraguaio (MACHADO, 2012).

A construção do projeto foi iniciada em 1975 e a primeira unidade entrou em operação comercial em 1984. A instalação final básica foi definida com 18 unidades geradoras, cada uma com uma capacidade nominal de 700MW. Estas 2006 duas unidades adicionais foram instaladas para permitir maior flexibilidade na operação e manutenção da usina. Atualmente a planta tem uma capacidade total de 14 000 MW, sendo a segunda maior instalação geradora hidrelétrica do mundo (ITAIPU, 2016).

A Usina de Itaipu é um importante produtor nacional de energia elétrica, atualmente está única usina é responsável pelo abastecimento de cerca de 20% da geração total no Sistema Interligado Nacional (SIN) de geração de energia elétrica. A relevância da usina de Itaipu para atendimento à demanda energética brasileira foi destacada em face da crise energética no ano 2000 e da recente crise hídrica em 2013/2014. O impacto sofrido na produção de Itaipu pode ser observado na Figura 20, a qual nota-se uma queda expressiva na produção energética entre os anos 2000 e 2001. O mesmo pode ser observado no período entre 2013 e 2014, no qual o Brasil passou por uma recente situação de escassez hídrica (Piacenti et al. 2003) (Itaipu, 2016).

Figura 20 - Geração de energia elétrica pela Usina Itaipu Binacional no período de 1984 a 2015



Fonte: Itaipu (2016) adaptado pelo autor.

O projeto de construção e operação de uma usina hidrelétrica pode ser relacionado a diversos impactos socioambientais, sendo assim é de suma importância o conhecimento da dimensão desses impactos e como eles podem ser amenizados, uma vez que as hidrelétricas são consideradas fontes de energia renovável de grande representatividade na matriz elétrica brasileira.

A avaliação do desempenho ambiental de um bem ou serviço deve abranger todas as atividades potencialmente poluidoras, considerando as etapas de produção, desde a obtenção dos recursos naturais até a fabricação do produto ou fornecimento de um serviço. Esta é a visão da Análise de Ciclo de Vida (ACV) (CHEHEBE, 1997).

O método de ACV consiste na compilação e avaliação de dados de entrada (matéria prima e energia) e saída (emissão de poluente, rejeitos, etc.) que permite uma visão global de toda a cadeia produtiva, permitindo a identificação de potenciais impactos e verificação de pontos onde se pode realizar o uso otimizado de energia e de materiais, através do uso de processos de reciclagem e de reuso. (CHEHEBE, 1997) (BARBOSA JÚNIOR et al., 2007;).

Para a avaliação da análise de ciclo de vida da energia hidrelétrica, considerando o grande porte da maioria dos empreendimentos geradores, o levantamento de dados relacionados construção das instalações físicas que compõem o sistema é essencial. Entretanto, a inclusão de equipamentos, combustíveis e vida útil dos materiais utilizados também devem ver inclusos nos limites e permanentemente alocados no sistema. Sabe-se também que é de suma

importância incluir os custos ambientais e econômicos de manutenção e, eventualmente, a substituição do equipamento eletromecânico, uma vez que o horizonte temporal da planta é muito maior do que o tempo de vida do equipamento (RIBEIRO et al 2010).

Têm-se tornado cada vez mais consciente do grau em que os gases de efeito estufa CO<sub>2</sub> e metano (CH<sub>4</sub>) podem ser produzidos no represamento de água em complexos de barragens hidroelétricas. Segundo o IPCC (2014) GEE, o CH<sub>4</sub> tem um potencial de aquecimento atmosférico que é aproximadamente 28 vezes maior que o CO<sub>2</sub> considerando um horizonte de 100 anos (IPCC, 2014)

A geração da hidroeletricidade e seus potenciais impactos tem sido cada vez mais reexaminada. Durante a fase de operação as emissões de CO<sub>2e</sub> decorrem basicamente dos reservatórios. A criação de reservatórios hidrelétricos induz a decomposição da biomassa inundada o que resulta em maiores emissões de GEE, principalmente CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e uma pequena quantidade de CH<sub>4</sub> (metano). No entanto, essas emissões variam com o tempo, o pico de emissões ocorre de dois a quatro anos após o reservatório ser preenchido e nos anos seguintes as emissões de CO<sub>2</sub> diminuem gradualmente (Hydro Quebec,2016).

Nos últimos anos, foi medido um considerável fluxo de GEE proveniente de reservatórios de represas hidroelétricas, e esforços foram feitos para modelar as emissões de forma eficaz. No entanto, as taxas de fluxo de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> possui grande variação entre estes estudos. Além disso, há incertezas quanto à contribuição relativa dos gases de efeito estufa dos reservatórios em diferentes latitudes, devido ao comportamento dos reservatórios em diferentes condições climáticas (PNNL, 2013).

Em consequência disso, os ciclos de vida dos materiais de construção, as emissões de gases de efeito estufa das áreas inundadas e os encargos ambientais das obras civis não devem ser desprezados na análise de ciclo de vida da geração hidroelétrica, sendo assim, uma coleta de dados completa deve ser realizada sobre os ciclos de vida relacionados a estes insumos e processos. Desta maneira, o objetivo deste estudo é realizar uma análise do ciclo de vida da geração de energia hidroelétrica baseado no inventário de dados da usina binacional de Itaipu, a fim de mostrar a aplicabilidade e importância de estudos de ACV no setor elétrico.

A utilização do *software* Umberto permitiu estruturar os dados a partir da inserção em redes de fluxo, organizadas em projetos, cenários e períodos de forma que descrevam a realidade do processo de geração de energia hidroelétrica pela usina de Itaipu (ANEXO ).

O *software* Umberto permitiu então gerar os balanços de forma a representar o que ocorre no processo, fornecendo um relatório de todos os materiais consumidos, fluxo de energia, geração de emissões e resíduos etc. Considerando a estimativa de geração para os 100 anos de operação da Usina de Itaipu de 8.212.415,25 GWh.

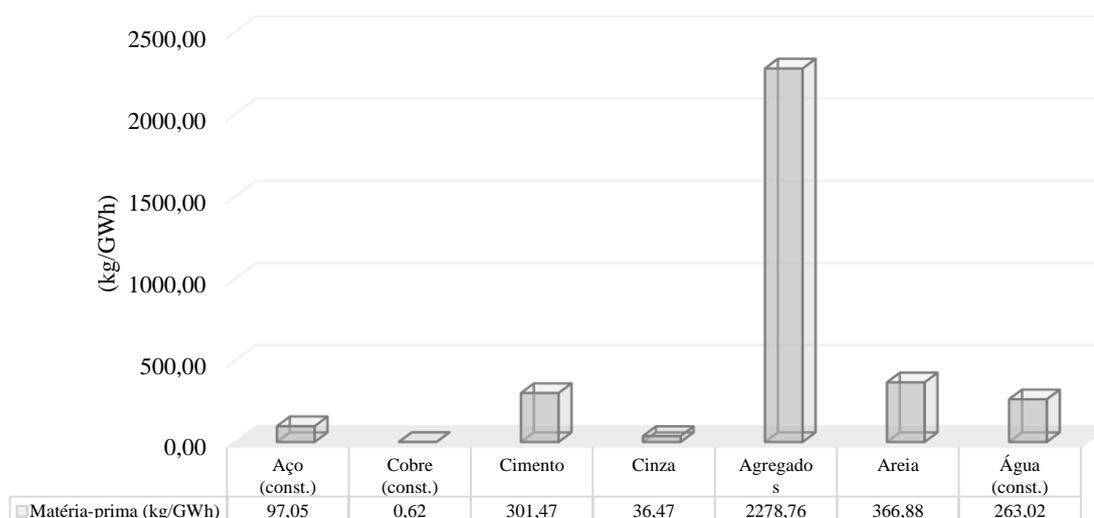
Os resultados foram expressos conforme a unidade funcional adotada de 1 GWh, o que nos permite identificar e comparar quais insumos de maior consumo e etapas de maior potencial poluidor em todo o ciclo de vida.

Foram considerados apenas os insumos de maior significância, levando em consideração a complexidade e limitações do estudo. Neste estudo, para quantificação dos insumos, foram consideradas informações acerca dos dados de consumo de matéria-prima na construção, operação e manutenção da usina por um período de 100 anos.

A construção da usina exigiu enormes obras civis, como a escavação do canal de desvio, e a construção de instalações de concreto (barragem, vertedouro, casa de força, etc.). Quanto aos insumos na fase de construção, o concreto foi o material de maior expressividade, sendo exigido cerca de 31,5 milhões de toneladas de concreto, o que representa 3.836 kg de concreto por GWh gerados em Itaipu no período de 100 anos.

Considerando o concreto armado insumo de maior expressividade, suas matérias-primas constituintes foram as mais exploradas na fase de construção, sendo que os agregados (brita em diferentes granulometrias) foram a maior parcela constituinte, seguido da areia, cimento, água, e cinza de termoeletrica (utilizadas como adição ao cimento). Os outros insumos considerados foram o Aço, utilizado nas estruturas de concreto armado e constituição dos equipamentos e por último o cobre, principal constituinte dos equipamentos de geração. Os principais insumos da construção de Itaipu estão representados na Figura 21.

Figura 21 - Principais insumos na fase de construção da usina de Itaipu



Fonte: Lourenço (2016)

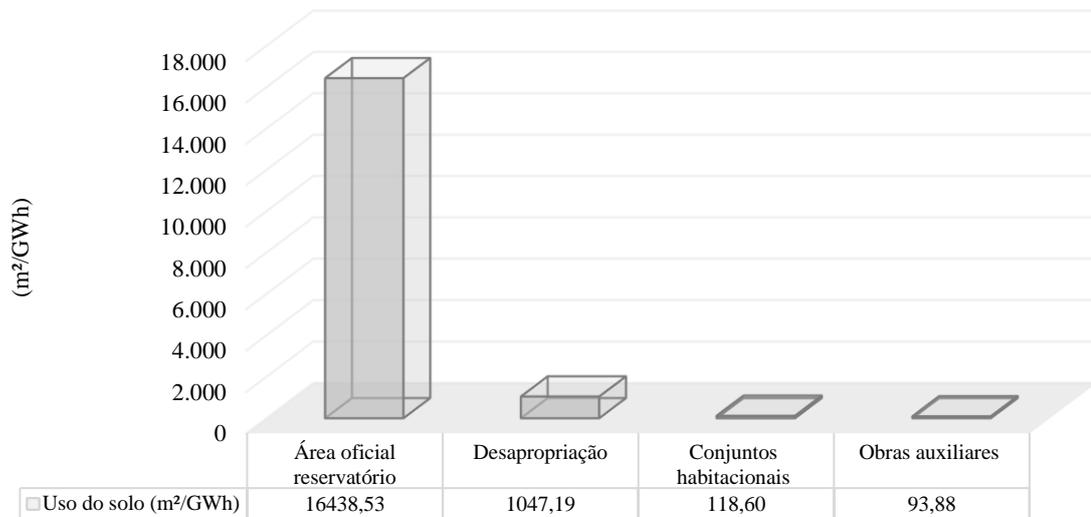
Durante a operação, os principais insumos consumidos são aço (57 kg/GWh) e cobre (2 kg/GWh) utilizados na manutenção dos equipamentos além do consumo interno de energia elétrica que é estimado em 473MWh.

Quanto ao uso da água, durante a fase de operação ele é considerado não-consuntivo, o que significa que há fonte de suprimento suficiente para praticamente toda a água utilizada, podendo haver alguma modificação no seu padrão temporal de disponibilidade quantitativa. (PEREIRA & PEDROSA, 2005).

A maioria das usinas hidrelétricas necessita do represamento de água para a geração de energia, o que exige a construção de barragens e reservatórios. A construção destas estruturas altera diretamente o uso do solo e gera diversos impactos socioambientais uma vez que podem exigir a realocação de pessoas que habitam a área a ser alagada para formação do reservatório, além da perda de importantes áreas naturais, terras agrícolas e sítios arqueológicos pela inundação (USGS, 2016).

O escopo do presente estudo limita-se aos encargos ambientais do ciclo de vida da usina em termos de materiais, emissões de GEE e geração de energia. As alterações no uso do solo, e possíveis impactos relacionados foram abordados apenas em relação à área alterada pela construção de Itaipu. Sendo assim, o reservatório de Itaipu é o responsável por maior impacto em questão de área, o qual possui área oficial de 1.350 km<sup>2</sup>, correspondente a uma área 16.439m<sup>2</sup> para a geração de 1 GWh. As demais modificações no uso do solo são causadas por desapropriações (1047m<sup>2</sup>/GWh), a construção de conjuntos habitacionais para realocação de pessoas (118 m<sup>2</sup>/GWh) e obras auxiliares (94m<sup>2</sup>/GWh) (Figura 22).

Figura 22 - Alterações no uso do solo causadas pela construção da Usina de Itaipu.

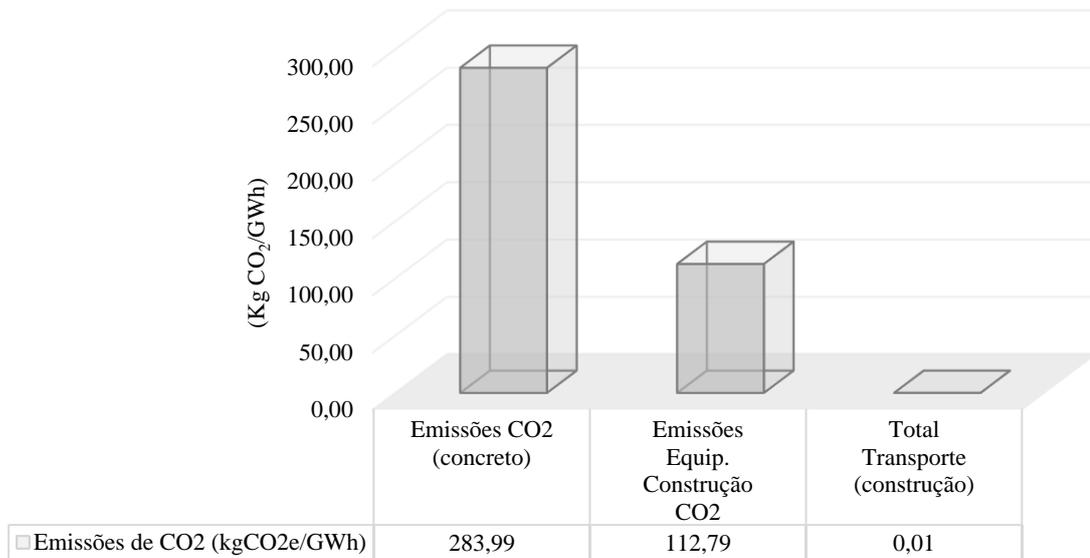


Fonte: Lourenço (2016).

As emissões do ciclo de vida de uma instalação de geração elétrica incluem as emissões associadas à construção, bem como quaisquer emissões resultantes da operação da instalação e, eventualmente, o descomissionamento da instalação, o qual não foi considerado neste estudo.

As emissões de GEE de ciclo de vida para uma instalação de geração são calculadas durante um intervalo suficientemente longo para tratar todos os efeitos decorrentes da instalação.

As principais emissões de GEE na fase de construção, assim como os insumos, estão relacionadas à construção das instalações de concreto. A maior parte das emissões calculadas é proveniente do ciclo de vida do cimento, material constituinte do concreto. Estima-se que para a construção da usina de Itaipu foram emitidos cerca de 284kgCO<sub>2e</sub>/GWh somente na produção do cimento utilizado (Figura 23).

Figura 23 - Emissões de CO<sub>2</sub>e na fase de construção

Fonte: Lourenço (2016)

Considerando o fator obtido, estima-se que na fase de construção da Usina Binacional de Itaipu foram emitidos um total de 3.258.649,08 ton CO<sub>2</sub>e.

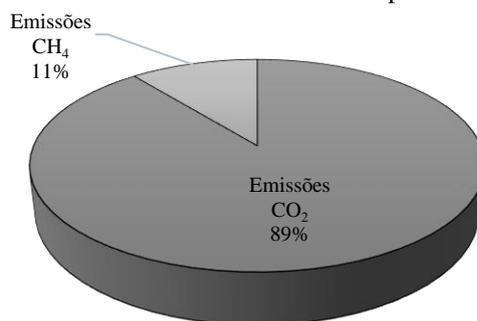
Aqui cabe ressaltar que, segundo dados do inventário, a produção do cimento utilizado em Itaipu possui altas emissões de CO<sub>2</sub>, sendo considerada a emissão de 942 kgCO<sub>2</sub>/ton cimento. A indústria de cimento também tem reduzido seu fator de emissão a partir de adições ao cimento e utilização de cogeração na queima do clínquer. Em estudo recente, Borges et. al. (2014) estimaram um fator de 640kgCO<sub>2</sub>/ton Cimento Portland do tipo CPII-E, que contém até 34% de escória de alto forno em sua composição, comumente usados em construções civis (BORGES et. al. 2014).

Simulando as emissões da construção de Itaipu com um fator de emissão mais baixo (640kgCO<sub>2</sub>/ton cimento) para o ciclo de vida do cimento, tem-se uma redução das emissões para 192 kgCO<sub>2</sub>/GWh, uma redução de 32%. Para novas construções, sugere-se como medida para redução de emissões a substituição do cimento comum por aqueles que utilizam o emprego de adições minerais na produção dos cimentos compostos.

De modo geral, as adições ao cimento têm como consequências a diminuição no consumo de recursos naturais; uma menor quantidade de matéria-prima calcinada e, conseqüentemente, menores emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da calcinação e da queima de combustíveis fósseis e menor demanda de energia, devido às reduções na moagem, processo de maior demanda energética (BORGES et. al. 2014).

Durante a fase de operação as emissões de CO<sub>2e</sub> decorrem basicamente dos reservatórios. Os principais gases emitidos são CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e CH<sub>4</sub> (metano). Para o reservatório de Itaipu, segundo estudos realizados referentes às emissões de dióxido de carbono e de metano, há uma emissão de dióxido de carbono de 171 kg CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/ dia, enquanto que a emissão de metano é de 20,8 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia, a composição das emissões pode ser vista na Figura 24.

Figura 24 - Composição das emissões de GEE no reservatório de Itaipu.



Fonte: Adaptado de Brasil (2002)

Considerando então as emissões medidas, a área oficial do reservatório de Itaipu de 1350 km<sup>2</sup> e sua geração média anual, estimou-se os fatores de emissão de 1,13ton CO<sub>2</sub>/GWh e 0,14 ton CH<sub>4</sub>/GWh. Considerando o *GWP* do gás metano, tem-se um fator de emissão de CO<sub>2e</sub> resultante de 4,98 ton CO<sub>2e</sub>/GWh.

No entanto, sabe-se que essas emissões variam com o tempo, sendo que o pico de emissões ocorre de dois a quatro anos após o reservatório ser preenchido e nos anos seguintes as emissões de CO<sub>2</sub> diminuem gradualmente, porém os estudos disponíveis para o reservatório de Itaipu não permitem a análise deste decaimento temporal, sendo assim, o fator estimado representa apenas uma média das emissões (Hydro Quebec,2016).

Considerando todas as emissões de CO<sub>2e</sub> ocorridas durante a fase de construção e operação na Usina de Itaipu, pôde-se estimar o fator de emissões para a mesma, que resultou no valor de 5,38 ton CO<sub>2e</sub>/GWh, sendo que cerca de 90% destas emissões podem ser relacionadas às emissões do reservatório no período de 100 anos adotados neste estudo.

A fase de construção das usinas hidroelétricas é responsável por significativas emissões de CO<sub>2e</sub>, porém, quando considera-se o ciclo de vida das usinas, que geralmente operam por longos períodos, as emissões provenientes dos reservatórios tornam-se significativas.

Quando comparamos o fator de emissão de Itaipu de 5,38 ton CO<sub>2e</sub>/GWh com o estimado por Miranda (2012) de 86,21 ton/GWh, nota-se uma grande variação. Tal diferença no valor

pode ser relacionada a uma grande variação nos estudos de estimativa das emissões de reservatório.

Segundo Miranda (2012), as variações em parâmetros como clima, quantidade e tipo de biomassa inundada, profundidade do reservatório e a relação entre a produção de energia e a área do reservatório geram uma elevada variação na estimativa de emissões dos reservatórios. Como o fator estimado por Miranda considerou diversos estudos de reservatório, os quais fornecem valores para emissões entre  $-2,33 \times 10^5$  a  $9,99 \times 10^6$  ton CO<sub>2e</sub>/ano, adotou-se um cenário conservador, que por segurança elevou consideravelmente o fator de emissão para a geração hidrelétrica (MIRANDA, 2012).

À exemplo, pode-se citar estudos da empresa sueca Vattenfall, um dos únicos inventários de ciclo de vida para hidroelétricas completos que incluiu as emissões de reservatório, divulgados na literatura, que apresentaram um fator de emissão de 9,0 ton CO<sub>2e</sub>/GWh, não muito discrepante dos valores estimados aqui para Itaipu Binacional. (MIRANDA, 2012) (VATTENFALL,2012).

## 7. CONCLUSÕES

A abordagem do ciclo de vida pode ser utilizada para minimizar os encargos ambientais associados com a cadeia de produtiva como um todo. A projeção das emissões demonstrou que a matriz elétrica brasileira tem tendências de elevar suas emissões de CO<sub>2e</sub> se manter sua dependência de acionamento de termoeletricas de forma complementar às hidroelétricas para o suprimento da demanda energética. Por outro lado, com a inserção de fontes renováveis e diversificação da matriz elétrica, notou-se uma redução significativa nas emissões de GEE.

A partir de tal redução nas emissões de GEE com a diversificação da matriz termoeletrica e expansão da geração eólica, pode-se inferir que investir em cogeração, em fontes combustíveis alternativas e demais fontes renováveis faz-se necessário para melhorar a segurança do sistema elétrico e aumentar a participação de energias renováveis na matriz, minimizando as consequências do efeito estufa. Em consequência disso, mesmo considerando as metas de redução assumidas pelo Brasil ambiciosas para um país que visa o crescimento econômico, no que tange a parcela de emissões representada pelo setor elétrico, ela pode ser considerada viável.

Dessa forma, nota-se a necessidade de um planejamento energético que forneça condições para o crescimento de fontes renováveis para produção de eletricidade, o que reforça a importância dos programas de incentivo financeiro do governo para que o setor elétrico atraia maiores investimentos, não só na produção energética, mas também em pesquisas, como ACV.

Além disso, há a necessidade de que os empreendimentos de geração de energia elétrica sejam acompanhados desde o projeto até as operações, de forma a gerar um inventário de dados da produção energética nacional que possibilite o refinamento de estudos de ACV no Brasil e com isso, permitir uma avaliação mais ampla dos impactos ambientais relacionados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRADEE (Brasil). Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (Comp.). **Tarifas de energia**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 24 out. 2016

ADEN, Nathaniel; MARTY, Augustin; MULLER, Marc. **Comparative Life-cycle Assessment of Non-fossil Electricity Generation Technologies: China 2030 Scenario Analysis**. [s.l]: Ce 268e Civil Systems and the Environment, 2010. 45 p. Project Report.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 20 maio. 2016a.

\_\_\_\_\_. **Balanco de Informações de Geração - USINAS do tipo UTE em Operação**. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3> Acesso em 26 de setembro de 2016.

\_\_\_\_\_. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.

\_\_\_\_\_. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 1ª ed. Brasília: Aneel, 2002. 155 p.

\_\_\_\_\_. **Resultados dos Leilões de Geração**: Resumo dos resultados dos leilões de geração no ACR de 2005 a 2016. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes>>. Acesso em: 10 set. 2016.

AMARANTE, O. A. C.; DA SILVA, F.J.L. DE ANDRADE P.E.P. **Atlas eólico: Minas Gerais** – Belo Horizonte, MG: Cemig, 2010.

BARBOSA JÚNIOR, A. F. et al. **Conceitos e Aplicações de ACV no Brasil XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. **Anais...**Foz do Iguaçu, PR, Brasil: ENEGEP, 9 out. 2007

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

BRASIL (2009). MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. ISAURA MARIA DE RESENDE LOPES FRONDIZI. (Org.). **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**: Guia de Orientação 2009. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2009. 132 p.

\_\_\_\_\_. (2012). MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. FRANCISCO GAETANI. (Org.). **O Brasil na agenda internacional para o desenvolvimento sustentável**: Um olhar externo sobre os desafios e oportunidades nas negociações de clima, biodiversidade e substâncias químicas. Brasília: MMA, 2012. 190 p.

\_\_\_\_\_. (2015). **MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONVENÇÃO DA ONU SOBRE MUDANÇA DO CLIMA: Fundamentos para iNDC brasileira.** 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris/item/10710>>. Acesso em: 27 out. 2016.

\_\_\_\_\_. (2015). **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada: CONSECUÇÃO DO OBJETIVO DA CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA.** Brasília, DF

\_\_\_\_\_. (2016). **MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) . CONVENÇÃO QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE CLIMA: CONFERÊNCIA DAS PARTES.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/conferencia-das-partes>>. Acesso em: 27 out. 2016.

\_\_\_\_\_. (2009) Constituição Lei nº 12187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências.** Brasil.

\_\_\_\_\_. (2002) **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT)-, Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros,** Relatório de referência do “Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa”, MCT, Brasília, 2002.

\_\_\_\_\_. Mercedes Maria da Cunha Bustamante. (Org.). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.** Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – SEPED Brasília: MCTI, 2013. 76 p.

**CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). Fontes.** Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/ondeatuamos/fontes?\\_afLoop=2740424088647#@?\\_afLoop=2740424088647&\\_adf.ctrl-state=5jbxfg17\\_54](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/ondeatuamos/fontes?_afLoop=2740424088647#@?_afLoop=2740424088647&_adf.ctrl-state=5jbxfg17_54)>. Acesso em: 01 set. 2016.

CAMARGO, A.S G. de; UGAYA, C.M.L; AGUDELO, L.P.P. Proposta de definição de indicadores de sustentabilidade para geração de energia elétrica. **Revista Educação & Tecnologia:** Periódico Técnico Científico dos Programas de Pós-Graduação em Tecnologia dos CEFETs-PR/MG/RJ, [s.l], p.1-21, 2003.

**CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - PROCEL. Detalhe - Casos de Sucesso.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BAE81473E-313C-4AD9-9E17-54EFA8733AF6%7D&Team=&params=itemID=%7B11F77CA0-72E8-4738-83DB-EEC02C6B2ECE%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>. Acesso em: 18 maio. 2016b.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de vida de Produtos – ferramenta gerencial da ISO 14000.** Qualitymark, Rio de Janeiro, 1997. 104 p.

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI), (Org.). Desenvolvimento conceitual de metodologia de medição e verificação de consumos de energéticos nas indústrias.** Brasília: CNI, 2012. 55 p. ISBN 978-85-7957-072-8

DELGADO, G.; SARAIVA, I.; LIMA JR, J. A. T.; PEIXOTO, J. A. A. **A metodologia de Análise do Ciclo de Vida, apoiada pelo Software Umberto, como ferramenta de gestão na perspectiva da sustentabilidade: um estudo de caso.** SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2007.

DUTRA.R.M. Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Eólica: Princípios E Tecnologias.** [s.l]: CEPTEL, 2008.

ELETROBRAS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro por Estagio - Dezembro 2015 (2015)** Disponível em: <https://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS21D128D3PTBRIE.htm> Acesso em 26 de setembro de 16.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2015: Ano Base 2014.** Rio de Janeiro: EPE, 2015. p. 292

\_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014.** 292 p.: 182 il. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

**ENERGIA EÓLICA: Anuário 2014/2015.** Rio de Janeiro: Brasil Energia, 2014.

ENVIRONMENTAL HEALTH & SAFETY ONLINE (EHSO) (Atlanta) (Comp.). **Introduction to Emission Factors.** 2013. Disponível em: <[http://www.ehso.com/Air\\_AP\\_42.htm#review](http://www.ehso.com/Air_AP_42.htm#review)>. Acesso em: 27 out. 2016.

FERREIRA JR., W. O setor elétrico brasileiro: questões para uma agenda. In: GIAMBIAGI, F.; DE BARROS, O. (Eds.). **Brasil pós-crise: agenda para a próxima década.** [s.l.] Elsevier, 2009. p. 344.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos.** [s.l.] Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. et al. (Minas Gerais). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (inpe). **Projeto: Balanco de carbono nos reservatórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A.** 2007. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/projetofurnas/>>. Acesso em: 11 out. 2016

\_\_\_\_\_. **Sistema Furnas de geração e transmissão - Usina termelétrica convencional.** Disponível em [http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_term\\_funciona.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_term_funciona.asp) Acesso em 26 de setembro de 2016.

GAVINO, N.A. **Energia Eólica: uma análise dos incentivos à produção (2002-2009).** 2011. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Economia, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011

GOLDEMBERG, J. et al. **Balanco das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil.** São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_. Energia e desenvolvimento. **Estud. av.**, São Paulo, v. 12, n. 33, p. 7-15, Ago. 1998. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40141998000200002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141998000200002&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 10 de out. 2016.

GOMES V. J. F **O meio ambiente e o risco de apagão no Brasil**. II Seminário Internacional - Reestruturação e Regulação do Setor de Energia Elétrica e Gás Natural. 2007, Rio de Janeiro: GESEL - UFRJ, 2007. 8 p.

HYDRO QUEBEC. **Greenhouse gas emissions and reservoirs**. 2016. Disponível em: <<http://www.hydroquebec.com/sustainable-development/documentation-center/ghg-reservoir.html>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

INSTITUTO ACENDE BRASIL (Org.). Leilões no Setor Elétrico Brasileiro: Análises e Recomendações. **White Paper - Instituto Acende Brasil**, São Paulo, p.1-52, maio 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT) (Brasil). MCTI. **O que é Avaliação do Ciclo de Vida: Histórico da ACV**. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>>. Acesso em: 12 out. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Pachauri, R.K. and Meyer L.A. (eds.) **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Geneva, Suíça, 151 pp. 2014

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); **ISO 14040:2006; Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**.2006

ITAIPU BINACIONAL. **Geração**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 12 out. 2016.

JANNUZZI, G. DE M. et al. **Além de grandes hidroelétricas: Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil**. [s.l.] WWF, 2012. Disponível em: <[http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem\\_de\\_grandes\\_hidreletricas\\_sumario\\_para\\_tomadores\\_de\\_decisao.pdf](http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf)>. Acesso em: 23 de maio. 2016.

LIMA, A. M. F. **Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil: inserção e perspectivas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

LIMA, M.T.S.L; SOUZA, M.C. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - Ufsm: Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, p.17-23, 2014.

MACHADO, B. P. Large Hydropower Plants of Brazil. **Comprehensive Renewable Energy**, [s.l.], p.93-127, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-087872-0.00607-7>.

MEDEIROS, F.P. **Avaliação das emissões de poluentes e de gases efeito estufa associados ao transporte marítimo na exploração e produção de petróleo na Bacia de Campos**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Técnico Científico da PUC-RIO, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Cap. 4.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Janeiro/2015**. Secretaria de Energia Elétrica.

Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico. Brasil. Disponível em: <<http://goo.gl/EUYm12>> Acesso: 17/09/15.

\_\_\_\_\_. **Resenha Energética Brasileira – Resultados de 2014**. Brasil. Disponível em: <<http://goo.gl/eDTFCh>> Acesso: 17/09/15.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. 2012. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MIRANDA, T. (Org.). **MP divide risco hidrológico entre hidrelétricas e consumidores a partir de 2016**. 2016. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/CONSUMIDOR/496313-MP-DIVIDE-RISCO-HIDROLOGICO-ENTRE-HIDRELETRICAS-E-CONSUMIDORES-A-PARTIR-DE-2016.html>>. Acesso em: 15 out. 2016.

OLIVEIRA, E. A. de. **PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO NO BRASIL NO HORIZONTE 2010-2030**. 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Planejamento Energético, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Acordo Internacional de Paris n° Decisão 21, de 11 de dezembro de 2015. Adoção do Acordo de Paris sob a Convenção aplicável a todas as Partes: Plataforma Durban de Ação Reforçada (decisão 1/CP.17)** Paris, Traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio). Última edição em 21/04/2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Histórico da Operação: Geração de Energia**. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/historico/geracao\\_energia.aspx](http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx)>. Acesso em: 15 out. 2016.

PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY (PNNL) (Org.). **Evaluating greenhouse gas emissions from hydropower complexes on large rivers in Eastern Washington**. Washington: Battelle, 2013. 46 p

PEREIRA, J.S. & PEDROSA, V. A. **Recursos hídricos e desenvolvimento**. 2005. 82 p. Notas de Aula. Curso de aperfeiçoamento em Gestão de Recursos Hídricos.

PEREIRA, O.S. et al. **Energia Solar fotovoltaica e Biomassa: avanços e desafios para expansão de uso na matriz elétrica nacional**. [Sd]. Disponível em: <<https://goo.gl/5JXCTn>>. Acesso em: 10 out. 2016.

RIBEIRO, F. M.; SILVA, G. A. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.44-54, Jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.006>.

RIBEIRO, F.M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil - Usina de Itaipu: primeira aproximação**. 2003. 2v. Dissertação (mestrado) - Programa Interunidades de Pós- Graduação em Energia (EP-IF-FEA-IEE). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSA, L.P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. **Estudos Avançados**, [s.l.], v. 56, n. 21, p.39-58. 2007.

ROSA, V.H.S. **Energia elétrica renovável em pequenas comunidades no Brasil: em busca de um modelo sustentável**. 2007. 440 f. Tese (Doutorado) - Curso de Desenvolvimento Sustentável - Política e Gestão Ambiental. O Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. ALEXANDRE. Avaliação do Ciclo de Vida: Ferramenta gerencial para tomada de decisão. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, p. 1–23, ago. 2006.

SINGH, A; OLSEN, S. I.; PANT, D. Importance of Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources. **Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources**, [s.l.], p.1-11, 2013. Springer Science + Business Media. [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1_1).

SOUZA, L.L. et al. Análise do impacto ambiental causado pela geração de energia eólica. **Engenharia: Energia**, [s.l.], p.625. 2015.

STEINHURST, W.; KNIGHT, P.; SCHULTZ, M. Hydropower Greenhouse Gas Emissions: State of the Research. **Sinapse**. Cambridge, p. 01-24. 14 fev. 2012.

TERMOELETRICIDADE: Os caminhos da expansão. Brasil: Instituto Acende Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www.acendebrasil.com.br/estudos>>. Acesso em: 15 out. 2016.

TOLMASQUIM, M. T. (coord). **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_ Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 247-260, jan. 2012. ISSN 1806-9592. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10636/71178>>. Acesso em: 10 out. 2016. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142012000100017>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Hydroelectric power water use: Hydropower and the Environment**. Howard Perlman (Org) ESTADOS UNIDOS. 2016. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/wuhy.html>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

U.S. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL) (Org.). **Life Cycle Assessments of Energy Technologies**. Disponível em: <[http://www.nrel.gov/analysis/sustain\\_lca\\_about.html](http://www.nrel.gov/analysis/sustain_lca_about.html)>. Acesso em: 21 out. 2016.

VATTENFALL (Suécia). **Lyfe Cycle Assessment: Vattenfall's electricity generation in the Nordic countries**. [s.l]: Vattenfall, 2012. 28 p.

WEISSER, D. A guide to life-cycle Greenhouse Gas (GHG) emissions from electric supply technologies. **Energy: Planning and Economics Studies Section. International Atomic Energy Agency**, Viena, n. 32, p.1543-1559. 2007.

ZANCANER, Mariana Garbarino; DE SOUZA SANTOS, Tharcisio Bierrenbach. Cogeração: Ampliação da Oferta de Energia Elétrica com a Biomassa (Bagaço da Cana-de-Açúcar). **Diálogos Interdisciplinares**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 47-65, sep. 2013. ISSN 2317-3793. Disponível em: <<https://revistas.brazcubas.br/index.php/dialogos/article/view/21>>. Acesso em: 24 out. 2016.

## ANEXO A

Variação percentual entre fatores de emissão no período de 2006 a 2015.

$\Delta\%$ entre fatores de emissão		F.E. Matriz Cenário A	F.E. Matriz Cenário B	F.E. Inventário	FE Combinado MDL
$\Delta\%$ 2006	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	9%	270%	-41%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-8%	0%	239%	-46%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-73%	-70%	0%	-84%
	FE Combinado MDL	69%	85%	526%	0%
$\Delta\%$ 2007	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	8%	296%	-37%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-8%	0%	266%	-42%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-75%	-73%	0%	-84%
	FE Combinado MDL	59%	72%	529%	0%
$\Delta\%$ 2008	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	13%	198%	-54%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-12%	0%	163%	-59%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-66%	-62%	0%	-84%
	FE Combinado MDL	116%	144%	543%	0%
$\Delta\%$ 2009	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	7%	353%	-32%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-7%	0%	322%	-36%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-78%	-76%	0%	-85%
	FE Combinado MDL	47%	57%	565%	0%
$\Delta\%$ 2010	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	13%	178%	-54%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-11%	0%	146%	-59%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-64%	-59%	0%	-83%
	FE Combinado MDL	118%	145%	505%	0%
$\Delta\%$ 2011	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	10%	321%	-38%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-9%	0%	284%	-44%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-76%	-74%	0%	-85%
	FE Combinado MDL	62%	77%	581%	0%
$\Delta\%$ 2012	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	15%	146%	-55%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-13%	0%	113%	-61%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-59%	-53%	0%	-82%
	FE Combinado MDL	124%	158%	450%	0%
$\Delta\%$ 2013	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	15%	146%	-55%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-13%	0%	113%	-61%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-59%	-53%	0%	-82%
	FE Combinado MDL	124%	158%	450%	0%
$\Delta\%$ 2014	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	23%	86%	-43%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-18%	0%	52%	-53%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-46%	-34%	0%	-69%
	FE Combinado MDL	74%	114%	225%	0%
$\Delta\%$ 2015	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	23%	100%	-39%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-19%	0%	63%	-50%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-50%	-39%	0%	-69%
	FE Combinado MDL	63%	100%	227%	0%
$\Delta\%$ Média	F.E. Matriz energética Cenário A	0%	14%	209%	-45%
	F.E. Matriz energética Cenário B	-12%	0%	176%	-51%
	F.E. Inventário (MCTI, 2016)	-65%	-59%	0%	-81%
	FE Combinado MDL	86%	111%	460%	0%

Lourenço (2016).

## ANEXO B

Inventário de dados para hidroelétrica binacional de Itaipu.

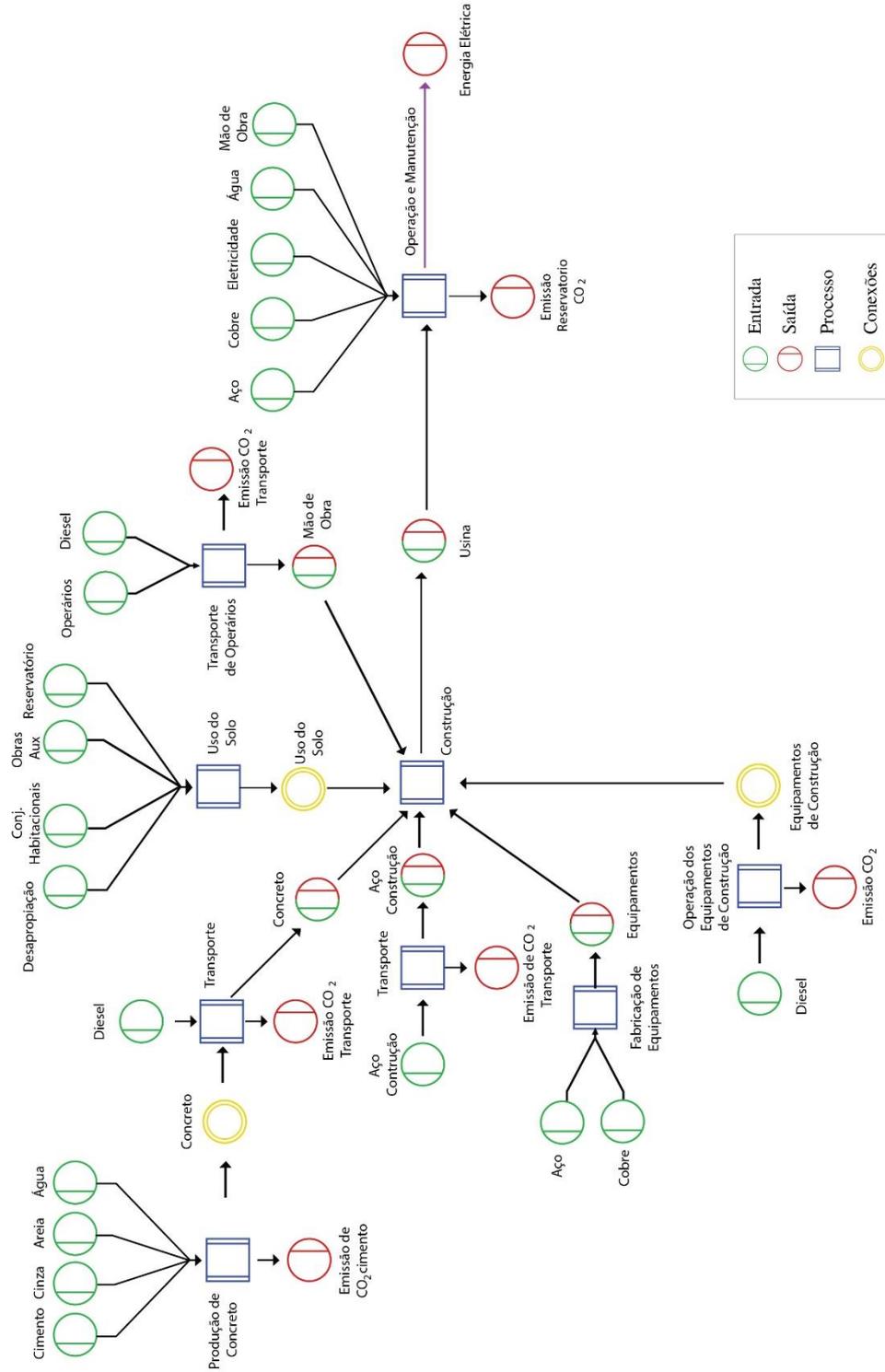
INVENTÁRIO DE DADOS				
Material	Destino Material		Quantidade Total	Unidade
Aço	Aço Total		1.266.378.000	Kg
	Aço Total	Construção	797.000.000	Kg
	Aço Total	Operação	469.378.000	Kg
	Equipamentos permanentes	Construção	281.256.000	Kg
	Equipamentos permanentes	Operação	469.378.000	Kg
	Estrutural (concreto)	Construção	481.223.640	Kg
	Equipamentos canteiro	Construção	37.991.340	Kg
Cobre	Cobre Total		21.803.000	Kg
	Cobre Total	Construção	5.480.000	Kg
	Cobre Total	Operação	16.323.000	Kg
Diesel	Diesel Total		512.000.000	Kg
	Diesel Total	Construção	480.256.000	Kg
	Diesel Total	Operação	31.744.000	Kg
	Operação máquinas		343.552.000	Kg
	Transporte Cimento		16.384.000	Kg
	Transporte Operários		4.096.000	Kg
	Transporte aço estrutural		3.584.000	Kg
	Transporte cinzas		2.560.000	Kg
Concreto	Total Concreto Armado		31.500.000.000	Kg
	Total cimento		2.475.828.071	Kg
	Consumo de Cinza de Termoelétrica adicionada ao cimento		299.519.053	Kg
	Consumo de água concreto		2.158.000	m <sup>3</sup>
	Consumo de Agregados		18.714.094.160	Kg
	Consumo de areia		3.013.000.000	Kg
	Emissões Cimento		942,00	Kg CO2/ton cimento
Água	Total de Água	Construção	2.160.000.000	kg
	Total de Água	Operação	0	Kg
Emissões	Reservatório	CO2	62.415	Kg CO2/km <sup>2</sup> /ano
		CH4	7.592	Kg CO4/km <sup>2</sup> /ano
	Trasporte por caminhão	Total transporte	4.800.000.000	t.km
		Transporte Cimento	3.197.000.000	t.km
		Transporte Aço	904.000.000	t.km
		Trasporte Cinza	390.000.000	t.km
		Trasporte Diesel	306.000.000	t.km
		FE Transp. caminhão	0,022	kgCO2/t.km
	Transporte por ônibus	Transporte ônibus	15.000.000,000	Km
		FE Transp.ônibus	0,001	Kg CO2/km
Equipamentos de Construção	CO2	926.300.000	Kg	
	NOx	12.587.000	Kg	

<b>Material</b>	<b>Destino Material</b>	<b>Quantidade Total</b>	<b>Unidade</b>
<b>Uso do solo</b>	Área Total	145.345	ha
	Área oficial reservatório	135.000	ha
	Desapropriação	8.600	ha
	Conjuntos habitacionais	974	ha
	Obras auxiliares	771	ha
<b>Operação/ Manutenção</b>	Aço	469.378.000	Kg
	Cobre	16.323.000	Kg
	Consumo Interno Eletricidade	473	MWh
<b>Geração de empregos</b>	Fase de construção (média)	20.000	Colaboradores
	Fase de operação (atual)	3.050	Colaboradores

Fonte: Ribeiro (2003) adaptado pelo autor.

### ANEXO C

Rede de fluxo para construção e geração de energia hidroelétrica estruturada pelo software Umberto



Fonte: Lourenço (2016)