
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

CÁSSIO FLORISBAL DE ALMEIDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA:
ESTUDO DE CASO EM UMA USINA TERMELÉTRICA
BICOMBUSTÍVEL NA AMAZÔNIA

Orientador: Luiz Fernando de Abreu Cybis

Porto Alegre
Abril 2017

CÁSSIO FLORISBAL DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA:
ESTUDO DE CASO EM UMA USINA TERMELÉTRICA
BICOMBUSTÍVEL NA AMAZÔNIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção de título de Mestre.

Orientador: Luiz Fernando de Abreu Cybis

Porto Alegre

Abril 2017

CIP - Catalogação na Publicação

de Almeida, Cássio

Avaliação do Ciclo de Vida: Estudo de caso em uma Usina Termelétrica Bicomustível na Amazônia / Cássio de Almeida. -- 2017.

139 f.

Orientador: Luiz Fernando Cybis.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Termelétricidade . 3. Impactos Ambientais. 4. Gás Natural. 5. Óleo Combustível Pesado. I. Fernando Cybis, Luiz, orient. II. Título.

CÁSSIO FLORISBAL DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO EM UMA USINA
TERMELÉTRICA BICOMBUSTÍVEL NA AMAZÔNIA**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção de título de Mestre.

Aprovado em: __ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dra. Ana Passuello - UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Beluco - UFRGS

Prof. Dr. Rafael Zortea - IFSUL

Porto Alegre

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo incondicional apoio. Agradeço aos meus pais por sempre estarem dispostos a me ajudar, não só para o bom andamento do mestrado, mas na vida de forma geral.

Agradeço também a minha namorada por sempre estar presente. Começamos como meros estudantes de escolas públicas e, juntos, evoluímos a níveis que nem eu esperava. Obrigado pelo companheirismo e amor durante esta jornada.

Ao meu amigo e colega pesquisador Vinícius Gonçalves Maciel pela ajuda prestada a mim e a este trabalho. Com certeza, sem sua ajuda este trabalho ainda não estaria finalizado. Agradeço também seu incentivo por ver neste trabalho potencial para publicação em revistas científicas e, por fim, sua parceria para redigi-los.

Ao pessoal do Laboratório de Saneamento, que tanto batalham por esta linha de pesquisa. Em especial ao meu colega Malaquias Tsambé, que, assim como eu, trabalha na área de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e foi um ótimo companheiro nas leituras deste trabalho e dos artigos.

Ao orientador, Luiz Fernando Cybis, pela oportunidade de desenvolver este trabalho (que me fez conhecer a Amazônia!), pela confiança em meu trabalho e pelas conversas divertidas que tivemos durante o mestrado.

À empresa Água e Solo por fornecer o software utilizado na avaliação e ao pessoal da Usina Termelétrica em Manaus por me receberem e fornecerem os dados necessários para a realização deste trabalho.

À UFRGS, que já me formou como Engenheiro Ambiental e me aturou por mais 2 anos no mestrado.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

EPÍGRAFE:

“O que a lagarta chama de fim do mundo; o homem chama de borboleta”
(Richard Bach)

RESUMO

Este estudo apresenta uma avaliação ambiental de uma Usina Termelétrica (UTE) bicomcombustível na região amazônica brasileira. A UTE foi originalmente desenvolvida para usar Óleo Combustível Pesado (HFO, em inglês), mas com a extração de Gás Natural (GN) da bacia Amazônica, a UTE foi modificada para utilizar GN e HFO concomitantemente. Para observação das diferenças, foi realizado um estudo comparativo desta UTE em duas situações: utilizando somente HFO e usando HFO e GN concomitantemente. A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida foi conduzida do “berço-ao-portão”. O método CML *baseline* foi utilizado para avaliar os impactos *midpoint*. Dados primários foram coletados através de visitas pessoais para as emissões ambientais, efluentes hídricos, combustíveis utilizados e especificações técnicas da UTE. Onze categorias de impactos foram consideradas e análise de Monte Carlo (MC) foi empregada para fornecer maior robustez aos resultados. O estudo mostrou que processos à montante têm maiores impactos, exceto para Potencial de Aquecimento Global (PAG), Eutrofização, Acidificação, Toxicidade Humana e Oxidação Fotoquímica, onde a UTE apresentou as maiores contribuições. A conversão para o modo bicomcombustível resultou em menor contribuição da UTE nos impactos, como por exemplo, a redução de 61,1% em Potencial de Eutrofização (PE). Além disso, a UTE bicomcombustível tem, ao longo do ciclo de vida, quando comparada à operação somente com HFO, seis potenciais impactos menores de onze impactos avaliados. Além disso, análise de MC mostrou que o PE e o Potencial de Acidificação (PA) são menores na operação bicomcombustível em 100% dos casos. Ainda, uma interessante observação é que os resultados do PAG pela Análise de MC mostram que não há diferenças estatísticas entre os dois modos de operação.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Termelétricidade. Gás Natural. Óleo Combustível Pesado.

ABSTRACT

This study presents an environmental assessment of a bi-fuel Thermal Power Plant (TPP) in the Brazilian Amazon Region. The TPP was originally designed to use Heavy Fuel Oil (HFO), but with the Natural Gas (NG) extraction from Amazon basin, the TPP was modified to use NG and HFO concomitant. For observation of differences, it was performed a comparative study of this power plant in two situations: using only heavy fuel oil and using HFO and NG concomitantly. The life cycle assessment methodology was conducted from “cradle-to-gate”. The CML baseline method was used to assess the midpoint impacts. Primary data were collected by personal visits for environmental emissions, wastewater, fuel used, and technical specifications. Eleven impacts categories were considered and Monte Carlo (MC) Analysis was used to assess and to obtain robust results. The study shows that upstream processes have more impacts except global warming potential, eutrophication, acidification, human toxicity and photochemical oxidation where TPP showed the major contribution. The bi-fuel conversion resulted in lower power plant contributions in the impacts as, for example, a reduction of 61.1 % in Eutrophication Potential. In addition, throughout the life cycle the bi-fuel power plant, when the operation is compared with HFO only, has six potential impacts lower. In addition, MC analysis showed that Eutrophication Potential and Acidification Potential (AP) are smaller in the bi-fuel operation in 100% of the cases. Besides, it is an interesting observation that global warming results by MC analysis showed that there are no statistic differences between the two modes of operation.

Keywords: Life Cycle Assessment. Thermoelectricity. Natural Gas. Heavy Fuel Oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução da Geração de Eletricidade no Brasil ao longo do período 2005-2014.	21
Figura 2- Variação do PIB e do consumo de Energia no Brasil.	27
Figura 3- Conversão de Energia em uma Termoelétrica.	28
Figura 4- Sistema Interligado Nacional.	30
Figura 5- Vista esquemática de um gasoduto.	32
Figura 6- Cadeia de Produção do GNL.	34
Figura 7- Bacia dos Solimões.	36
Figura 8- Gasoduto Urucu-Coari-Manaus.	36
Figura 9- Frações de Destilação do Petróleo.	37
Figura 10- Esquemático do Ciclo Rankine.	39
Figura 11- Esquemático do Ciclo Brayton.	40
Figura 12- Ciclo Diesel.	41
Figura 13- Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do óleo combustível.	42
Figura 14- Esquemático de uma Usina com ciclo combinado.	44
Figura 15- Estrutura da ACV.	48
Figura 16- Ciclo de vida de um produto juntamente com o sistema de produto;	48
Figura 17- Fluxograma de um processo Genérico.	54
Figura 18- Divisão do processo em Subprocessos.	55
Figura 19- Estrutura da AICV e caracterização <i>Midpoint</i> e <i>Endpoint</i>	60
Figura 20- Procedimentos inerentes à AICV.	65
Figura 21- Fronteiras do Sistema e Escopo de Análise.	71
Figura 22- Grupo Gerador utilizado na UTE.	73
Figura 23- Diagrama do sistema HFO.	74

Figura 24- Resultados caracterizados relativos para entrega de 1mwh (UF) da UTE operando com HFO	98
Figura 25- Resultados caracterizados relativos para entrega de 1mwh (UF) da UTE operando no modo bicomcombustível.....	100
Figura 26- Resultados caracterizados comparativos entre os modos de operação da UTE para a entrega de 1 MWh(UF).....	103
Figura 27- Contribuição dos processos nos diferentes modos de operação.	105
Figura 28- Análise de Sensibilidade para alterações de distância no transporte por navio do HFO.	109
Figura 29- Análise de Sensibilidade para alterações localização da Extração.....	110
Figura 30- Análise de Sensibilidade para diferentes proporções de uso dos combustíveis.	111
Figura 31- Análise de Incerteza para o modo de operação bicomcombustível.....	113
Figura 32-Análise de Monte Carlo – Comparação entre Modo bicomcombustível (A) e somente com HFO (B).....	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Potencias Instaladas dos Empreendimentos em Operação.....	22
Quadro 2 - Participação dos Diferentes Tipos de Combustíveis na geração Termelétrica	31
Quadro 3- Matriz energética do Gás Natural no Brasil.	35
Quadro 4- Matriz Elétrica de Derivados de Petróleo no Brasil.	38
Quadro 5- Exemplo de Função, Unidade funcional e fluxo de referência para embalagens.	50
Quadro 6- Pontos fortes e fracos das diferentes fontes de informação	52
Quadro 7- Disponibilidade de categoria de Impacto por Método.	63
Quadro 8- Modelos e categorias de Impacto sugeridas para o contexto brasileiro.	64
Quadro 9- Valores de Entrada da Equação 1.....	79
Quadro 10- - Relatórios de fontes estacionárias analisadas	80
Quadro 11- Fatores de Emissão (kg/kcal)	82
Quadro 12- Poder Calorífico Inferior (PCI) dos combustíveis empregados na UTE.....	82
Quadro 13- Taxas de Emissão de CO ₂ e CO para os combustíveis utilizados na UTE.	83
Quadro 14- Parâmetros utilizados na carga poluidora da UTE.....	84
Quadro 15- Geração de Borra Oleosa.....	85
Quadro 16- Produtos Químicos utilizados na UTE.	86
Quadro 17- Processos da Base de Dados para as substâncias utilizadas.....	87
Quadro 18- Parâmetros utilizados na avaliação.	91
Quadro 19- Energia recebida na Sub Estação por mês.....	93
Quadro 20- ICV para a UTE no modo de operação somente com HFO.	94
Quadro 21- ICV para o modo de operação bicomcombustível.	95
Quadro 22- Resultados caracterizados absolutos para entrega de 1MWh (UF) da UTE operando com HFO	97

Quadro 23- Resultados caracterizados absolutos para entrega de 1MWh (UF) da UTE operando no modo bicombustível.....	99
Quadro 24- Potenciais Impactos da UTE nas diferentes configurações e sua variação em relação ao modo de operação com HFO.....	102
Quadro 25- Identificação dos processos com contribuições relevantes para cada categoria de impacto.....	106
Quadro 26- Identificação das substâncias com contribuições relevantes para cada categoria de impacto.....	107
Quadro 27- Distâncias entre os portos da Venezuela e o de Manaus.....	128
Quadro 28- Entradas e Saídas da UTE operando com HFO.	129
Quadro 29 - Entradas e Saídas da UTE operando no modo bicombustível.	130
Quadro 30- Parâmetros qualitativos dos efluentes (operação somente com HFO).	132
Quadro 31- Parâmetros qualitativos dos efluentes (operação bicombustível).	134
Quadro 32- Consumo de HFO e geração de borra (operação somente com HFO).....	137
Quadro 33- Consumo de HFO e geração de borra (operação bicombustível).....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados da Análise de Incerteza para o modo de operação bicom bustível.	112
---	-----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACS	American Chemical Society
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ADHB	Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
AP	Área de Proteção
BAHIAGÁS	Companhia de Gás da Bahia
BIG	Banco de Informações de Geração
BOGPM	Base Operacional Geólogo Pedro de Moura
CAS	Chemical Abstracts Service
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CIGAS	Companhia de Gás do Amazonas
COGEN	Associação Portuguesa de Cogeração
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EEA	European Environment Agency
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EOL	Central Geradora Eólica
EP	Ecotoxicidade Potencial
EPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
EPA	U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FE	Fatores de Emissão
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas
GD	Gás- Diesel
GEPEA	Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia de Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
GLP	Gás Liquefeito do Petróleo
GN	Gás Natural
GNL	Gás Natural Liquefeito
GWP	Global Warming Potential
GWP100	Potencial de Aquecimento Global para horizonte de tempo de 100 anos
HFO	Heavy Fuel Oil/ Óleo Combustível Pesado
HRSG	Heat Recovery Steam Generator

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional para a Normalização
JRC-IES	Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability
LFO	Óleo Combustível Leve
MC	Monte Carlo
MG	Minas Gerais
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MRI	Midwest Research Institute (MRI)
NBR	Normas Brasileiras
PA	Potencial de Acidificação
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PE	Potencial de Eutrofização
PEA	População Economicamente Ativa
PEN	Potencial de Enriquecimento de Nutrientes
PFOF	Potencial de Formação de Oxidante Fotoquímico
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PPT	Programa Prioritário de Termelétricidade
PTH	Potencial de Toxicidade Humana
REMAN	Refinaria Isaac Sabbá
REPA	Resource and Environmental Profile Analysis
RJ	Rio de Janeiro
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SI	Sistema Isolado
SIN	Sistema Interligado Nacional
SUFRAMA	Superintendência da Zona Franca de Manaus
TAESA	Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A.
TPB	Tonelada de Porte Bruto
TRANSPETRO	Petrobrás Transporte S.A
UF	Unidade Funcional
UFV	Central Geradora Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural
UTE	Usina Termelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear

UV

WMO

ZFM

Radiação Ultravioleta

Organização Meteorológica Mundial

Zona Franca de Manaus

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
C ₂ H ₂ eq	Etileno equivalente
CFC-11	Clorofluorcabono 11
CH ₄	Metano
Cl-	Cloreto
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Exceto Metano
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GWh	Gigawatt hora
h	hora
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kJ	Kilojoule
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt.hora
L	Litro
m ³	Metro Cúbico
mg	Miligrama
MJ	Mega Joule
mL	Mililitro
MWh	Megawatt hora
N ₂ O	Óxido Nitroso
Na	Sódio
NH ₃	Amônia
Nm ³	Normal Metro Cúbico
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	Dioxido de Nitrogênio
NOx	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
PM ₁₀	Material Particulado com Diâmetro de 10 micrometros
PO ₄	Fosfato
s	Segundo
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SOx	Oxidos de Enxofre
SST	Sólidos Suspensos Totais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
2.	OBJETIVOS	25
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1.	<i>Questão Energética.....</i>	26
3.2.	<i>Termeletricidade.....</i>	28
3.2.1.	Contexto Histórico	28
3.2.2.	Combustíveis utilizados	30
3.2.2.1.	Gás Natural.....	31
3.2.2.2.	Derivados do Petróleo	36
3.2.3.	Ciclos Termodinâmicos na Geração Termelétrica	38
3.2.4.	Plantas Termelétricas	42
3.2.4.1.	Usinas a Óleo Combustível	42
3.2.4.2.	Usinas a Gás Natural	43
3.2.4.3.	Usinas a Ciclo Combinado	43
3.2.4.4.	Usinas a Motores Alternativos	44
3.3.	<i>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA</i>	<i>45</i>
3.3.1.	Histórico.....	45
3.3.2.	Definição	47
3.3.3.	Etapas da ACV	49
3.3.3.1.	Objetivo e Escopo	49
3.3.3.2.	Análise do Inventário	51
3.3.3.3.	Avaliação dos Impactos.....	58
3.3.3.4.	Interpretação.....	65
3.3.4.	Benefícios e Limitações	66
3.3.5.	Estudos de ACV na área da termeletricidade	68
4.	METODOLOGIA.....	70
4.1.	<i>Objetivo e Escopo</i>	<i>70</i>
4.1.1.	Sistemas contidos na UTE.....	72

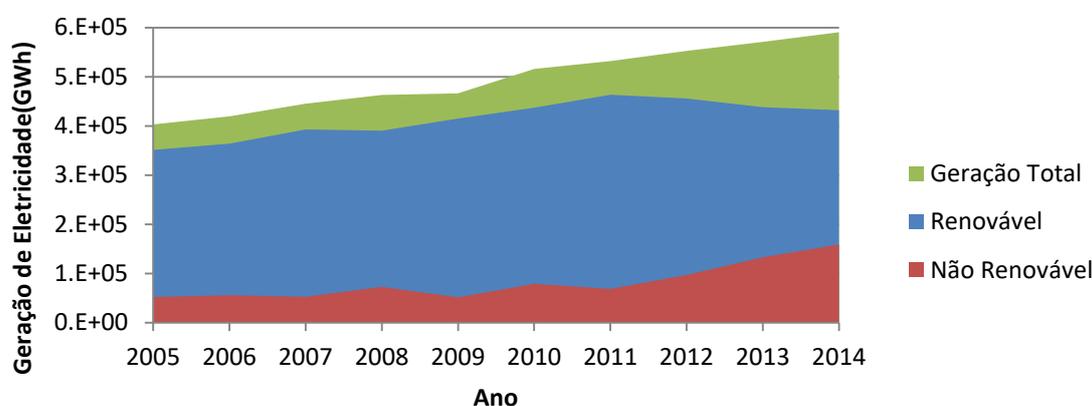
4.1.1.1.	Grupo Gerador.....	72
4.1.1.2.	Sistema de combustível.....	73
4.1.1.3.	Sistema de óleo lubrificante	74
4.1.1.4.	Sistema de ar comprimido	75
4.1.1.5.	Sistema de ar de carga	75
4.1.1.6.	Sistema de resfriamento	75
4.1.1.7.	Sistema de Geração de Vapor.....	76
4.1.1.8.	Sistema de Água Oleosa.....	76
4.1.1.9.	Sistema de Exaustão.....	76
4.2.	<i>Análise do Inventário do Ciclo de Vida</i>	90
4.3.	<i>Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida</i>	91
4.4.	<i>Interpretação</i>	91
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1.	<i>Inventário do Ciclo de Vida</i>	93
5.1.1.	ICV para Operação com HFO	93
5.1.2.	ICV para modo bicomcombustível.....	95
5.2.	<i>Avaliação de Impacto</i>	96
5.2.1.	Operação com HFO.....	96
5.2.2.	Operação Bicomcombustível	99
5.2.3.	Comparação entre modos de operação	101
5.3.	<i>Interpretação</i>	106
5.3.1.	Análise de Contribuição	106
5.3.2.	Análise de Sensibilidade	108
5.3.2.1.	Distância percorrida por navio;	109
5.3.2.2.	Localização da Extração e Processamento do HFO	110
5.3.2.3.	Diminuição do Consumo de HFO	111
5.3.3.	Análise de Incertezas.....	112
5.3.3.1.	Dos Impactos.....	112
5.3.3.2.	Entre os Sistemas de Produto	113

6.	CONCLUSÃO.....	116
7.	RECOMENDAÇÃO.....	119
8.	REFERÊNCIAS.....	120
9.	APÊNDICES	128
	<i>APÊNDICE A</i>	<i>128</i>
	<i>APÊNDICE B</i>	<i>129</i>
	<i>APÊNDICE C.....</i>	<i>130</i>
10.	ANEXOS	132
	<i>ANEXO A</i>	<i>132</i>
	<i>ANEXO B</i>	<i>134</i>
	<i>ANEXO C.....</i>	<i>137</i>
	<i>ANEXO D.....</i>	<i>138</i>

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um País com cerca de 204 milhões de habitantes (BRASIL, 2015a), segundo estimativas para o ano de 2015 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Em 2010, segundo o Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (ADHB) - base de dados do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) - mostra que 98,58 % da população em domicílios tinham energia elétrica. Como ambos indicadores apresentam uma tendência em crescimento (população e disponibilização do serviço de energia elétrica), a geração deve acompanhar tais aumentos, como se pode perceber na Figura 1, onde se apresenta a geração elétrica e a participação da energia renovável e a não renovável.

Figura 1- Evolução da Geração de Eletricidade no Brasil ao longo do período 2005-2014.



Fonte: Adaptado de BRASIL (2015b).

Ao longo do período, houve um incremento de 47% na geração elétrica. A participação da energia renovável, que no ano de 2005 era cerca de 87% de participação na geração, caiu, em 2014, para 73 %. Por outro lado, a energia não renovável, cresceu de 13 % em 2005 para 27 % em 2014.

Para um entendimento da condição atual, coletaram-se informações no Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o qual é um sitio online onde é possível pesquisar a condição do sistema atual, que é apresentada no Quadro 1. É possível perceber que há uma prevalência das Usinas Hidrelétricas (61%), seguido das Usinas Termelétricas (27,72%), as quais ainda têm uma grande tendência em crescimento, visto que, segundo as informações da ANEEL, as usinas termelétricas apresentam o maior aporte energético dos empreendimentos que serão construídos, com 38,7 %, seguido das Usinas Eólicas, com 33,4% da potência (ANEEL, 2016),

Quadro 1- Potencias Instaladas dos Empreendimentos em Operação.

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada* (kW)	%**
CGH	554	4,25E+05	4,27E+05	0,30
EOL	370	9,09E+06	9,02E+06	6,23
PCH	448	4,83E+06	4,82E+06	3,33
UFV	39	2,70E+04	2,30E+04	0,02
UHE	218	1,01E+08	8,84E+07	61,03
UTE	2896	4,19E+07	4,01E+07	27,72
UTN	2	1,99E+06	1,99E+06	1,37
Total	4527	1,59E+08	1,45E+08	100

Fonte: BIG/ANEEL (2016).

Nota: CGH: Central Geradora Hidrelétrica/ EOL: Central Geradora Eólica/ PCH: Pequena Central Hidrelétrica/ UFV: Central Geradora Fotovoltaica/ UHE: Usina Hidrelétrica/UTE: Usina Termelétrica/ UTN: Usina Termonuclear.

*:A Potência Fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

** : Os valores de porcentagem são referentes à Potência Fiscalizada

Dessa forma, pode-se concluir que, com o aumento do uso das usinas termelétricas, há um incremento do uso das fontes energéticas não renováveis (gás natural, óleo combustível, carvão, etc), tornando a matriz energética brasileira mais “suja”. A utilização de tais combustíveis para obtenção de energia é a principal fonte de emissão de Óxidos de Enxofre (SO_x, SO₂), óxidos de Nitrogênio (NO_x, NO e NO₂), Monóxido e Dióxido de Carbono (CO e CO₂, respectivamente), além de outros gases (GOLDEMBERG; VILLANUEVA; 2003). Estes gases contribuem para impactos como acidificação terrestre e aquática, aquecimento global, entre outros (HEIJUNGS et al., 1992; IPCC, 2013). Há outros impactos relacionados às termelétricas. Por exemplo, nos Estados Unidos (EUA) a maior retirada de água é para usinas termelétricas (CHANDEL et al., 2011), sendo que 41% das retiradas totais de água naquele País, em 2005, foram para esta destinação (KENNY et al., 2009). Ainda, conforme Chandel et al. (2011), o principal uso de água em termelétricas é para o sistema de arrefecimento.

A produção de energia na Amazônia é crucial para o desenvolvimento da região, sendo que ela é fortemente provinda de fontes termelétricas locais. Isso ocorre devido à grande dispersão geográfica dos consumidores e da pequena demanda por energia elétrica, sendo considerada de alto custo devido sua difícil logística e operacionalização (BONFIM, 2008). Também, devido aos mesmos motivos, energia limpas são de difícil implantação, entretanto há um potencial significativo de energia fotovoltaica nesta região (MARTINS et al., 2008). Outra possibilidade, para energia renováveis, seriam as construções de hidrelétricas, devido

ao alto potencial hidrelétrico, entretanto os reservatórios exigiriam a inundação de áreas maiores devido ao relevo plano da Amazônia (BRASIL, 2013).

Um dos principais consumidores da região é a Zona Franca de Manaus (ZFM). A Zona Franca é um regime aduaneiro especial, onde há comércio de importação e exportação com incentivos fiscais especiais (ALMEIDA, 2011). Com a existência dessa área, a região de Manaus tornou-se bastante dependente das indústrias que lá estão. Maciel et al. (2003) traz uma avaliação em termos dos impactos sociais e econômicos da presença da zona franca por meio da percepção do aumento dos seguintes indicadores: crescimento populacional, População Economicamente Ativa (PEA), desempenho das exportações, crescimento do emprego no setor industrial, Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), Produto Interno Bruto (PIB), entre outros. Segundo a Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), o pólo Industrial de Manaus possui aproximadamente 600 indústrias de alta tecnologia gerando mais de meio milhão de empregos (SUFRAMA, 2016). Nesse sentido, uma grande parte dos produtos colocados no mercado nacional é produzida na região Amazônica. Com isso, como o sistema elétrico é ainda isolado, essa grande fatia de produtos, em seu ciclo de vida de produção, recebe energia do setor termelétrico da região. Dessa maneira, o aporte de Gás Natural é interessante não apenas para diminuição dos impactos de produção de energia propriamente dita, mas para todas as indústrias que utilizam a energia fornecida por as UTEs da região.

Em face da crescente demanda energética e da necessidade de um meio ambiente ecologicamente equilibrado, são necessárias reflexões em torno da geração de energia a partir de fontes não renováveis e seus consequentes impactos. Neste contexto, uma maneira de analisar a cadeia de produção da energia a partir da termelétricidade é a utilização da ferramenta de gestão ambiental intitulada Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Segundo a Norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a, p.2), a ACV é “uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto”.

A ACV analisa as entradas, saídas e os impactos ambientais associados à produção durante todas as etapas ao longo da vida de um produto ou de um serviço. Isto inclui desde a extração dos recursos usados na sua confecção, até a sua produção, uso, reciclagem e descarte final de seus resíduos. Assim, devido a essa abordagem holística, os estudos de ACV ajudam a evitar que a solução de um problema ambiental num ponto do ciclo de vida acabe gerando problemas à jusante ou a montante do processo produtivo. Dessa maneira, muitas vezes, o conhecimento necessário para realizar uma ACV perpassa as fronteiras de apenas uma

organização, pois geralmente a cadeia produtiva de um determinado produto é composta por inúmeros atores diferentes (REBITZER et al., 2004). Por exemplo, uma usina termelétrica é operada por uma empresa, enquanto que o gás natural é fornecido por outra e os materiais utilizados na operação por uma terceira.

Dessa forma, o objetivo principal da ACV é quantificar e qualificar todas as etapas envolvidas na produção de um determinado produto ou de um serviço, desde a retirada do recurso natural que virá a ser a matéria-prima até a disposição final dos resíduos gerados durante a produção do produto em questão (ABNT, 2009a). Devido a essa abrangência, há um fluxo enorme de informações necessárias para caracterizar os processos envolvidos na produção. Por exemplo, uma vez desenhado um sistema de produto, pode-se mudar determinada matéria-prima e analisar os ganhos ambientais envolvidos, ou até mesmo os custos gerados ou evitados. Para a questão da termelétricidade, pode-se comparar uma usina termelétrica a carvão ou a gás natural e analisar as vantagens e desvantagens associadas.

Portanto, a ACV é uma ferramenta poderosa de apoio a decisões e válida para medir o desempenho ambiental de uma usina termelétrica, bem como ser um norteador para a melhoria na operação, pois tem a capacidade de apontar os pontos mais problemáticos do ciclo de vida da produção (NOBEL, 2007). Neste trabalho, a ACV será utilizada para analisar os impactos ao longo do ciclo de vida da geração elétrica de uma Usina Termelétrica bicomcombustível, localizada em Manaus, em diferentes configurações de operação, visto que ela utiliza diferentes proporções de combustíveis.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a comparação dos impactos ambientais causados pela operação de uma usina termelétrica em diferentes configurações de operação. Para tanto, será empregada a metodologia de ACV de uma Usina Termelétrica, localizada no estado do Amazonas, próxima a capital Manaus, em duas configurações de operação, a saber:

- Utilizando somente óleo combustível pesado (HFO, em inglês);
- Utilizando Gás Natural (GN) e HFO em proporções de uso real.

Esta avaliação incluirá todos os processos constituintes da produção de energia à montante da usina propriamente dita, ou seja, não será analisada a distribuição e uso da energia gerada, sendo uma análise intitulada como “*cradle-to-gate*” (do berço ao portão). Entenda-se como portão, a entrada da eletricidade na rede de distribuição.

Para consecução do objetivo geral, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a análise dos insumos utilizados pela Usina Termelétrica (UTE) por meio de relatórios internos;
- Caracterizar e calcular os fluxos de saídas (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos) na geração de energia da UTE;
- Elaborar o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da UTE por meio da consolidação dos objetivos anteriores;
- Avaliar os possíveis impactos ambientais associados à geração de energia elétrica nas duas configurações selecionadas, utilizando o método de avaliação de impacto CML IA *baseline*;
- Comparação dos resultados encontrados nas duas configurações analisadas;
- Identificar as atividades de produção que possuem contribuição significativa para os impactos potenciais totais associados ao produto;
- Realizar Análises de Sensibilidade visando à alteração de alguns parâmetros para verificação da influência deles nos resultados de impactos;
- Realizar Análise de Incertezas por meio da simulação de Monte Carlo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de tornar mais didático o entendimento das ideias desenvolvidas neste trabalho, estruturou-se esse capítulo conforme a lógica utilizada em sua elaboração.

Dessa maneira, este capítulo iniciará com uma discussão acerca da questão energética no Brasil. Em seguida, analisar-se-á a termelétricidade, desde seu contexto histórico, uso e representação na matriz energética brasileira, bem como os processos envolvidos nas usinas termelétricas, tais como os combustíveis utilizados, os ciclos termodinâmicos e as diversas plantas térmicas.

No restante do capítulo, o tema será ACV, sendo abordado seu histórico, sua definição, benefícios, limitações, etapas constituintes, requerimentos, limitações entre outros assuntos associados a esta temática. Além disso, serão abordados alguns dos estudos de ACV na área da termelétricidade.

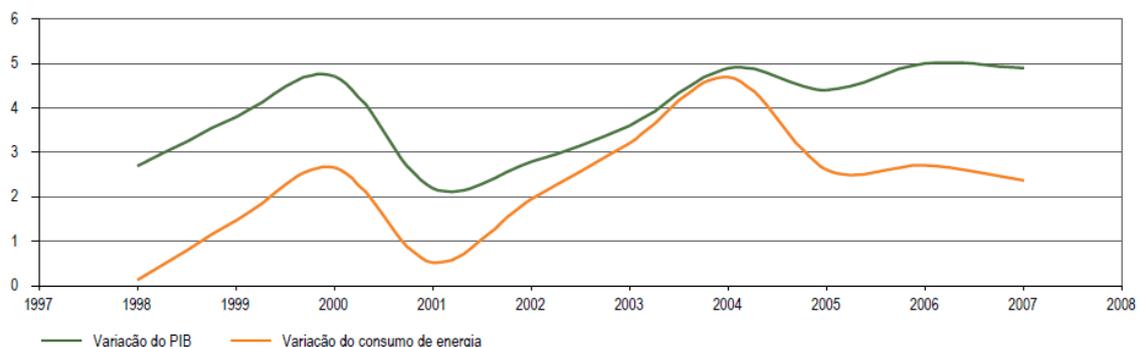
3.1. Questão Energética

A energia é o fator determinante para o desenvolvimento econômico e social, ao fornecer apoio mecânico, térmico e elétrico às ações humanas (ANEEL, 2008). Durante a Idade Média, a energia era oriunda de cursos d'água e dos ventos (GOLDEMBERG; LUCON, 2007), no entanto com o aumento da população, essas fontes energéticas tornaram-se insuficientes. Um marco histórico, em termos de energia, foi a Revolução Industrial, que trouxe o advento da máquina a vapor, que impulsionou a produção para uma escala muito maior (CAVALCANTE; SILVA, 2011). Nesse período também houve a evolução no uso dos combustíveis fósseis, para o suprimento de energia requerido pela expansão da produção. Nesse sentido, as sociedades, de maneira geral, utilizam energia para satisfazer inúmeras necessidades (MMA, 2010), tais como:

- **Calor:** para cozinhar em domicílios, em comércios, etc;
- **Eletricidade:** para iluminação, refrigeração, força motriz nos setores domiciliar, comercial e industrial;
- **Combustíveis líquidos ou gasosos:** para o setor de transporte;
- **Combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos:** para os setores industrial e comercial.

A diversidade de uso da energia, mostrada nos itens anteriores, está atrelada ao nível de qualidade de vida e ao ritmo de atividade dos setores da economia. A relação entre economia e consumo de energia pode ser visualizada na Figura 2, que associa o consumo energético ao Produto Interno Bruto (PIB), que é um indicador da atividade econômica do país calculado pelo IBGE.

Figura 2- Variação do PIB e do consumo de Energia no Brasil.



Fonte: ANEEL, 2008.

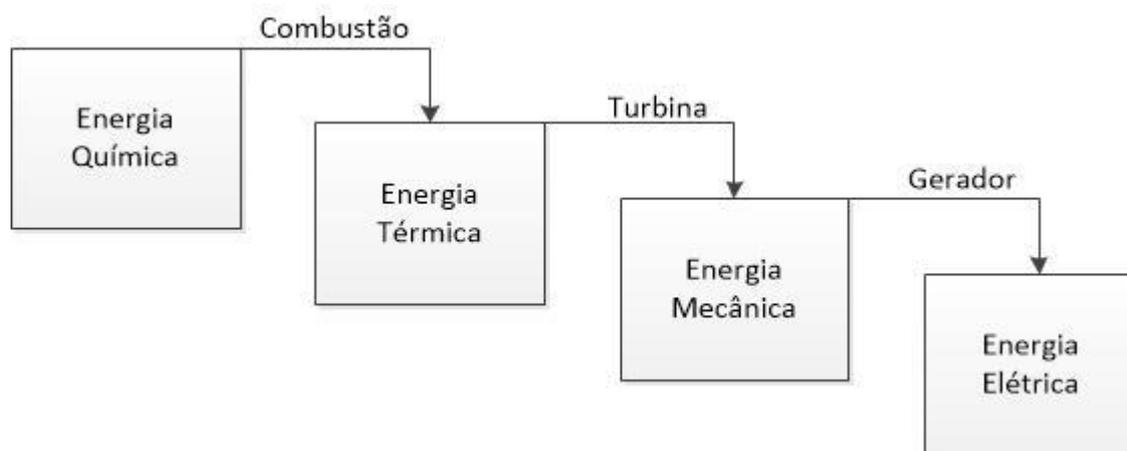
Para suprir esta demanda crescente, as sociedades utilizaram, num primeiro momento, principalmente os combustíveis fósseis. No entanto, com aumento da preocupação ambiental a respeito dos problemas relacionados às emissões atmosféricas, entre outros, houve gradativamente o aumento do uso dos combustíveis renováveis, além de tecnologias menos poluentes tais como energia solar, eólica, entre outras. Nesse sentido, o setor energético convive com duas frentes (ANEEL, 2008):

- Desenvolvimento tecnológico que visa atingir maior qualidade e eficiência tanto na produção quanto na aplicação dos recursos energéticos. Como exemplo, pode-se citar o incentivo de pesquisas em combustíveis alternativos, melhorias de processos, entre outros.
- Investimento em ações que visam aumentar o número de pessoas com acesso às fontes de energias mais eficientes. Como exemplo, tem-se a troca da iluminação, que outrora era realizada a partir de lâmpadas para iluminação à energia elétrica. Atualmente, há um movimento parecido, com o crescente uso das lâmpadas de Led, que são mais eficientes e apresenta maior vida útil que às fluorescentes e incandescentes (OLIVEIRA et al, 2007).

3.2. Termeletricidade

Uma usina termelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica (FURNAS, 2016). Basicamente, o funcionamento das centrais termelétricas é semelhante, independentemente do combustível utilizado (AMBIENTEBRASIL, 2016). Primeiramente, em uma usina convencional, há a queima de um combustível (carvão, óleo ou gás) gerando calor que transforma a água em vapor, o qual é utilizado, em alta pressão, para girar uma turbina que, por sua vez, aciona o gerador elétrico. Por fim, a energia é transportada por linhas de alta tensão até os centros de consumo (FURNAS, 2016). De maneira complementar, apresenta-se a Figura 3 que demonstra os diferentes tipos de energia envolvidos no processo.

Figura 3- Conversão de Energia em uma Termoelétrica.



Fonte: Adaptado de Leão (2016)

3.2.1. Contexto Histórico

O setor elétrico brasileiro teve início em meados de 1879, quando foi inaugurada a iluminação elétrica na estação central da ferrovia Dom Pedro II, no Rio de Janeiro e tinha, como fonte de energia, um dínamo (SANTOS, 2012). Em 1883, o Brasil ingressou no ramo da termeletricidade, com a construção da primeira usina termelétrica na cidade de Campos, localizada no estado do Rio de Janeiro (RJ), cujo combustível era a lenha e tinha 52 kW de capacidade instalada. No mesmo ano, foi construída a primeira hidrelétrica brasileira, localizada no Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina (MG) (NEOENERGIA, 2016; CEMIG, 2016), começando o predomínio das hidrelétricas na matriz energética brasileira. No curto espaço de tempo que foi de 1883 a 1900, a capacidade energética instalada no país aumentou 178 vezes, passando de 61 kW para 10.850 kW, dos

quais 53% eram de origem hidrelétrica (NEOENERGIA, 2016). Com o passar do tempo, os investimentos no setor elétrico foram direcionados para as hidrelétricas, em função do grande potencial hídrico que o País apresenta.

No entanto, nas décadas de 80 e 90, a capacidade de geração de energia elétrica no País apresentou crescimento inferior ao consumo (BARDELIN, 2004). De forma a atenuar o problema, o governo federal optou pela implantação de novas termelétricas, cujo combustível empregado seria gás natural, a ser importado da Bolívia. Apesar do avanço das termelétricas a partir do Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT), que ampliou o parque de geração térmica no País, não se conseguiu evitar o racionamento, uma vez que a ampliação levaria, em média, dois anos para estar concluída (BARDELIN, 2004).

O uso das termelétricas está também fortemente relacionado com o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é o sistema de geração e transmissão de energia elétrica, com tamanho e características que permitem considerá-lo como único em âmbito mundial. Este sistema engloba as cinco regiões do Brasil e tem forte predomínio de usinas hidrelétricas (TAESA, 2016), a qual é apresentada na Figura 4.

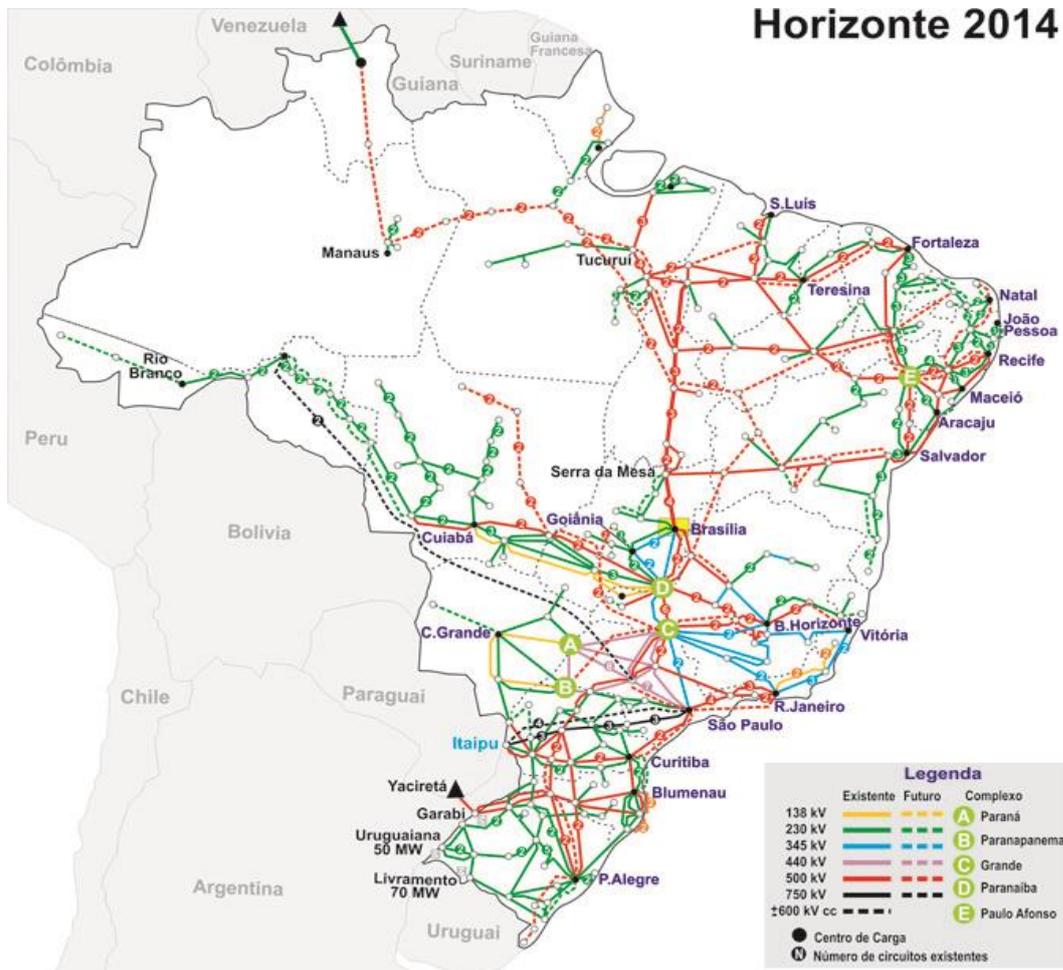
Dessa forma, as termelétricas vêm sendo utilizadas de maneira complementar, como coloca ANEEL (2008):

“As termelétricas, de uma maneira geral, são acionadas para dar reforço em momentos chamados como picos de demanda (em que o consumo sobe abruptamente) ou em períodos em que é necessário preservar o nível dos reservatórios – ou o “estoque de energia”.

Ainda, há diversos sistemas de menor porte que não estão conectados ao SIN e são chamados de Sistema Isolados (SI), os quais se concentram principalmente na região Amazônica. Isto ocorre porque as características geográficas da região, composta por floresta densa e heterogênea, além de rios caudalosos e extensos, dificultaram a construção de linhas de transmissão de grande extensão que permitissem a conexão ao SIN (ANEEL, 2008). Para se ter uma ideia da relação termelétricidade e SI, no SIN, em 2014, havia uma oferta de eletricidade por meio de fonte hidráulica que era de 71% enquanto que de fonte térmica era de 24,1% (BRASIL, 2015c). Por outro lado, nos Sistemas Isolados, essa partição é diferente, ou seja, a participação da fonte hidráulica é 27,5 % enquanto que da fonte térmica é 72,5 % (BRASIL, 2015c). No caso da Amazônia, apesar de a interligação elétrica entre o SIN e o sistema Manaus já ter ocorrido em 2013, permaneceram restrições no sistema de distribuição (ANEEL, 2013), portanto é considerado, ainda, um sistema isolado composto principalmente

por usinas termelétricas. Dessa maneira, essa região é caracterizada pela forte presença das termelétricas.

Figura 4- Sistema Interligado Nacional



Fonte: Taesa (2016).

3.2.2. Combustíveis utilizados

Os principais combustíveis utilizados na geração termelétrica no Brasil, em 2014, são mostrados no Quadro 2. A seguir, serão apresentadas as características dos combustíveis que são utilizados na usina termelétrica em estudo, ou seja, Gás Natural e Óleo Combustível Pesado.

Quadro 2 - Participação dos Diferentes Tipos de Combustíveis na geração Termelétrica

Geração Elétrica por fonte	Participação 2014 (GWh/GWh)
Gás Natural	39,5%
Derivados do Petróleo*	15,6%
Carvão	8,9%
Nuclear	7,5%
Biomassa**	21,9%
Outras***	6,6%

Nota: GWh: Giga watt hora. *: óleo diesel e óleo combustível. **: lenha, bagaço de cana e lixo. ***: recuperações, gás de coqueria e outros combustíveis secundários.

Fonte: Adaptado de BRASIL (2015b).

3.2.2.1. Gás Natural

O Gás Natural (GN) é uma mistura de hidrocarbonetos leves que, em condições normais de temperatura e pressão, encontra-se em estado gasoso. É inodoro, incolor e não-tóxico (BAHIAGÁS, 2005). Na natureza, é encontrado em reservatórios subterrâneos em rochas porosas isoladas do meio ambiente por uma camada impermeável (ANEEL, 2008). O GN pode estar associado ao petróleo, sendo –neste caso- intitulado de gás natural associado ou, caso contrário, gás natural não associado (GOMES, 2010). Sua composição consiste predominantemente de metano e quantidades menores de etano, propano e outros hidrocarbonetos de maior peso molecular, no entanto ainda há a presença de algumas impurezas, como nitrogênio, água e compostos de enxofre (BAHIAGÁS, 2005). É importante destacar que a composição do gás natural varia conforme sua origem geológica (REIS et al, 2005), de acordo com o tipo de matéria orgânica que lhe deu origem, os processos naturais ao qual foi submetido e o processamento em unidades industriais, dentre outros fatores.

O aumento da demanda do GN no Brasil está sendo acelerado devido, principalmente, à preocupação ambiental, já que, em relação a outros combustíveis fósseis, é considerado uma energia limpa (BAIOCO et al, 2007). Isto ocorre pelo fato de que sua composição é rica em metano, que é o hidrocarboneto que apresenta a maior relação de hidrogênio em relação ao carbono, o que favorece a menor formação de CO₂ na reação de combustão (BAHIAGÁS, 2005). Tal crescimento é evidenciado nos dados acerca da geração elétrica a partir do GN. Em 2010, por exemplo, o uso de GN gerou 36.476 GWh (Giga-Watt hora), enquanto que, em 2014, esse valor saltou para 81.075 GWh, representando um crescimento de 122% na geração de energia elétrica a partir desse combustível neste período (BRASIL, 2015b).

Assim como outros combustíveis fósseis, o GN não é utilizado na sua forma bruta, sendo necessárias algumas etapas de processamento. De acordo com Praça (2003), a cadeia produtiva do gás natural pode ser dividida em cinco etapas:

Exploração: consiste na etapa de identificação dos reservatórios, perfuração e instalação de equipamentos para estudo da viabilidade econômica do campo (MAZZEI, 2007). Caso seja viável, ocorrerá a fase de desenvolvimento do campo, a qual é a preparação para produção e extração do gás, com a instalação da infraestrutura necessária à operação do poço e às atividades de perfuração (ANEEL, 2008).

Produção: consiste na etapa de processamento em campo, na qual o GN passa por separadores para a retirada de água e hidrocarbonetos em estado líquido, bem como o transporte até a base de armazenamento. A produção pode ocorrer em terra (*onshore*) ou em mar (*offshore*), sendo esta última a responsável pela maior parte da produção brasileira. (MAZZEI, 2007). Tal colocação é confirmada pela ANEEL (2008, p.99):

“[...] a maior parte das reservas localiza-se no mar e não em terra, principalmente no litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo.”

Processamento: essa etapa ocorre nas Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN), onde o produto é desidratado e fracionado, gerando três subprodutos: o gás natural processado, formado a partir do metano e etano, denominado de gás natural seco (ESPOSITO, 2004); o Gás Liquefeito do Petróleo (GLP), originado do propano e do butano; e a gasolina natural (FIOREZE et al., 2013).

Transporte: pode ser realizado tanto no estado gasoso quanto no líquido. No estado gasoso, o transporte é feito tradicionalmente via gasodutos, até as estações de medição de vazão e redução de pressão. Como coloca Bendenzú (2009, p.36):

“Os gasodutos transportam gás natural na forma gasosa, sendo do tipo “ponto a ponto”. A operação é simples e segura, envolvendo um pequeno número de conexões”

As principais características dos gasodutos são apresentadas na Figura 5, sendo que os componentes e suas utilidades a serem destacados são (GEPEA, 2003):

Figura 5- Vista esquemática de um gasoduto.



- Rede de Tubulação: formada por peças cilíndricas de aço ou de polietileno, que são interconectadas entre si, sendo que a seção dos dutos é projetada para atender o fluxo do gás, enquanto que a espessura para suportar a pressão de operação;
- Proteção Catódica: no caso do material ser ferroso, é adicionado um sistema de eletrodos para efetuar a proteção galvânica, e assim evitar a ocorrência de corrosão;
- Estações de Compressão: são utilizadas para manter a pressão no valor estipulado e compensar as perdas de cargas causadas pelo atrito do GN com o próprio duto, além daquelas causadas pelas interconexões com os demais constituintes do sistema. Por isso são alocados sistemas de compressão por turbinas a gás ou motores elétricos ao longo da rede.
- Válvulas de Bloqueio: são colocadas ao longo do gasoduto para manutenção preventiva e para isolar trechos, em caso de ruptura.
- Regulador de Pressão e de Medição é composto por válvulas de redução de pressão, de bloqueio automático e/ou alívio de pressão. Esse tipo de estação é instalada em cada ponto de entrega com o objetivo de adequar a pressão para o uso, enquanto que os medidores de vazão servem para registrar o GN consumido.

Ainda, há um sistema de Supervisão e Controle que monitora e pode interferir na configuração de operação do gasoduto de acordo com a solicitação do operador e/ou consumidor.

Como visto anteriormente, o transporte do GN pode ocorrer também no estado líquido, na forma de Gás Natural Liquefeito (GNL), sendo que tal deslocamento se justifica quando as quantidades ou distâncias a serem transportadas são tais que se torna economicamente inviável o transporte do GN por gasoduto (ANP, 2010).

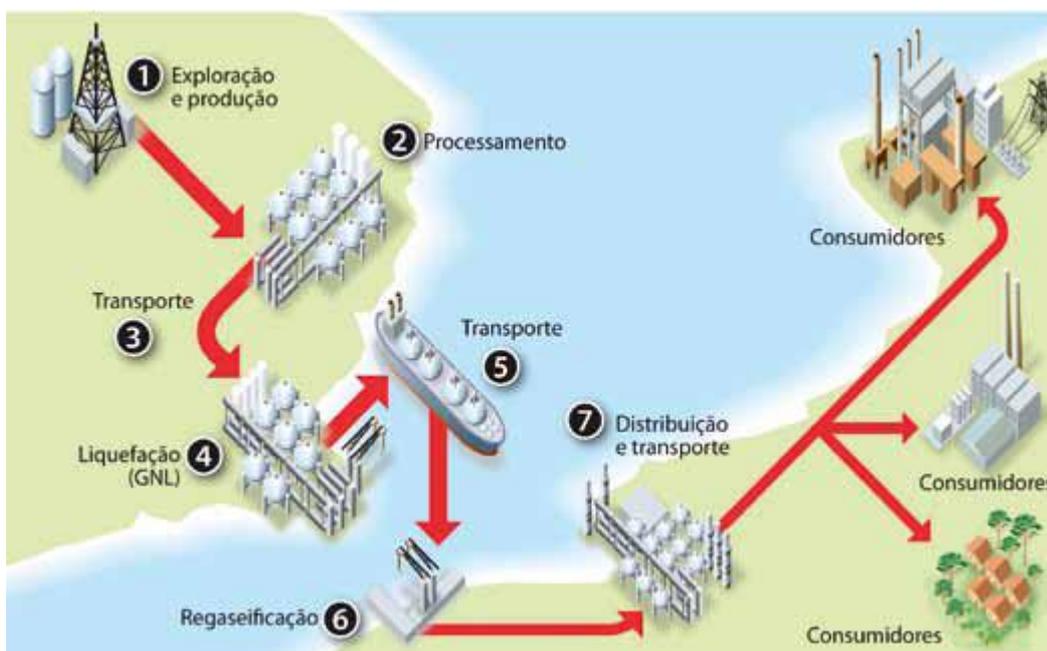
GEPEA (2003) destaca que este tipo de deslocamento é atrativo para longas distâncias, principalmente por mar, pois possibilita o armazenamento do GNL próximo às áreas de consumo. Dessa maneira, é possível atender os picos de demanda de uma maneira otimizada, uma vez que a capacidade de carga é variável, enquanto que – para um gasoduto - a capacidade de escoamento seria a mesma e, portanto, seria subutilizado em períodos de menor demanda. A cadeia de produção do GNL é apresentada na Figura 6. Como se pode perceber,

as etapas são similares às do GN propriamente dito, sendo que as diferenças residem nas etapas de liquefação, transporte e regaseificação.

Segundo a ANP (2010, p.12): “A atividade de liquefação consiste em uma série de processos que visam converter gás natural do estado gasoso para o líquido”. O GN é liquefeito até a temperatura de aproximadamente $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RONCEROS, 2008), reduzindo seu volume em 600 vezes em relação ao volume que ocupava à temperatura ambiente e à pressão atmosférica (ANP, 2010). Apesar de cada planta de liquefação ser única, todas elas realizam os mesmos procedimentos (ANP, 2010, p.12):

“tratamento do gás para a remoção de impurezas e liquefação do produto por meio do processo de resfriamento (até aproximadamente $162\text{ }^{\circ}\text{C}$ negativos, temperatura em que o gás natural liquefaz à pressão atmosférica)”.

Figura 6- Cadeia de Produção do GNL.



Fonte: ANP (2010).

Após essa etapa, o GNL é transportado por navios metaneiros, que são utilizados normalmente no comércio internacional, ou caminhões-tanque, que são mais utilizados para abastecer localidades não atendidas pela malha de gasodutos (ANP, 2010). Independentemente da forma do transporte, ao atingir o seu destino ele terá que ser submetido a um processo de regaseificação, que pode ser realizado em planta própria ou unidade móvel (navios e caminhões), para então ser distribuído no estado gasoso.

Distribuição: geralmente realizada através de gasodutos menores, intitulados como “ramais secundários”, que chegam ao consumidor final (ANEEL, 2008).

No contexto brasileiro, o GN é utilizado para produção de energia, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3- Matriz energética do Gás Natural no Brasil.

Combustível	Número de usinas	Capacidade Instalada (GW)	Porcentagem da Capacidade Instalada no País (%)
Calor de Processo - GN	1	0,04	0,03
Gás Natural	145	12,39	8,27
SOMA	146	12,43	8,29

Fonte: Adaptado de BIG/ANEEL (2016)

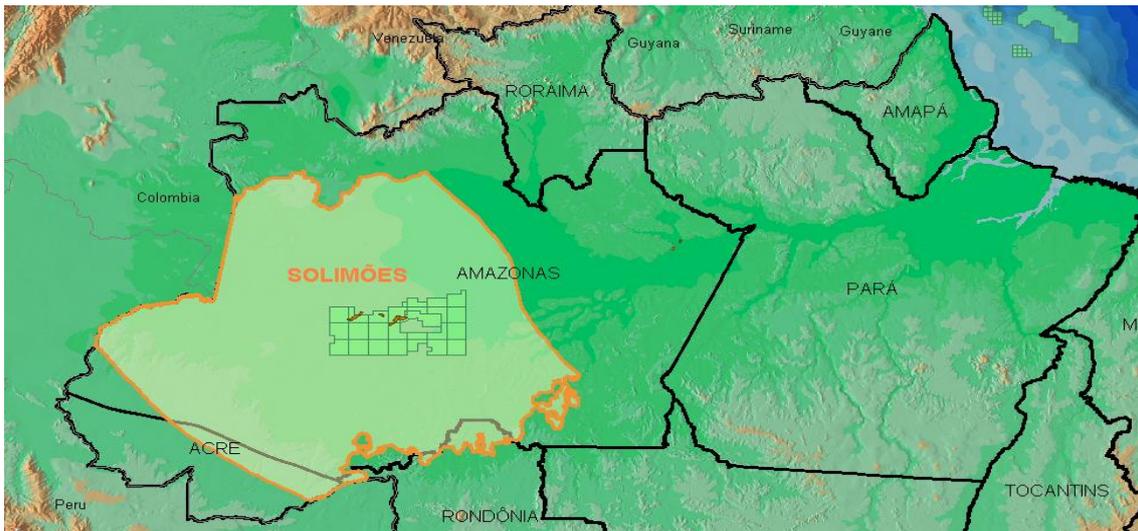
Dessa maneira, as termelétricas movidas a GN representam 8,29% da capacidade instalada no País, sendo a maior entre os combustíveis fósseis utilizados, segundo os dados da ANEEL (2016).

O GN utilizado na UTE deste trabalho é oriundo da Amazônia, proveniente da província de Urucu, localizada na bacia dos Solimões, que é apresentada na Figura 7. Importante destacar que o uso de GN na região está em ascensão devido a esta reserva. Nesse sentido, no período de 2010 a 2012, a Companhia de Gás do Amazonas (CIGAS) realizou investimentos de R\$ 148 milhões em gasodutos de distribuição (CIGAS, 2013).

A Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), localizada em Urucu, constitui o único Ativo de Produção de petróleo e gás da Petrobras na Região Amazônica (PETROBRAS, 2008b). A produção média de petróleo em Urucu é de 56,5 mil barris por dia, enquanto a de Gás Natural é de 9,7 milhões de metros cúbicos por dia (PETROBRAS, 2008b, p.27). O Petróleo extraído em Urucu é de alta qualidade, sendo utilizado para a produção de gasolina, nafta petroquímica, óleo diesel e GLP (PETROBRAS, 2008b), o que é uma exceção no país, visto que o petróleo típico nacional é pesado.

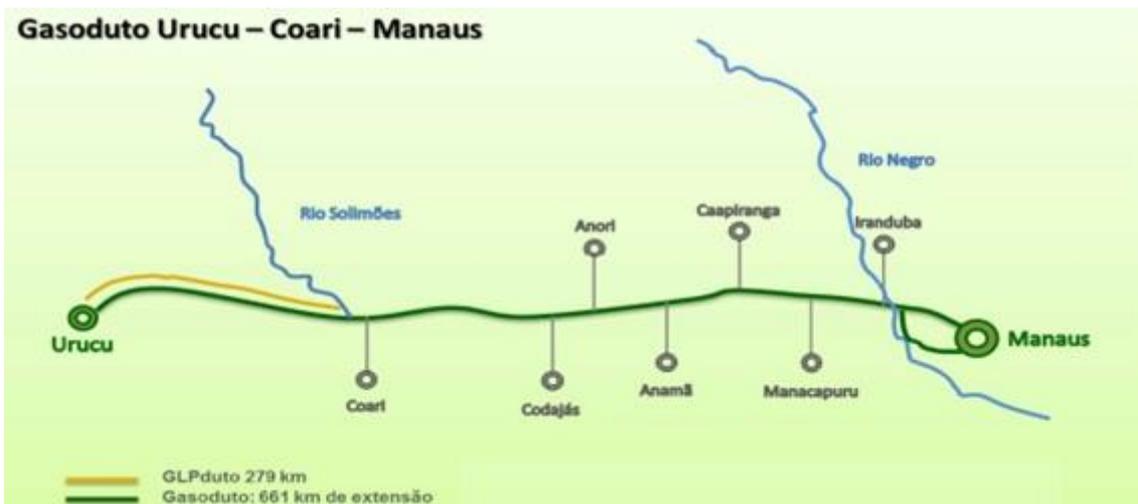
A região da bacia dos Solimões apresenta vastas áreas ainda não avaliadas (LIMA, 2007). A distância entre Urucu e Manaus é cerca de 650 km (PETROBRAS, 2008a) e o transporte do GN entre esses dois locais se dá por meio do gasoduto Urucu-Coari-Manaus, que é mostrado na Figura 8.

Figura 7- Bacia dos Solimões



Fonte: Lima, 2007.

Figura 8- Gasoduto Urucu-Coari-Manaus



Fonte: CIGAS, 2013.

3.2.2.2. Derivados do Petróleo

O petróleo é um óleo inflamável, formado a partir da decomposição, durante milhões de anos, de matéria orgânica como plantas, animais marinhos e vegetação típica das regiões alagadiças, e é encontrado em terreno sedimentar (ANEEL, 2008). O petróleo no seu estado natural é sempre uma mistura complexa de diversos tipos de hidrocarbonetos contendo também proporções menores de contaminantes (enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais) (JUNIOR, 2016). A base de sua composição é o hidrocarboneto, substância composta por carbono e hidrogênio, que podem formar diferentes tipos de petróleo, desde os mais pesados aos mais leves, dependendo das massas molares dos constituintes (NERI, 2016).

O petróleo cru não tem aplicação direta, no entanto é matéria-prima de inúmeros produtos que são derivados, sendo os mais conhecidos: GLP, gasolina, nafta, óleo diesel, querosene de aviação e de iluminação, óleo combustível, asfalto, lubrificante, combustível marítimo, solventes, parafinas e coque de petróleo (ANEEL, 2008).

A fabricação dessa quantidade enorme de derivados é composta por uma cadeia produtiva extensa, que pode ser, basicamente, separada em quatro etapas (JUNIOR, 2016):

Extração: consiste no processo pelo qual o petróleo utilizável é extraído do subsolo, sendo que pode ser *onshore* (em terra) ou *offshore* (abaixo do fundo do mar).

Transporte: consiste no transporte do petróleo extraído (ou óleo cru, como é chamado) até os terminais ou refinarias de óleo, sendo que o deslocamento, geralmente, se dá através de embarcações ou tubulações (oleodutos).

Refino: consiste na etapa de processamento do óleo cru em diversos produtos utilizados nas mais variadas aplicações. Uma refinaria possui uma combinação de processos de destilação e de transformação. Primeiramente, o óleo cru é separado em diversas frações através da destilação atmosférica, a qual é um processo físico de separação, baseado na diferença entre os pontos de ebulição dos compostos coexistentes numa mistura líquida (GURGEL, 2016), resultando nas seguintes frações apresentadas na Figura 9.

Figura 9- Frações de Destilação do Petróleo.



Fonte: Adaptado de Gurgel (2016).

Dessa maneira, os compostos mais pesados (de maior massa molar) apresentam maiores pontos de ebulição e são separados na parte inferior da unidade de destilação, que apresenta maior temperatura, enquanto que os mais leves são separados ao longo da unidade. Ainda, neste processo ocorre a formação de um resíduo bastante pesado, que não se vaporiza, que é – então - encaminhado para outro processo intitulado destilação a vácuo, que diminui a pressão e, conseqüentemente, a temperatura de ebulição de frações com valor agregado (gasóleos), os quais são extraídos (GURGEL, 2016).

Além dos processos envolvidos, é de extrema importância conhecer a característica do petróleo, pois tem influência direta na produção de determinados derivados. Segundo Gurgel (2016), todos os tipos de petróleo apresentam os mesmos hidrocarbonetos, mas diferem em suas quantidades. Como coloca ANEEL (2008, p.110):

“O petróleo leve, como aquele produzido no Oriente Médio, dá origem a maior volume de gasolina, GLP e naftas. Por isso é, também, o mais valorizado no mercado. As densidades médias produzem principalmente óleo diesel e querosene. As mais pesadas, características da Venezuela e Brasil, produzem mais óleos combustíveis e asfaltos.”

Para produção de energia elétrica, utiliza-se o óleo diesel, o óleo combustível e, em menor proporção, o óleo superviscoso (ANEEL, 2008, p.109). Estes apresentam pouco valor agregado em relação aos demais derivados do petróleo. Segundo dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL, as usinas térmicas que utilizam petróleo como insumo, subdividem-se segundo o combustível utilizado como mostra o Quadro 4.

Quadro 4- Matriz Elétrica de Derivados de Petróleo no Brasil.

Combustível	Número de usinas	Capacidade Instalada (GW)	Porcentagem da Capacidade Instalada no País (%)
Gás Refinaria	7	0,34	0,23
Óleo Combustível	41	4,14	2,76
Óleo Diesel	2114	4,54	3,03
Outros Energéticos de Petróleo	16	0,94	0,63
SOMA	2178	9,96	6,65

Fonte: Adaptado de BIG/ANEEL (2016)

Como se pode perceber, há muito mais usinas que utilizam óleo diesel, no entanto sua capacidade instalada não difere tanto para a segunda colocada neste quesito, as usinas de óleo combustível, as quais têm menos quantidades de usinas. Por fim, a matriz energética oriunda de petróleo representa 6,65% da matriz elétrica brasileira, o que denota seu papel de complementaridade ao sistema elétrico.

O petróleo extraído no estado do Amazonas na bacia sedimentar de Solimões, em Urucu, depois de processado, é escoado através de um duto interligando a estação de separação ao Terminal Solimões, cujo comprimento é 285 km (ANP, 2014). O petróleo é, em seguida, transportado de navio para a Refinaria Isaac Sabbá (REMAN).

3.2.3. Ciclos Termodinâmicos na Geração Termelétrica

A geração termelétrica pode ser classificada em função das características da combustão em relação ao processo de transferência energética da seguinte forma (BELICO, 2012; LEÃO, 2016):

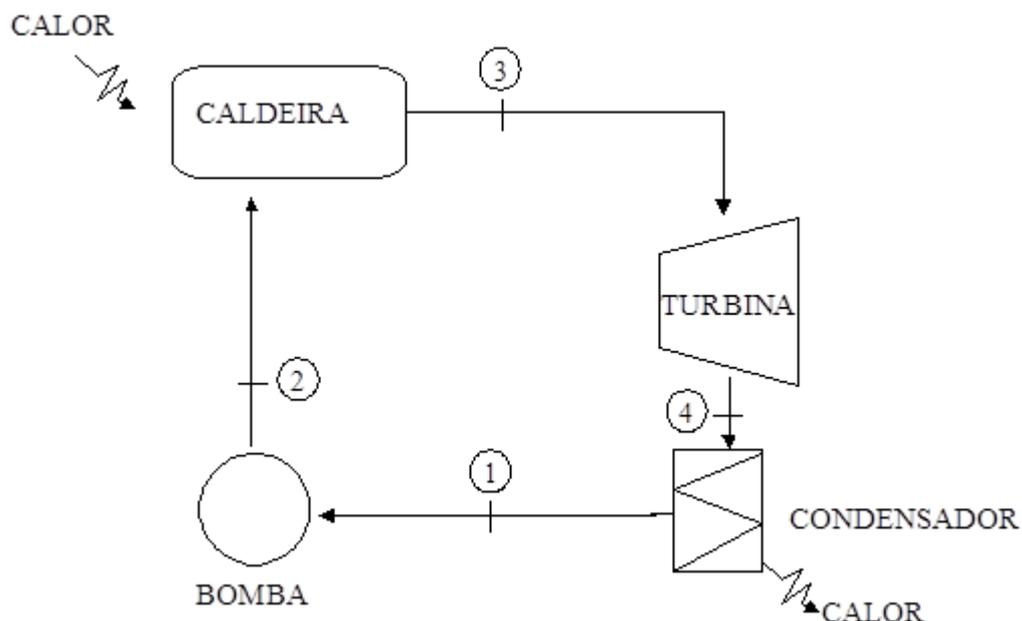
Combustão externa: o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho. Nas máquinas de combustão externa, o calor proveniente da combustão deve ser transferido dos produtos de combustão ao fluido de trabalho através das serpentinas no interior de uma caldeira. Este processo é utilizado nas centrais termelétricas a vapor, em que o combustível aquece o fluido de trabalho (geralmente água) em uma caldeira, gerando vapor que, ao se expandir em uma turbina, produz trabalho mecânico, o qual será convertido em energia elétrica pelo gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina.

Combustão interna: a combustão se efetua sobre uma mistura de ar e combustível, sendo que o fluido de trabalho será o conjunto de produtos da combustão. A combustão interna é o processo usado principalmente nas turbinas a gás e nas máquinas térmicas a pistão (motores).

Segundo Leão (2016, p.39), “um ciclo termodinâmico se constitui de uma sequência de processos após os quais a matéria que o experimentou retorna ao estado inicial”. Os principais ciclos termodinâmicos em uma central termelétrica são (LEÃO, 2016):

Ciclo Rankine: ciclo de combustão externa, típico das turbinas a vapor (BELICO, 2012), sendo constituídos de quatro processos, apresentados na Figura 10.

Figura 10- Esquemático do Ciclo Rankine.



Fase 1-2: Bombeamento adiabático (sem troca de calor), em que ocorre o aumento de pressão do fluido;

Fase 2-3: Transferência de calor isobárica (pressão constante), em que o fluido entra na caldeira, onde é aquecido até se tornar vapor superaquecido;

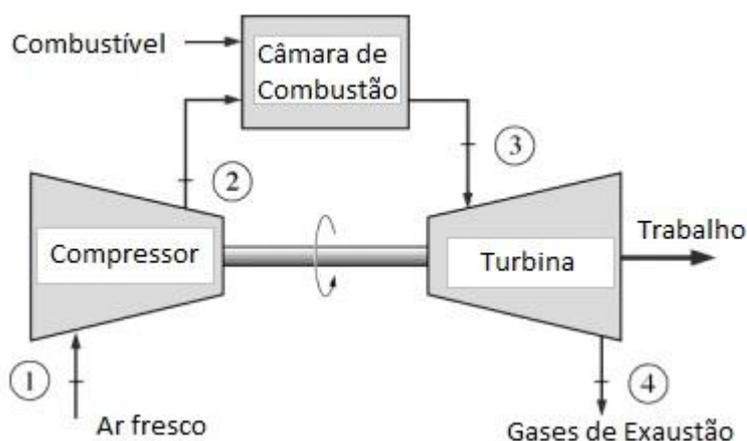
Fase 3-4: Expansão, em que o vapor superaquecido expande através da turbina, gerando trabalho. Nessa expansão, há diminuição de temperatura e pressão;

Fase 4-1: Troca de calor, em que o vapor é resfriado no condensador até a condição de líquido saturado, o qual retorna à bomba, fechando o ciclo.

Há, ainda, possibilidades de variação nos processos com intuito de aumentar a eficiência energética, como – por exemplo - a inserção de mais uma turbina em série (Ciclo Rankine com reaquecimento). Dessa maneira, o vapor, saído da primeira turbina de alta pressão, é reaquecido e passa na segunda turbina, de baixa pressão.

Ciclo Brayton: ciclo de combustão interna, sendo ideal para representação da turbina a gás simples (BELICO, 2012) e é apresentado na Figura 11.

Figura 11- Esquemático do Ciclo Brayton.



Fonte: Adaptado de Yanagihara (2016).

Fase 1: compressão adiabática e isentrópica (sem trocas de calor com o ambiente e com entropia constante), com aumento de temperatura.

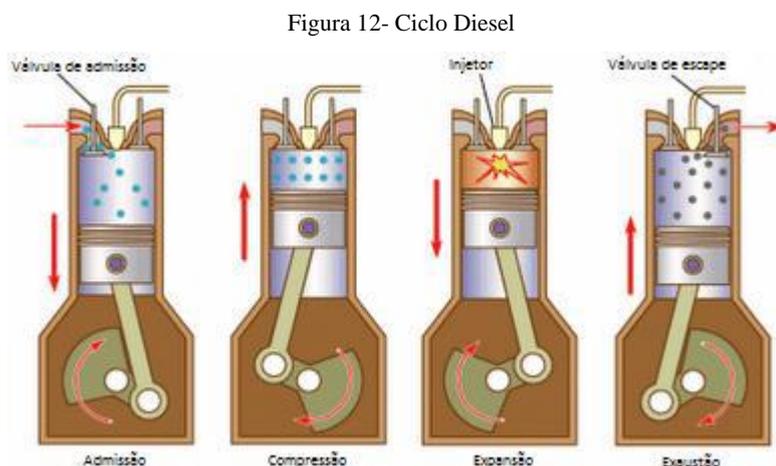
Fase 2: ar comprimido direciona-se à câmara de combustão, em que é misturado ao combustível, resultando na combustão e, conseqüentemente, gases em altas temperaturas.

Fase 3: os gases provenientes da combustão se expandem através da turbina, onde há redução da pressão e temperatura dos gases devido a realização de trabalho;

Fase 4: Os gases da turbina são descarregados diretamente na atmosfera.

Tal configuração se caracteriza como regime aberto, uma vez que os gases são emitidos diretamente na atmosfera, o que compromete significativamente o rendimento do processo (GOMES, 2010). Como mostrado anteriormente para o ciclo Rankine, há diferentes adaptações do ciclo Brayton para aumento da eficiência energética, tais como Brayton com regenerador, com reacondicionador, etc (YANAGIHARA, 2016):.

Ciclo Diesel: ciclo de combustão interna, caracterizado pela combustão causada pela compressão de uma mistura de ar e combustível. No motor a Diesel, há uma injeção de combustível no momento da compressão máxima, produzindo uma explosão sem a necessidade de uma ignição elétrica. O ciclo, como mostra a Figura 12, é composto de quatro etapas, a saber:



Fonte: Colossi, (2012).

Admissão: há a aspiração de ar para dentro do cilindro, impulsionando o êmbolo para a área inferior do motor (ponto morto inferior).

Compressão: ao atingir o ponto morto inferior, o êmbolo sobe, diminuindo o volume do ar e, conseqüentemente, aumentando sua temperatura. O pistão faz a compressão dessa massa de ar e a término da compressão, injeta-se combustível sob pressão no interior da câmara, sendo que – ao final do ciclo - a mistura sofre explosão devido às altas temperaturas e pressão.

Expansão: ocorre após o êmbolo passar pelo ponto morto superior;

Exaustão: o êmbolo retorna ao ponto morto inferior e o gás de resíduos da combustão é liberado pelas válvulas, reiniciando o processo.

Ciclo Otto: também um ciclo de combustão interna, onde nos motores Otto, a mistura carburante (combustível) e comburente (ar) é preparada fora do motor, pelo carburador, e injetada no cilindro. O ciclo Otto é semelhante ao ciclo Diesel, havendo uma discrepância na etapa de combustão, na qual a mistura é detonada através da ação de uma centelha, que é produzida por uma vela (BEZERRA, 2007).

3.2.4. Plantas Termelétricas

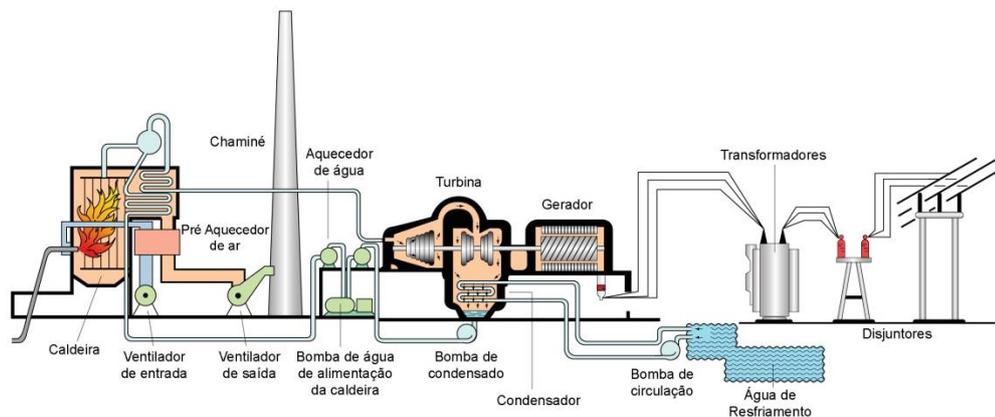
A seguir são apresentados, de forma sucinta, os principais tipos de centrais termelétricas de acordo com o combustível utilizado (Gás Natural e/ou Óleo Combustível), apresentando suas características e configurações.

3.2.4.1. Usinas a Óleo Combustível

As usinas a óleo combustível operam conforme o ciclo Rankine e consiste, basicamente, de: uma caldeira, uma turbina a vapor, um condensador e um sistema de bombas, como pode ser visto na Figura 13.

Na caldeira, a uma pressão bem maior que a atmosférica, a água passa do estado líquido para o gasoso (vapor) devido ao calor recebido pela combustão do combustível. O vapor, então, é direcionado para as turbinas e, posteriormente, ao condensador para retornar ao estado líquido (ANEEL, 2008). Dessa maneira, o líquido retorna ao sistema de bombas, recirculando na caldeira, repetindo o processo de produção de energia térmica em mecânica para movimentar a turbina.

Figura 13- Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do óleo combustível.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2008).

3.2.4.2. Usinas a Gás Natural

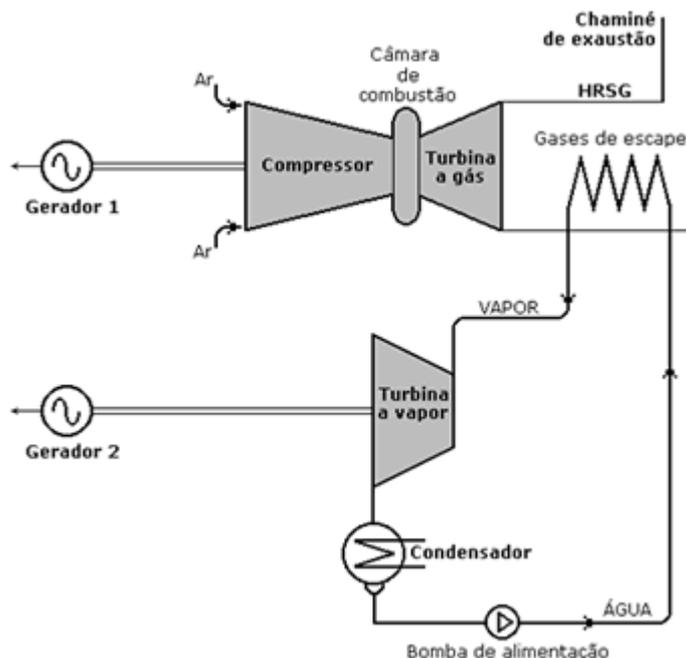
As UTEs a Gás Natural operam conforme o Ciclo Brayton e são compostas, basicamente, por: compressor, câmara de combustão, turbina a gás e exaustor.

A primeira etapa de produção de energia elétrica a partir do GN é a aspiração do ar atmosférico, o qual é filtrado e comprimido no compressor e injetado na câmara de combustão, onde ocorre a mistura com o GN e, posteriormente, a combustão. Como produto, gases quentes (fluido de trabalho) em altas temperaturas são gerados e escoados para a turbina, expandindo-se e movendo as palhetas, produzindo energia mecânica que aciona o eixo do gerador elétrico (LEÃO, 2016). “O destino dado ao fluido de trabalho após esta aplicação determina se o ciclo da termelétrica será simples (ou aberto) ou combinado (fechado)” (ANEEL, p.92, 2008). No primeiro caso, os gases são resfriados e liberados na atmosfera por meio de uma chaminé. Entretanto, dessa maneira, a eficiência é baixa, pois não se aproveita o potencial térmico desses gases, como coloca Leão (p.44, 2016), “a maior parcela da energia do combustível que não é aproveitada está nos gases de exaustão ainda a altas temperaturas”. O exemplo de esquema do funcionamento de uma UTE a gás já foi apresentado na Figura 11.

3.2.4.3. Usinas a Ciclo Combinado

Usinas termelétricas a ciclo combinado operam com a integração de dois ciclos: Rankine e Brayton, (LEÃO, 2016). Em uma única planta, as turbinas a gás e a vapor são associadas para geração de energia elétrica a partir da queima do mesmo combustível (GASNET, 2016). Dessa maneira, o calor existente nos gases de exaustão das turbinas a gás é recuperado, produzindo vapor necessário para o acionamento das turbinas a vapor. Um exemplo de como pode ser a configuração de uma planta de ciclo combinado é apresentado na Figura 14.

Figura 14- Esquemático de uma Usina com ciclo combinado.



Fonte: PANTANAENERGIA (2016)

Na figura acima, parte do calor de exaustão das turbinas a gás é reaproveitada na Caldeira de Recuperação de Calor (*Heat Recovery Steam Generator - HRSG*) aumentando a eficiência térmica da planta (GASNET, 2016). Segundo ANEEL (2008), uma UTE em ciclo simples apresenta uma eficiência de 38,7 % enquanto que numa com ciclo combinado, eleva-se para em torno de 50%.

3.2.4.4. Usinas a Motores Alternativos

Os motores de combustão interna mais utilizados em grupos geradores são os motores Diesel (LEÃO, 2016). No entanto, há uma crescente tendência da troca do Diesel propriamente dito para o GN por motivos tanto ambientais (menores emissões) quanto econômicos. Por exemplo, o metro cúbico do combustível, quando adquirido diretamente das distribuidoras de gás natural encanado, e tarifado para uso veicular ou geração de energia elétrica, custa, por unidade de energia liberada na queima, cerca da metade do valor praticado para o Diesel (PEREIRA et al., 2005). Em termos ambientais, a Associação Portuguesa de Cogeração (COGEN) realizou a comparação entre as emissões de motores 100% Diesel e bicomcombustível (66% GN e 34% HFO) para os seguintes poluentes: Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Compostos Orgânicos Voláteis (COV) e Material Particulado com diâmetro de 10 micrômetros (PM₁₀). Como resultado, no modo bicomcombustível há uma redução de 15,54% das

emissões de NO_x e de 36,80 % nas emissões de material particulado, no entanto há um aumento de emissões de COV de 22,58 % (COGEN, 2011).

Dentre as tecnologias disponíveis para o consumo do GN como substituto do Diesel, destacam-se o uso de motores dedicados a gás, ciclo Otto, e a conversão bicombustível diesel/gás.

Motores com ciclo Otto necessitam de grandes modificações (PEREIRA et al, 2005), na qual todo o sistema de injeção de diesel é retirado e, em seu lugar, são colocados um sistema de carburação do gás ao ar de admissão e um sistema elétrico com velas para ignição, entre outras modificações.

Por outro lado, a operação bicombustível envolve a adição do sistema de mescla ar/gás natural, sendo que não é necessária nenhuma outra modificação no motor (PEREIRA et al, 2005). Diferentemente do motor Diesel tradicional, onde apenas ar é admitido nos cilindros, motores operando no modo bicombustível admitem uma mistura de ar e gás natural. Conforme coloca Pereira et al. (2016, p.3), o funcionamento ocorre da seguinte maneira:

“Nos instantes finais da compressão da mistura ar – gás natural ocorre a injeção de óleo Diesel. O combustível pulverizado se inflama ao entrar em contato com os gases aquecidos no interior do cilindro, exatamente da mesma maneira como ocorre durante a operação de um motor com ignição por compressão tradicional.”

Por fim, os motores alternativos de combustão interna acionam diretamente os geradores de eletricidade. Essa forma de geração é utilizada comumente em localidades isoladas ou como fonte alternativa de emergência de fornecimento de energia (LEÃO, 2016).

3.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Neste item, será abordada a técnica de ACV desde seu contexto histórico, definição, etapas envolvidas, bem como os benefícios e limitações da sua aplicação.

3.3.1. Histórico

“A ACV é considerada uma recente metodologia, no entanto não tanto quanto se acredita” (KLÖPPFER et al, 2014, p.6). Segundo este autor, o escocês Patrick Geddes, na década de 1880, desenvolveu o que pode ser considerado o precursor do Inventário do Ciclo de Vida (ICV).

O primeiro estudo ACV, como conhecido atualmente, intitulado como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA), foi conduzido pela *Midwest Research Institute* (MRI) para comparar o consumo de recursos e os lançamentos ao ambiente associados com

recipientes de bebidas (EEA, 1997). Esse estudo, por ser de caráter confidencial, nunca foi publicado, entretanto utilizou-se como referência para o processo decisório sobre as embalagens (FERREIRA, 2004). Enquanto isso, na Europa, abordagem semelhante estava sendo desenvolvida, conhecida mais tardiamente como “Ecobalanco” (EEA, 1997).

Em 1972, no Reino Unido, Ian Boustead calculou o total de energia utilizada na produção de vários tipos de recipientes de bebidas, tais como: vidro, alumínio, aço, etc. Alguns anos após, Boustead consolidou sua metodologia para ser aplicada numa maior variedade de materiais e, em 1979, publicou o *Handbook of Industrial Energy Analysis* (EEA, 1997).

Segundo Klöpper et al (2014), há, pelo menos, duas razões para o desenvolvimento da ACV na década de 70, a saber:

- Aumento de problemas com resíduos sólidos;
- Limitações no suprimento de energia e conhecimento das limitações dos recursos.

Dessa maneira, os primeiros estudos foram elaborados para as embalagens, enquanto que, com o surgimento da Crise do petróleo em 1973, os estudos foram direcionados para esta área. Entretanto, conforme a crise do petróleo diminuía de intensidade, a questão energética diminuía de interesse e, embora o interesse em ACV continuasse, o pensamento progredia um pouco mais lentamente (EEA, 1997).

No começo da década de 80, os estudos em ACV eram esparsos e na língua alemã (KLÖPFFER et al, 2014). Destaca-se, ainda, nesta década, o estudo do Laboratório Suíço para Teste e Investigação de Materiais que introduziu um método para normalizar e agregar emissões para o ar e para água, utilizando as normas ambientais para essas emissões, resultando nos chamados “volume Crítico de ar” e “volume crítico de água” (FERREIRA, 2004).

Na década de 90, houve um notável crescimento das atividades em ACV por meio de *workshops* e encontros realizados pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) na Europa e nos EUA. De 1990 a 1993, SETAC conduziu estudos no desenvolvimento, harmonização e padronização da ACV, que foram utilizados como uma das maiores fontes de informação sobre o desenvolvimento da metodologia (KLÖPFFER et al, 2014). Um dos mais importantes foi realizado em 1993 durante o *workshop- Code of*

Practice, que foi considerado como o “mais alto denominador comum” entre as posições americana e europeia sobre a metodologia ACV (GABATHULER, 1997).

Por fim, mais próximo dos dias atuais, a Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou em 1992 um comitê técnico para propor a normalização de abordagens de gestão ambiental, sendo ACV incluída nesta análise (FERREIRA, 2004). Ainda, é interessante destacar que o conceito de ACV tem-se expandido para outros propósitos, além daqueles para o qual foi originalmente criada, resultando em modificações, como por exemplo: ACV social, a busca pela sustentabilidade (GUINÉE et al, 2010; ZORTEA, 2015), ACV associada à Análise de Risco (FLEMSTRÖM et al, 2004), etc.

3.3.2. Definição

A ACV é uma técnica de gestão ambiental, que procura avaliar os aspectos ambientais e impactos associados a um produto ao longo do ciclo de vida. Ela possui um regramento, em termos de Brasil, pelas seguintes Normas Brasileiras (NBR), formuladas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pela *International Organization for Standardization* (ISO, em inglês):

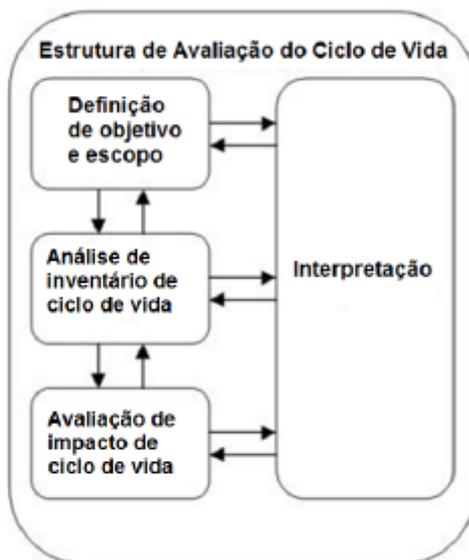
- ABNT NBR ISO 14040:2009: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura;
- ABNT NBR ISO 14044:2009: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações.

Conforme introduz estas normas, a ACV permite avaliar aspectos ambientais e potenciais associados a um produto, mediante aos seguintes passos (ABNT, 2009a):

- Compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes ao sistema de produto;
- Avaliação dos impactos ambientais potenciais associados às entradas e saídas citadas anteriormente;
- Interpretação dos resultados das fases de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos do estudo.

Essa relação pode ser vista na Figura 15. O fato do duplo sentido das setas entre as diferentes etapas é devido à técnica de a ACV ser iterativa (ABNT, 2009a), isto é, o escopo, por exemplo, pode ser modificado devido a novas informações coletadas na etapa de inventário.

Figura 15-Estrutura da ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040:2009

Como pode ser intuído, o termo “ciclo de vida” tem o seguinte significado (ABNT, 2009a, p.3): “estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou geração de recursos naturais à disposição final”. Por sua vez, o termo “sistema de produto” é entendido como (ABNT, 2009a, p.3): “conjunto de unidade de processo, conectadas material e energeticamente, que realiza uma ou mais funções definidas”. De uma maneira mais didática, apresenta-se a Figura 16 que mostra o ciclo de vida de um produto:

Figura 16- Ciclo de vida de um produto juntamente com o sistema de produto;



Fonte: Adaptado de Klöpffer et al (2014).

Mesmo que para simples produtos, a diversificação das caixas na Figura 16 em diferentes processos unitários, bem como a inclusão de distintos tipos de transportes, diversos tipos de energia, coprodutos e etc. tornam o esquema simplista em uma “complexa árvore de produto”. A interconexão de processos unitários forma o sistema de produto (KLÖPPFER et al, 2014).

3.3.3. Etapas da ACV

3.3.3.1. *Objetivo e Escopo*

Segundo a Norma ISO 14040 (ABNT, 2009a), o objetivo de um estudo ACV deve: declarar inequivocamente a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo.

Quanto ao escopo, a Norma cita, dentre outras, as considerações que devem estar presentes no estudo, a saber (ABNT, 2009a) :

- As funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- Unidade funcional;
- Sistema de produto a ser estudado;
- As fronteiras do sistema de produto;
- Procedimentos de alocação;
- Tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada;
- Requisitos dos dados;
- Suposições;
- Limitações.

A função do sistema do produto está intimamente ligada à unidade funcional a ser escolhida. “O propósito principal de uma Unidade Funcional (UF) é fornecer uma referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas” (ABNT, 2009a, p.6). Dessa maneira, ao se efetuar um estudo ACV para comparação, por exemplo, de tintas, a unidade funcional pode ser a área protegida por um período de tempo determinado (ABNT, 2009a), uma vez que as tintas podem apresentar diferentes rendimentos (por isso UF em termos de área protegida) e qualidade (UF considerando o tempo). A partir da definição da unidade funcional, estabelece-se o fluxo de referência, o qual é entendido como a medida das saídas de processos em um dado sistema de produto, as quais são necessárias para a realização da função expressa pela unidade funcional (ABNT, 2009b). Para tornar o entendimento mais fácil, apresenta-se um exemplo de comparação entre diferentes embalagens de cerveja no Quadro 5. Como se pode perceber, a função está bem definida e tem relação direta com a unidade funcional e esta, por sua vez, faz a relação das embalagens com o fluxo de referência. Assim, a comparação entre os diferentes tipos de embalagens é dada não em termos unitários, mas sim pela sua

capacidade de acondicionar um certo volume (unidade funcional), resultando em diferentes fluxos de referência para cada sistema de produto.

Muitas das discrepâncias aparentes entre estudos ACV relatados na literatura surgem porque os sistemas não são especificados convenientemente numa base comparável ou porque sistemas diferentes estão sendo comparados (CONSOLI et al., 1993). Em relação a estudos comparativos, a Norma NBR 14040:2009 expressa que deve existir uma equivalência dos sistemas, que se reflete pela: mesma unidade funcional, considerações metodológicas equivalentes, qualidade dos dados, entre outros (ABNT, 2009a, p.6).

Quadro 5- Exemplo de Função, Unidade funcional e fluxo de referência para embalagens.

Embalagens	Função	Unidade Funcional	Fluxo de Referência
Lata pequena (250 mL)	Embarcar o produto, proteger seu conteúdo.	Engarrafar 1000 ml de cerveja	4 latas
Garrafa (500 mL)			2 garrafas
Garrafa grande (1 L)			1 garrafa

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Uma vez definido o escopo e o objetivo, deve-se atentar para as fronteiras do sistema. De acordo com a NBR ISO 14040 (2009a, p.6):

“Vários fatores determinam as fronteiras do sistema, inclusive a aplicação pretendida do estudo, as suposições feitas, os critérios de corte, restrições de dados e custo, e o público-alvo pretendido.”

Para conjuntos de dados de resultados de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), as fronteiras do sistema devem ser idealmente definidas de modo que todos os fluxos que as atravessarem sejam fluxos elementares (materiais ou energia que entram no sistema em estudo, tendo sido extraídos do ambiente sem transformação humana prévia), além do fluxo de referência do produto (IBICT, 2014; ABNT, 2009b). Entretanto, mesmo para produtos simples, há sempre a influência de outros produtos, ou seja, fluxos da tecnosfera (não elementares), gerando- inclusive- alguns “*loops*”. Por exemplo, na extração do carvão é necessário metal, ao passo que na extração do metal é necessário carvão. Não obstante, o número de processos que contribuem em grau quantitativamente relevante para o sistema geralmente é limitado, sendo que, na prática, todos os fluxos da tecnosfera que não são de referência e são irrelevantes, podem ser ignorados e “cortados” (IBICT, 2014). Quanto a essa questão, a Norma ISO 14044, recomenda três critérios para incluir ou excluir partes do sistema de produto: massa, energia e relevância ambiental. Ainda, é importante destacar que a

exclusão sistemática de atividades e processos não é adequada, a menos que seja necessária de acordo com o objetivo específico do estudo de ACV (IBICT, 2014).

Por fim, é ainda nesta fase que os procedimentos de alocação, requisitos dos dados, hipóteses de limitações bem como as metodologias de avaliação de impactos adotadas devem ser esclarecidos. No entanto, tais assuntos serão contextualizados com maior profundidade nas etapas subsequentes.

3.3.3.2. *Análise do Inventário*

O ICV é a etapa que envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto (ABNT, 2009a), as quais podem incluir o uso de recursos e liberações, tais como efluentes líquidos, sólidos e emissões atmosféricas. Essa fase é muito importante, uma vez que os dados resultantes nesta etapa constituem a entrada para a avaliação de impacto do ciclo de vida, que é a etapa posterior.

A fase de inventário envolve a coleta de dados sobre fluxos (IBICT, 2014):

- Elementares: recursos, emissões, intervenções na ecosfera (uso da terra, por exemplo);
- De Produtos: bens e serviços, produto de um processo, insumos e materiais de consumo que ligam o sistema analisado a outros processos;
- De Resíduos Sólidos e Líquidos: geralmente ligados a processos de tratamento, quando houver, que garantem uma modelagem completa dos esforços e impactos ambientais relacionados.
- Outras informações pertinentes: dados estatísticos de produção (por exemplo, o portfólio de energia de um país como aporte energético do sistema analisado).

“Os dados quantitativos e qualitativos para inclusão no inventário devem ser coletados para cada unidade de processo que esteja dentro das fronteiras do sistema” (ABNT, 2009a, p.7). Normalmente, a fase de ICV exige os maiores esforços e recursos de uma ACV (IBICT, 2014), devido à quantidade de dados requeridos associada à dificuldade de obtenção destes, em termos, também, da qualidade requerida pelo estudo. De acordo com Venditti (2012), as fontes de informação para o inventário podem ser: medições diretas (informações coletadas diretamente na fonte), literatura (artigos, periódicos publicações acadêmicas e estudos de ACV existentes), relatórios internos (provindos de empresas, laboratórios, autoridades e fontes correlatas), bases de dados de inventários do ciclo de vida (disponíveis em softwares de

ACV) e entrevistas. Sonnemann et al. (2003), cita ainda as medições e/ou simulações como fonte de informação, que são dados calculados ou estimados, em que as fontes são inexistentes. Alguns dos pontos fortes e fracos para cada tipo de fonte de informação são mostrados no Quadro 6.

Quadro 6- Pontos fortes e fracos das diferentes fontes de informação

Fonte de Informações	Prós	Contras
Medições Diretas	Exatidão	Alto custo
Literatura	Dados técnicos apurados	Nem sempre reflete a realidade do sistema estudado
Relatórios Internos	Realidade do Sistema	Dados técnicos nem sempre bem apurados para o sistema
Base de dados ICV	Dados técnicos apurados	Dados nem sempre tem a mesma correlação tecnológica e/ou geográfica que o sistema estudado
	Dados padronizados	
Entrevistas	Dados próximos da realidade de uso real	Dados dependentes da percepção do entrevistado
	Baixo Custo	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Ainda, conforme o andamento da coleta de informações, há alguns desafios (REBITZER et al., 2004):

- Pouco ou nenhum conhecimento, por parte do usuário de ACV, do processo a ser investigado;
- A compilação e análise dos dados são dependentes das escolhas metodológicas. Por exemplo, para um processo que há saída de coprodutos, o ICV deve ser alocado entre os dois ou expandido.
- Impossibilidade de mensurar todas as entradas e as saídas de processos unitários, sendo necessária a união de processos;
- Empresas frequentemente consideram seus dados confidenciais, sendo necessário utilizar aproximações para contorno do problema;
- Necessária comunicação com diferentes tipos de empresas para obter diferentes pontos de vistas (para contorno de falta de dados).

De modo geral, a análise do inventário é dividida de maneira diferente entre os autores. Por exemplo, Ferreira (2004) divide esse processo em: construção da árvore de processo (fluxograma de processo); definição dos limites do sistema (de produto com o ambiente e de produto com outros sistemas de produto); finalização dos limites do sistema; coleta de dados; procedimentos e cálculos (procedimentos de alocação e construção de tabela). De acordo com

a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA, em inglês), a análise do inventário é composta de quatro etapas, a saber, (EPA, 2006):

- Desenvolvimento de um fluxograma do processo a ser avaliado;
- Desenvolvimento de um plano de coleta de dados;
- Coleta de dados;
- Avaliação e relatório de resultados.

Adotando-se esta última composição de etapas, será explicada sucintamente cada uma delas.

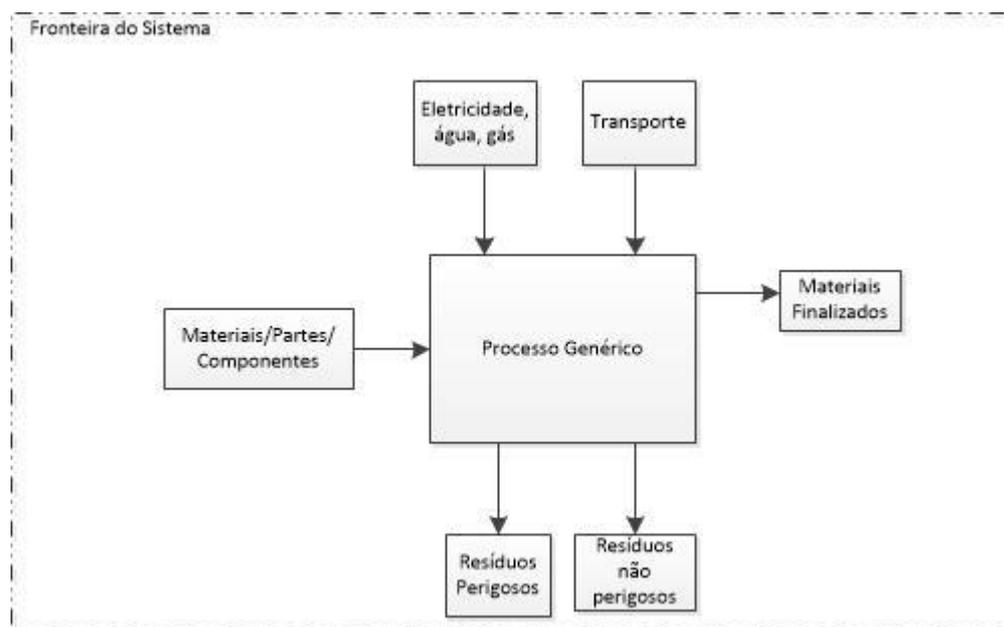
Etapa 1. Desenvolvimento do Fluxograma

O Fluxograma do processo é a ferramenta para mapear as entradas e saídas do sistema, um exemplo é mostrado na Figura 17. A definição de quantos processos devem estar contidos no fluxograma é feita na etapa anterior, ou seja, pelo escopo do estudo. Como coloca EPA (2006, p.20):

“Quanto mais complexo for o fluxograma, maior a precisão e a utilidade dos resultados. Infelizmente o aumento da complexidade significa também mais tempo e recursos que devem ser depositados a essa fase”.

Vale lembrar que, num fluxograma real de produção, há um maior número de processos, ou seja, a produção é subdividida no maior número possível de processos unitários, de forma que seja possível, posteriormente, na fase de avaliação do impacto avaliar com maior precisão onde ocorrem os maiores impactos. Conforme coloca EPA (2006), o sistema é subdividido em “subsistemas”, que são definidos como etapas/processos individuais que é parte do sistema de produção. Ainda, muitas vezes, alguns subsistemas são agrupados devido à falta de informação para dividi-los de forma isolada.

Figura 17- Fluxograma de um processo Genérico.



Fonte: Adaptado de EPA (2006)

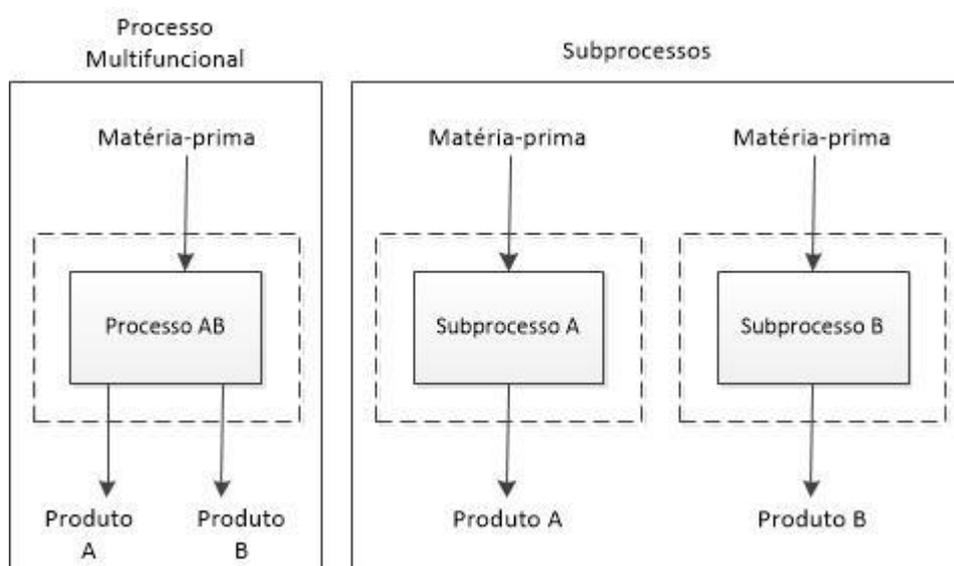
Durante a elaboração do fluxograma, pode-se deparar com a presença de coprodutos. “Coprodutos são saídas de processos que têm valor econômico, isto é, não são tratados como resíduos” (EPA, 2006, p. 21). Para exemplificar, têm-se casos de coprodutos no ciclo de vida do biodiesel, ao qual, em certa etapa, tem-se a geração da glicerina e do óleo de soja (ZORTEA, 2015). Na ocorrência de casos como esse, faz-se necessário o uso da alocação, que é definida pelo particionamento das entradas e saídas dos fluxos de um processo entre o sistema de produto estudado e o coproduto (ABNT, 2009b). Tal procedimento é realizado para que os impactos gerados ao longo do ciclo de vida não sejam destinados somente a um produto, uma vez que a geração de coprodutos também gera renda e, conseqüentemente, atividade econômica para sua utilização.

Há diferentes maneiras de se calcular a alocação, que pode ser: mássica, energética, valor econômico dos produtos, ou até mesmo uma composição de diferentes tipos. No entanto, é aconselhado que seja evitada a alocação (ABNT, 2009b) sempre que possível. Como coloca Ramírez (2009), tal ação se justifica, pois ao adicionar mais cálculos ao estudo ACV, mais incertezas são atribuídas. Dessa maneira, a norma ISO há duas formas para evitar a alocação (ABNT, 2009b):

- Divisão do processo a ser alocado em subprocessos;
- Expansão dos limites do sistema;

A divisão em subprocessos é a redução de um processo multifuncional (com saída de coprodutos) em mais de um processo unifuncional (subprocessos) (RAMÍREZ, 2009). Com o objetivo de deixar mais claro esse procedimento, apresenta-se a Figura 18 que mostra a divisão de um processo AB em diferentes subprocessos. É importante destacar que, para que ocorra essa subdivisão, é necessário que os subprocessos ocorram fisicamente separados no espaço e/ou tempo, além disso, deve haver a disponibilidade dos dados para cada um deles (RAMÍREZ, 2009). Como coloca este autor, esta situação raramente ocorre dentro dos sistemas multifuncionais, em meios de operação e também da presença de dados separados.

Figura 18- Divisão do processo em Subprocessos.



Fonte: Adaptado de Ramírez (2009).

Por outro lado, a expansão dos limites do sistema ocorre quando as fronteiras do estudo são expandidas para incluir um subprocesso, obtendo somente um produto (RAMÍREZ, 2009). Segundo Azapagic e Clift (1994, apud RAMÍREZ, 2009), a expansão pode ser feita pela adição ou subtração de processos. Um exemplo de cenário modelado com essa abordagem é o reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (NOGUEIRA, 2012), sendo que a energia elétrica obtida a partir da incineração (dos resíduos ou da combustão do biogás produzido durante a decomposição) é disponibilizada à população, evitando a necessidade de geração de energia elétrica oriundas de fontes tradicionais. Assim, as cargas ambientais evitadas (energia elétrica de fontes tradicionais) são descontadas das cargas ambientais identificadas para o sistema de produto em estudo. Portanto, a expansão do sistema pode contribuir para a compreensão de cenários mais detalhados das consequências de uma medida, facilitando a visualização dos impactos ambientais das atividades fora dos limites do ciclo de vida em estudo (RAMÍREZ, 2009). Porém, Weidema (1999) destaca que o

procedimento de expansão do sistema apresenta diversas dificuldades quando aplicado, algumas, por exemplo, são: dificuldades na identificação de quais processos são afetados, a possibilidade de intermináveis regressões quando o procedimento de expansão do sistema envolve processos que também possuem múltiplos produtos e, o fato de que os coprodutos tenham que apresentar uma função idêntica ao produto a ser substituído.

Por fim, caso não seja possível evitar a alocação, é prescrito (ABNT, 2009b):

1. As entradas e saídas do sistema devem ser distribuídas entre os diferentes produtos ou funções, de forma que reflita uma relação física entre eles, ou seja, devem representar a forma em que as entradas e saídas são alteradas com mudanças quantitativas nos produtos ou funções que deixam o sistema;

2. Onde relações físicas não podem ser estabelecidas ou usadas como base para a alocação, as entradas devem ser distribuídas entre os produtos e funções de forma que reflita outra relação entre eles. Por exemplo, dados de entrada e saída podem ser alocados entre os coprodutos, proporcionalmente ao valor econômico dos produtos;

3. Quando mais de um método de alocação pode ser aplicável, uma análise de sensibilidade deve ser realizada para ilustrar as consequências das diferentes alternativas.

Etapa 2. Desenvolvimento de um plano de coleta de dados

Na fase de definição de objetivo e delimitação do escopo, o nível de detalhamento e extensão dos dados requeridos é definido. Nesse sentido, um plano de coleta de dados assegura que a qualidade dos dados sejam coerentes ao fixado na etapa anterior (EPA, 2006). Os elementos chaves, bem como uma breve descrição, nessa etapa são apresentados abaixo:

- Definição das metas da qualidade dos dados;

Consiste na definição da qualidade de dados que serão utilizados. Não há uma lista pré-definida de metas de qualidade de dados para estudos ACV (EPA, 2006), sendo que tal consideração é dependente do nível de detalhamento exigido de cada ACV, como definido anteriormente no objetivo e escopo (ABNT, 2009a). Nesta etapa, definem-se quais dados serão primários e secundários (PASSUELLO, 2007). Segundo ZOCHE (2014), os dados primários são coletados diretamente nos locais de produção por meio de: registros de produção, registros de compra e venda, atestados de abrangência ambiental, medidos e determinações locais, etc. Os dados secundários, por sua vez, são obtidos na literatura por meio de: relatórios setoriais de governo ou associações, literatura técnica, etc.

- Identificação dos tipos e fontes de dados;

A definição dos tipos e fontes dos dados a serem coletados pode ajudar a reduzir custos e tempo aplicados a essa tarefa (EPA, 2006). As fontes de dados já foram apresentadas no Quadro 6, enquanto que os tipos podem ser: medidos, modelados, amostrados, entre outros.

- Identificação de indicadores de qualidade;

Indicadores de qualidade dos dados são valores de referência para analisar se os dados recolhidos cumpriram os requerimentos de qualidade impostos. Exemplos de indicadores de qualidade de dados são: precisão, completeza, representatividade, consistência e reprodutibilidade (EPA, 2006). Zortea (2015), por exemplo, utiliza a tabela conhecida como “pedigree”, que trabalha com indicadores com pontuações variadas de 1 a 5 para os seguintes indicadores: confiabilidade da fonte, completeza e correlações (temporal, geográfica, tecnológica). Além disso, pode-se inferir a qualidade dos dados conforme sua obtenção, ou seja, se os dados são primários ou secundários, além das fontes utilizadas para a formulação.

- Desenvolvimento de planilha de coleta de dados.

A elaboração de uma planilha com os dados serve como um guia para a coleta de dados. Além disso, a construção de uma base de dados eletrônica é de extrema importância para organização e cálculos no inventário (EPA, 2006).

Etapa 3. Coleta de dados;

Os esforços na coleta de dados envolvem uma combinação de pesquisa, visitas técnicas e contato direto com especialistas da área (EPA, 2006). Como já apresentado no Quadro 6, os dados para o inventário podem ser oriundos de diversas fontes, sendo que cabe ao analisador a escolha baseada no objetivo e escopo delimitados.

Etapa 4. Avaliação e relatório de resultado;

A última etapa dessa fase é a apresentação dos resultados do inventário, na qual é importante demonstrar a metodologia utilizada na análise. O relatório deve definir explicitamente os sistemas e os limites analisados bem como as suposições feitas na realização do inventário (EPA, 2006).

Portanto, o fluxograma desenvolvido na etapa 1 serve como um norteador para a coleta de dados. A etapa 2 especifica os requerimentos dos dados (tipos, qualidade, exatidão, etc). A etapa 3 consiste na coleta e preenchimento dos dados do fluxograma com dados numéricos e, por fim, a etapa 4 analisa, de forma sistemática, as etapas anteriores e apresenta o resultado

desta fase. É importante destacar que esta tarefa não é simples, sendo que alguns dados são extremamente difíceis de obter por diferentes motivos, a saber:

- Indisponibilidade de dados: informações sem controle, por exemplo, emissões atmosféricas que, por não serem medidas, tornam-se indisponíveis ao conhecimento;
- Dados Sigilosos: Informações de processos não são obtidas devido ao sigilo industrial;
- Substâncias Químicas: Segundo a *American Chemical Society* (ACS, em inglês), responsável pelo banco de dados do *Chemical Abstracts Service* (CAS, em inglês), o qual atribui números a cada produto químico contido na literatura, contém mais de 115 milhões de substâncias orgânicas e inorgânicas (ACS, 2016). Esse registro é atualizado diariamente com mais de 15.000 substâncias adicionadas por dia. Dessa maneira, devido ao imenso número de substâncias criadas, é comum não se ter informações acerca da produção e dos impactos da utilização desses químicos.

3.3.3.3. Avaliação dos Impactos

Segundo a NBR 14040 (ABNT, 2009a), a fase de análise dos impactos é:

“[...] dirigida à compreensão e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto usando os resultados da análise de inventário do ciclo de vida.”

O propósito dessa fase é interpretar as emissões e o consumo de recursos em termos de indicadores para as Áreas de Proteção (AP), as quais são: Saúde Humana, Meio Ambiente e Recursos Naturais (JRC-IES, 2010). A Análise de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) pode servir para dois objetivos (CONSOLI et al., 1993):

- Tornar os dados do inventário mais relevantes, traduzindo-os em possíveis impactos ambientais;
- Facilitar a agregação e interpretação dos dados do inventário, de forma a melhorar a compreensão para a tomada de decisão.

A fase de avaliação de impacto pode incluir, entre outros, (ABNT, 2009a; JRC-IES, 2010):

1) Seleção da categoria de impacto e classificação

Categorias de impacto são as classes que representam as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados (ABNT, 2009a). Nessa etapa, os potenciais impactos ambientais relevantes são definidos. Os fluxos elementares do inventário (consumo de recursos, emissões para o ar, etc.) são atribuídos às diferentes categorias de impacto de acordo com a capacidade da substância de contribuir para os diferentes problemas ambientais (JRC-IES, 2010).

Para uma pré-seleção das categorias de impacto que se escolherá para análise, Ferreira (2004) apresenta alguns pontos de partida, a saber:

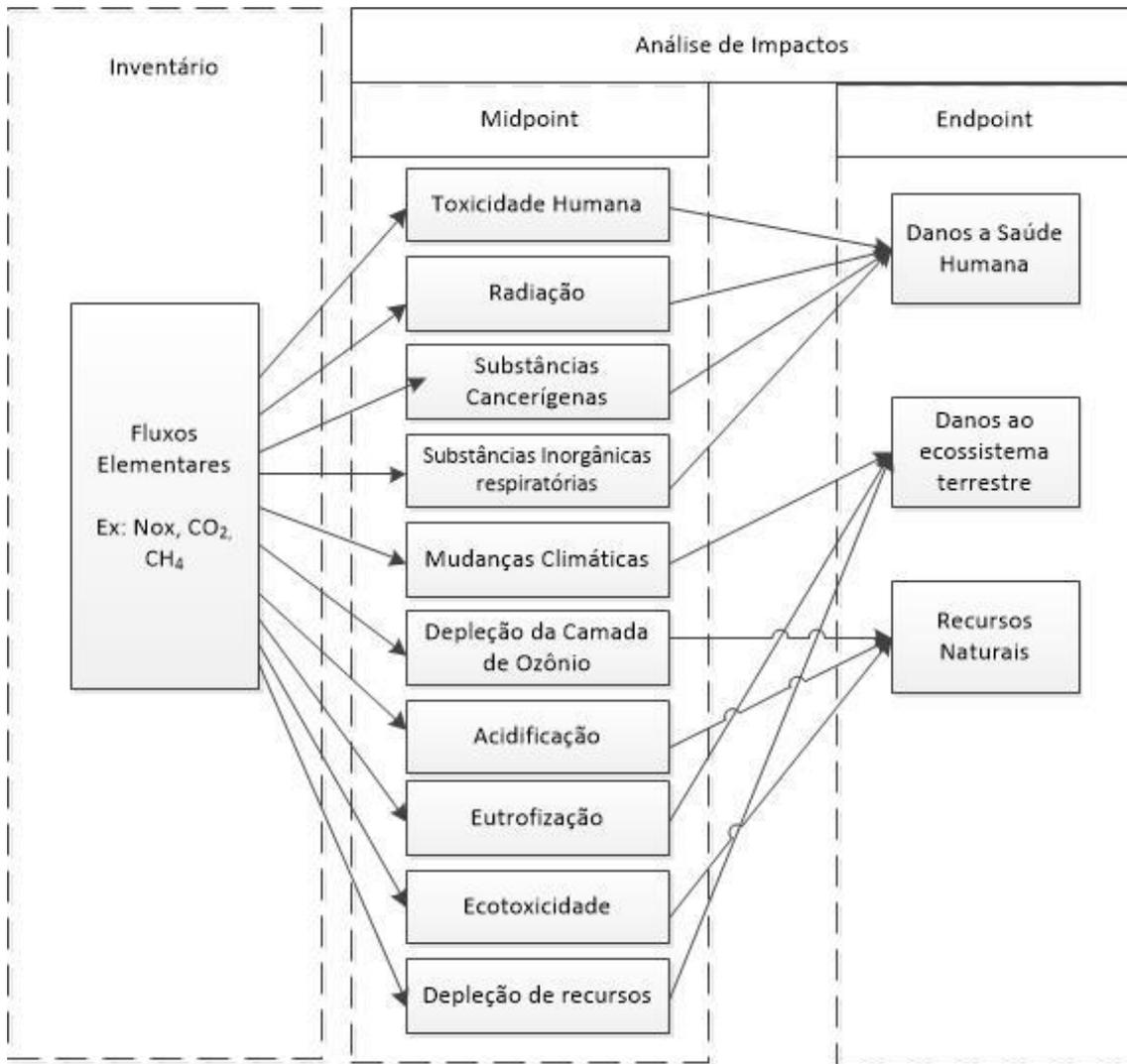
- As categorias devem, em conjunto, permitir uma avaliação abrangente dos impactos relevantes e devem estar relacionados com os objetivos e escopo do estudo;
- As categorias devem ter um mínimo de sobreposição, de modo a evitar a dupla contagem;
- As categorias devem ser internacionalmente aceitas;
- O número total de categorias não deve ser demasiadamente grande.

Uma vez escolhida as categorias de impacto, deve-se adotar o modelo de impacto, que calculará os possíveis impactos conforme sua metodologia. Os modelos de AICV avaliam diversas categorias de impacto, dentre as mais comumente avaliadas são: depleção de recursos bióticos, depleção de recursos abióticos, aquecimento global ou mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e utilização do solo (MENDES, 2013).

2) Caracterização

Nessa etapa, o impacto de cada emissão ou consumo de recurso é modelado quantitativamente de acordo com a categoria de impacto selecionada.

Há dois tipos de categorias de apresentação dos resultados, que são: *Midpoint* e *Endpoint*. *Midpoint* está associado ao impacto, enquanto que *Endpoint* ao dano propriamente dito (JOLLIET et al, 2004). Dessa maneira, enquanto que numa avaliação *Midpoint* se calcula, por exemplo, a redução da camada de ozônio (impacto), na análise *Endpoint* calcular-se-á os impactos na saúde humana devido ao aumento da radiação de radiação ultravioleta (dano, devido à diminuição da camada de ozônio). Para tornar mais claro essa diferenciação, apresenta-se a Figura 19.

Figura 19- Estrutura da AICV e caracterização *Midpoint* e *Endpoint*.

Fonte: Adaptado de JRC-IES, 2010.

Segundo Jolliet et al (2004), os *midpoints* possuem mecanismos de impactos bem estabelecidos, enquanto que nos *endpoints* há maiores incertezas, devido às maiores simplificações existentes na modelagem do dano.

O cálculo dos resultados, durante a caracterização, envolve a conversão dos resultados do ICV para unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos dentro da mesma categoria de impacto, utilizando – para tanto - os fatores de conversão (ZORTEA, 2015). Um exemplo é a unidade “kg de CO₂” equivalente para gases do efeito estufa que contribuem para a categoria de impacto “Mudanças Climáticas”, sendo que o fator de caracterização do CO₂ para mudança climática é igual a 1, enquanto o metano (CH₄) tem um valor maior que 20, refletindo o seu maior potencial impacto (JRC-IES, 2010). Com a finalidade de demonstrar os principais impactos calculados, serão apresentadas as categorias de impacto calculadas pelo método CML IA *baseline* (PRÉ, 2016):

Depleção de Recursos Abióticos: esta categoria tem vinculação à proteção do bem-estar humano, saúde humana e saúde dos ecossistemas. Relaciona-se com a extração de minerais e combustíveis fósseis que entram no sistema. O fator de conversão deste impacto é determinado para cada tipo de extração, sendo que seu valor é baseado na concentração de reserva e da taxa de extração.

Mudanças Climáticas: pode resultar em diversos efeitos sobre a saúde humana e do ecossistema, bem como o bem-estar material. Refere-se às emissões de gases do efeito estufa. O modelo de caracterização, realizado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês), é selecionado para o desenvolvimento dos fatores de caracterização. Estes são expressos como Potencial de Aquecimento Global (PAG) para um horizonte de tempo de 100 anos (GWP100) e é expresso em quilogramas de dióxido de carbono por quilograma de emissão.

Depleção da Camada de Ozônio: a redução da camada de ozônio permite uma passagem maior de radiação Ultravioleta (UV), que podem causar danos ao DNA (BALOGH et al., 2010). O modelo de caracterização é desenvolvido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, em inglês), que define o potencial de depleção de camada de ozônio para diferentes gases em quilogramas de Clorofluorcarbono 11 (CFC-11) equivalente por quilograma de emissão.

Toxicidade Humana: Essa categoria preocupa-se com efeitos de substâncias tóxicas no ambiente humano. O fator de caracterização é o Potencial de Toxicidade Humana (PTH) e é expresso como 1,4-diclorobenzeno equivalente por quilograma de emissão.

Ecotoxicidade Aquática: refere-se ao impacto nos ecossistemas de água doce por emissões de substâncias tóxicas para o ar, solo e água. O fator de caracterização é Ecotoxicidade Potencial (EP) e é expresso como 1,4-diclorobenzeno equivalente por quilograma de emissão.

Ecotoxicidade Marinha: semelhante ao anterior, mas aplicada aos efeitos nos ecossistemas marinhos. Utiliza a mesma unidade do fator de caracterização.

Ecotoxicidade Terrestre: semelhante ao anterior, mas aplicada aos efeitos nos ecossistemas terrestres. Utiliza a mesma unidade do fator de caracterização.

Formação de Oxidantes Fotoquímicos: ocorre pela reação entre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, na presença de luz solar, sendo que o principal produto desta reação é o ozônio (CETESB, 2016), o qual causa problemas a saúde humana e ecossistemas

em baixas altitudes (PRÉ, 2016). O Potencial de Formação de Oxidante Fotoquímico (PFOF) é expresso em quilograma de etileno equivalente por quilograma de emissão.

Acidificação: causa uma grande quantidade de impactos no solo, água subterrânea, água superficial, organismos, ecossistemas em geral e materiais (construções, por exemplo). Potencial de Acidificação (PA) é expresso em quilograma de Dióxido de Enxofre (SO₂) equivalente por quilograma de emissão.

Eutrofização: inclui todos os impactos devido ao excesso de macronutrientes no ambiente causado pelas emissões de nutrientes para o ar, água e solo. Potencial de Eutrofização (PE) é expresso em quilograma Fosfato (PO₄) por quilograma de emissão.

A estrutura metodológica e científica da avaliação de impacto ainda está sendo desenvolvida, sendo que os modelos de categorias de impacto estão em diferentes estágios de desenvolvimento (ABNT, 2009a). Quanto aos modelos, há uma grande diversidade de metodologias e se diferenciam conforme a categoria de impactos que cobrem, na seleção de indicadores e no foco geográfico dos impactos (LEHTINEN et al, 2011).

Em seu trabalho, Mendes (2013) apresenta uma síntese dos modelos, os quais são apresentados no Quadro 7 e destaca que boa parte dos métodos, quando elaborados, foram feitos para o cenário europeu. Importante destacar que há mais modelos que aqueles demonstrados no Quadro 7, sendo que, por exemplo, existem mais de 50 modelos de AICV disponíveis somente na Europa (BUENO et al, 2012).

Portanto, deve-se atentar que nem todos os métodos são recomendados para ser aplicados em outras regiões, a não ser aqueles que têm abrangência global. Por exemplo, o método LIME foi desenvolvido para atender características ambientais do Japão, enquanto o TRACI para os Estados Unidos e o LUCAS para o Canadá (ZOCCHÉ, 2014). No Brasil a inexistência de um método de avaliação de impactos do ciclo de vida específico para as características ambientais brasileiras, resulta dificuldades na seleção de um método ideal para o estudo implica em dificuldades no momento de seleção de um método ideal para um estudo ACV (PIEKARSKI et al, 2012). Dessa maneira, os métodos sugeridos para o contexto brasileiro são expostos no Quadro 8.

Quadro 7- Disponibilidade de categoria de Impacto por Método.

Método	Categorias de Impacto								
	Mudanças Climáticas	Depleção da Camada de Ozônio	Acidificação	Eutrofização	Formação de foto-oxidantes	Ecotoxicidade	Toxicidade Humana	Consumo de Recursos	Uso da terra
CML 2002	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eco - Indicator 99	X	X	X	X		X	X	X	X
Ecological Scarcity	X	X			X		X	X	X
EDIP 97	X	X	X	X	X	X	X	X	
EDIP 2003	X	X	X	X	X	X	X		
EPS 2000							X	X	
Impact 2002 +	X	X	X	X	X	X	X	X	X
LIME	X	X	X	X	X	X	X	X	X
LUCAS	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MEEuP	X	X	X	X	X		X	X	
ReCiPe	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TRACI	X	X	X	X	X	X	X	X	X
USEtox						X	X		
IMPACT World +	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Adaptado de Mendes (2013).

Entretanto, Mendes (2013, p.81) coloca:

“Com relação às demais categorias de comparação, categoria de impacto, nível de avaliação e metodologias de normalização e ponderação, a opção pelo método AICV mais adequado a ser utilizado fica a critério dos objetivos e do escopo definidos no estudo ACV.”

Portanto, a escolha do método de cálculo deve estar condizente com as categorias de impacto, com as características do sistema estudado para que o cálculo do possível impacto seja fidedigno com a realidade.

Quadro 8- Modelos e categorias de Impacto sugeridas para o contexto brasileiro.

Modelos	Categorias de Impacto
CML 2002	Depleção de recursos abióticos, depleção de ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática (água doce/marinha), ecotoxicidade terrestre e eutrofização.
EDIP 97	Aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, enriquecimento de nutrientes, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo de recursos.
EPS 2000	Saúde Humana, expectativa de vida, morbidade grave e sofrimento, morbidade, incômodo grave, ambiente natural, capacidade de produção agrícola, capacidade de produção de madeira, capacidade de produção de peixe e carne, capacidade de cátions de base, capacidade de produção de água potável, consumo de recursos naturais, esgotamento de reservas de elementos, esgotamento de reservas fósseis (gás/petróleo/carvão), esgotamento de recursos minerais.
USEtox	Toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce.
IMPACT World +	Toxicidade humana, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozônio, aquecimento global, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso da água, uso da terra e uso de recursos.

Fonte: Adaptado de Mendes (2013).

3) Normalização

A magnitude do impacto caracterizado da etapa anterior é associada a uma referência comum (ABNT, 2009b). Um exemplo pode ser impacto causado por uma pessoa durante um ano em uma determinada região (JRC-IES, 2010). Essa etapa tem como objetivo uma melhor compreensão acerca da magnitude relativa de cada impacto (FERREIRA, 2004).

Ainda, é importante destacar que cada modelo tem uma forma de normalização intrínseca, sendo que nem todos apresentam essa opção.

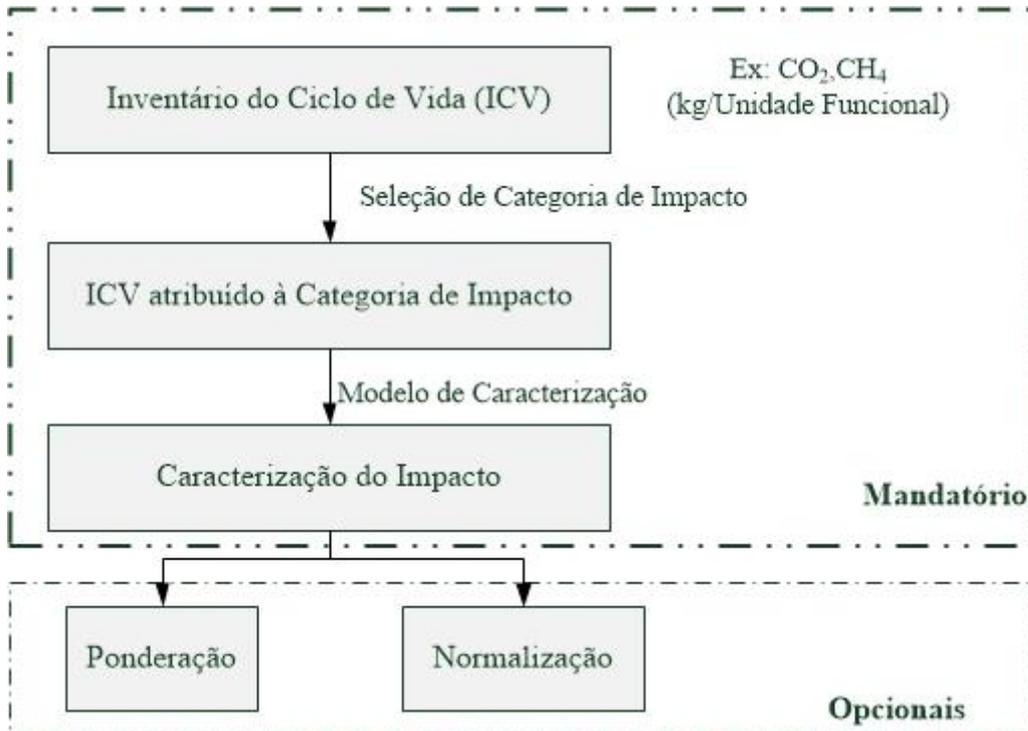
4) Ponderação

As diferentes categorias de impactos podem ser classificadas de acordo com sua relativa importância. Tal ponderação pode ser feita também para as diferentes áreas de proteção, caso seja de interesse da análise dar mais atenção para um determinado compartimento dos impactos.

Por fim, cabe destacar que os dois primeiros (classificação e caracterização) são de caráter obrigatório, enquanto que os demais são opcionais (ABNT, 2009a). A Figura 20 demonstra o procedimento efetuado nessa fase de forma didática, ou seja: os fluxos de entrada e saída do inventário são classificados conforme os diferentes tipos de impactos (análise

qualitativa), posteriormente são caracterizados (análise quantitativa), e após podem ser normalizados e/ou ponderados, etapas essas não obrigatórias (ABNT, 2009b).

Figura 20- Procedimentos inerentes à AICV.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.3.4. *Interpretação*

Interpretação é a fase da ACV na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são combinadas, de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações (ABNT, 2009a). Nesta fase, são identificados os temas de maior relevância ambiental, sendo que as constatações encontradas podem tomar a forma de conclusões e recomendações para os tomadores de decisões (ABNT, 2009a).

Ferreira (2004) subdivide esta etapa em três compartimentos, a saber:

1) Identificação dos pontos significativos: resultantes da análise do inventário e dos possíveis impactos, demonstrando os resultados de maior magnitude, por exemplo, com a utilização da análise de contribuição.

2) Avaliação (da consistência, completeza e análise da sensibilidade): análise da consistência dos dados em termos de correlação espacial, tecnológica, etc. A análise da

completeza tem objetivo garantir que todas as informações relevantes estejam presentes no inventário, enquanto que a análise de sensibilidade busca avaliar a confiança dos resultados, verificando se eles são afetados pelas incertezas dos dados. Ainda, é possível, por meio da análise de sensibilidade, fazer três abordagens complementares (ROSENBAUM, 2012):

- Análise do efeito de uma mudança fixa em um dado de entrada;
- Análise do efeito de uma alteração específica nos parâmetros de incerteza de um dado de entrada.
- Análise do efeito de uma mudança em um dado de entrada do seu valor mínimo até o máximo.

3) Conclusões, recomendações: tem como objetivo desenvolver as conclusões preliminares e verificar se estão coerentes com o objetivo e escopo do estudo.

A fase de interpretação pode envolver o processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV, assim como da natureza e da qualidade dos dados coletados, caso não seja atingido o nível requerido no objetivo e escopo do estudo.

3.3.4. Benefícios e Limitações

ACV é uma ferramenta de decisão que, durante a sua evolução, foi utilizada para um número crescente de aplicações, a saber (EEA, 1997):

- Uso interno na indústria para o desenvolvimento e melhorias de processos;
- Uso interno no planejamento e na política de decisão da indústria;
- Uso externo da indústria para marketing;
- Políticas governamentais de rotulagem ambiental, contratos públicos ecológicos e oportunidades em gestão de resíduos sólidos.

Segundo EPA (2006), na elaboração de um estudo ACV, os pesquisadores podem:

- Desenvolver uma sistemática avaliação das consequências ambientais associadas com um dado produto;
- Analisar os balanços ambientais associados com um ou mais produtos e processos específicos de modo a que os interessados (estado, comunidade, etc.) aceitem uma ação planejada;

- Quantificar as emissões ambientais para o ar, água, e solo relativos a cada estágio do ciclo de vida e/ou processos que mais contribuem;
- Avaliar os efeitos humanos e ecológicos do consumo de materiais e descargas ambientais para a comunidade local, região e o mundo;
- Comparar os impactos ecológicos e na saúde humana entre dois ou mais produtos/processos rivais ou identificar os impactos de um produto ou processo específico.
- Identificar impactos em uma ou mais áreas ambientais específicas de interesse.

Ainda, segundo Guiné et al (2004), as principais aplicações da ACV são:

- Analisar as origens dos problemas relacionados a um produto;
- Comparar as variantes de melhorias em um dado produto;
- Desenhar novos produtos com menores impactos ambientais;
- Escolha entre um número diferente de produtos comparáveis;
- Aplicação para rotulagem ambiental (“etiqueta verde” para produtos ambientalmente amigáveis).

Então, dados os usos da ACV, podem-se notar os diversos benefícios trazidos por essa metodologia, visto que sua utilização pode levar a produção com uma menor sobrecarga ambiental.

Por outro lado, a característica principal da ACV que é sua natureza “holística” é, ao mesmo tempo, sua força e sua limitação, uma vez que o âmbito de analisar todo o ciclo de vida de um produto só pode ser atingido à custa de simplificação de outros aspectos (GUINÉE et al, 2004). Entre as limitações desta ferramenta, incluem-se as seguintes (ABNT, 2009a):

- Natureza das escolhas e suposições feitas na ACV pode ser subjetiva (estabelecimento das fronteiras do sistema, seleção das fontes de dados, escolha de categorias de impacto, corte de fluxos insignificantes, alocação, etc);
- Modelos usados para análise de inventário ou para avaliar impactos ambientais são limitados pelas suas suposições;
- Resultados de estudos de ACV enfocando questões globais ou regionais podem não ser apropriados para aplicações locais;
- Exatidão dos estudos de ACV pode ser limitada pela acessibilidade ou disponibilidade de dados pertinentes, ou pela qualidade dos dados, por exemplo, falhas, tipos de dados, agregação, média, especificidades locais;

- Falta de dimensões espaciais e temporais dos dados do inventário usados para avaliar o impacto introduz incerteza nos resultados dos impactos.

Ainda, segundo Guinée et al (2004), ACV não consegue tratar com impactos localizados, nem variar no tempo, pois é uma análise em estado estacionário. Outros aspectos são levantados por este autor, como, por exemplo, ACV trata geralmente os processos como lineares, embora estejam ocorrendo alguns progressos para reduzir esta limitação. Além disso, os impactos ambientais são descritos como “impactos potenciais”, porque não estão especificados no tempo nem no espaço. Por fim, outra limitação importante é a disponibilidade de dados, embora haja o desenvolvimento de bases de dados em inúmeros países (GUINÉE, 2004), mas grande parte delas não é de acesso público, sendo necessário investimento para acessá-las.

3.3.5. Estudos de ACV na área da termelétrica

Estudos de ACV na área de energia elétrica, em geral, são bastante publicados devido à importância deste setor no meio industrial. Turconi et al. (2013) analisou 167 estudos envolvendo ACV de geração de energia elétrica baseada nas mais diferentes tecnologias e combustíveis utilizados. Neste estudo, que teve como foco o PAG, mostra que as emissões da operação das plantas representam a maior contribuição para as tecnologias de combustíveis fósseis (TURCONI et al., 2013). Resultados semelhantes a este, foram encontrados por Castelazo et al. (2011), que analisou o mix energético no México, chegou a uma contribuição para o PAG de 79% do impacto. No entanto, é imprescindível analisar não somente o PAG, que é a categoria de impacto com maior número de avaliações, para se ter uma avaliação do desempenho ambiental da geração elétrica (TURCONI et al., 2013).

Nesse sentido, estudos como o de Agrawal et al. (2014) complementa essa lacuna, uma vez que este autor utilizou os métodos CML 2001 e Eco-Indicator 99 (H) para avaliação de uma UTE na Índia que utiliza uma turbina a gás, com gerador de vapor e uma turbina a vapor, operando em ciclo combinado. Neste estudo, as categorias de impacto avaliadas foram: PAG, Eutrofização, Acidificação, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Aquática e Marinha.

Phumpradab et al (2009), que também analisou uma UTE a gás natural na Tailândia escolheu, como categorias de impacto: PAG, PA, Potencial de Enriquecimento de Nutrientes (PEN), e PFOF.

Importante destacar que todos os estudos tiveram, como fronteira do sistema, o portão da UTE, desconsiderando, dessa maneira, as etapas posteriores de distribuição e propriamente o consumo. Outro destaque é que a infraestrutura (construção e desconstrução) foi considerada uma questão não relevante para estudos sobre geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis, no entanto são relevantes para estudos com tecnologias renováveis e para usinas nucleares (TURCONI et al., 2013).

Em relação aos estudos nacionais mais recentes, foram encontrados somente artigos em relação à geração de energia elétrica com outras fontes energéticas. Como exemplo, pode-se citar o estudo de Delgado e Carvalho (2016) sobre o uso da ACV para verificação do potencial da energia solar fotovoltaica em reduzir a pegada de carbono do mix elétrico brasileiro. Neste estudo, foi calculado o potencial impacto de Aquecimento Global para diferentes tipos de geração, sendo que para o uso do Gás Natural, o PAG calculado foi de 523 kg CO₂ eq/MWh e para o HFO foi de 832 kg CO₂ eq/MWh. Importante destacar que tais cálculos foram baseados na base de dados do Ecoinvent, sendo que foi feita uma adaptação do mix elétrico brasileiro para condições mais atualizadas.

4. METODOLOGIA

4.1. Objetivo e Escopo

Os objetivos em um estudo de ACV devem ser declarados inequivocamente em três aspectos, como mostrado anteriormente no item 3.3.3.1 Objetivo e Escopo (p.49), os quais são: aplicação pretendida, razões de conduzir o estudo e público alvo.

Quanto à aplicação, este estudo objetivou a comparação entre o desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de uma UTE operando em duas configurações diferentes. Os modos de operação foram escolhidos de maneira a ser o mais fidedigno possível às condições reais de operação, com base nos relatórios de insumos utilizados nas duas configurações selecionadas.

Quanto às principais razões, este estudo torna-se interessante no sentido de analisar as modificações ambientais, em termos de potenciais impactos, ocasionadas pela troca de combustível utilizada numa usina termelétrica na Amazônia. Como já expresso anteriormente, o fornecimento de gás natural, extraído da própria Amazônia, foi o principal motivo para que as usinas termelétricas da região, que outrora utilizavam apenas HFO como combustível, passassem a utilizar GN. Nesse sentido, após comparação, serão feitas mais análises no modo de operação bicomcombustível, visto que este será o modo operante do sistema.

Quanto ao público alvo, este trabalho é direcionado ao meio acadêmico, aos praticantes de ACV e ao setor energético brasileiro. Os resultados podem ser utilizados para composição de base de dados ICV para o setor termelétrico brasileiro e, também, para avaliação dos possíveis impactos deste tipo de geração.

Por fim, o objetivo deste estudo é realizar ACV de uma UTE específica que recentemente foi convertida para operação bicomcombustível. Nesse sentido, será realizada uma comparação entre os modos de operação (somente com HFO e bicomcombustível). A ACV foi conduzida conforme a NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044. A seguir, são apresentados os itens que devem ser claramente definidos nos estudos ACV:

- **Função do Sistema**

A função de uma UTE é fornecer energia elétrica à rede de distribuição.

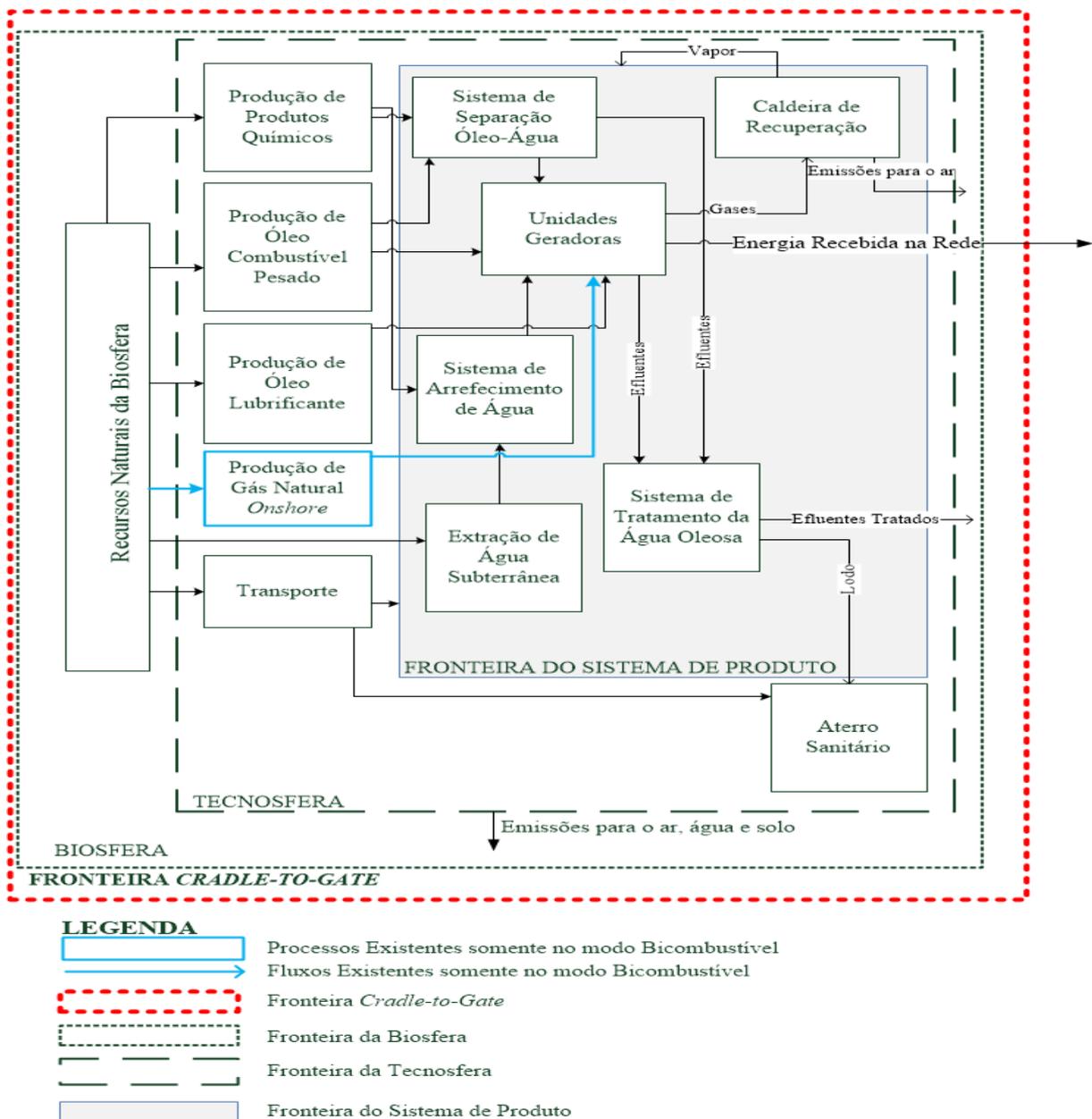
- **Unidade funcional**

A unidade funcional escolhida foi 1 (um) Megawatt-hora (MWh) de energia entregue à rede de distribuição.

- **Sistema de produto**

O sistema de produto para o ciclo de vida da geração elétrica a partir da UTE é apresentado na Figura 21 e é caracterizado pela operação da UTE propriamente dita, isto é, *gate-to-gate*. Importante destacar que na avaliação, o sistema de produto será considerado um processo unitário, uma vez que os dados disponíveis da UTE não permitem separar o sistema em mais processos unitários.

Figura 21- Fronteiras do Sistema e Escopo de Análise.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.1. Sistemas contidos na UTE

Neste item, serão discutidas as especificidades dos sistemas envolvidos na geração de energia elétrica na UTE deste estudo. Para tanto, utilizou-se bibliografia da fornecedora dos motores que são utilizados na UTE, bem como as especificações técnicas fornecidas pelos responsáveis da UTE por meio de relatórios descritivos de cada sistema (MULTINER, s.d).

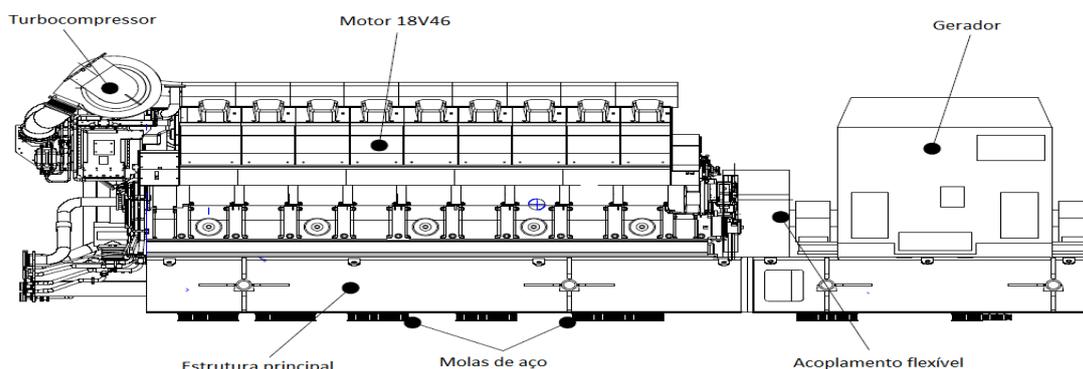
4.1.1.1. Grupo Gerador

A usina de energia elétrica é equipada com 5 motores do tipo Wärtsilä 18V46 C2 como acionadores principais. A UTE é projetada para usar gás natural e/ou óleo combustível pesado como combustível principal, sendo que o calor residual dos motores principais é usado para produzir energia térmica na forma de vapor para aquecimento do combustível, óleo lubrificante e demais usos na UTE.

Em 2009, os motores Wärtsilä 18V46 C2 da UTE começaram a ser convertidos para Wärtsilä 18V46 GD (Gás-Diesel) (OJUTKANGAS, 2016), sendo possível, ao motor, operar tanto com óleo combustível pesado ou gás natural em diferentes proporções de uso. Segundo a fabricante, o motor GD utiliza o processo de combustão diesel em todos os modos operacionais, sendo que no modo gás, este é injetado em alta pressão juntamente com o ar na câmara de combustão. Conforme COGEN (2011), a temperatura de ignição do HFO ocorre em geral aos 260° C enquanto que a do Gás Natural ocorre entre os 550 ° C, dessa maneira, ocorre primeiramente a combustão do combustível líquido que fornece a energia necessária para a ignição da mistura de ar e gás no cilindro. Na operação do motor GD, pode-se comutar o modo de operação de gás para combustível líquido de maneira instantânea. No modo bicombustível, a razão entre o combustível líquido e gasoso pode ser controlada e variada durante a operação (WÄRTSILÄ, 2014).

O grupo gerador consiste de um motor Wärtsilä 18V46 atuando como acionamento principal de um gerador trifásico, sendo que eles estão conectados por meio de um acoplamento flexível, o qual assegura que o gerador e o motor não sejam afetados de maneira adversa pelas suas respectivas operações. Ainda, com a finalidade de minimizar vibrações, o grupo gerador é estruturado às fundações por meio de molas de aço, como se pode perceber na Figura 22.

Figura 22- Grupo Gerador utilizado na UTE.



Fonte: Adaptado de Multiner (s.d).

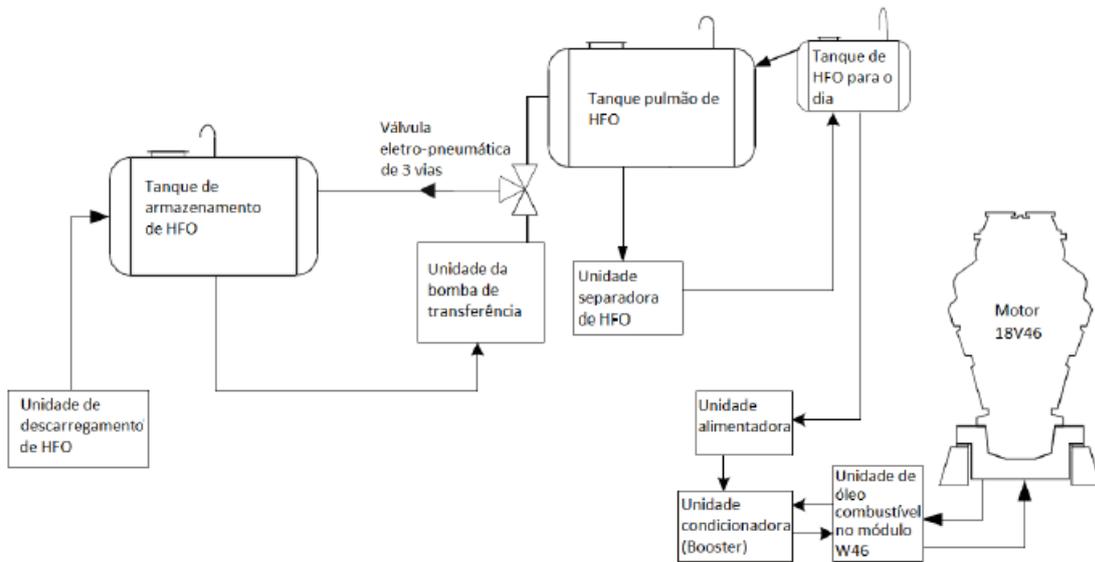
Ainda, o grupo gerador não pode executar sua função sem a ajuda de sistemas auxiliares, que tem como funções: fornecer combustível, óleo lubrificante, ar comprimido, ar de carga e resfriamento nas quantidades e qualidades necessárias ao motor, bem como descartar os gases de exaustão de maneira adequada.

4.1.1.2. Sistema de combustível

Há dois tipos de óleo combustíveis utilizados na UTE, que é o Óleo Combustível (HFO, em inglês) e Óleo Combustível Leve (LFO, em inglês) que são utilizados em situações distintas. O LFO é utilizado durante distúrbios operacionais, antes de manutenções ou em paradas mais longas enquanto que o HFO é utilizado como combustível de operação. A UTE também utiliza o GN como combustível, sendo que ela se encontrava em processo de transição para este combustível no período pesquisado. Devido a essa mudança recente, não há informações mais detalhadas sobre a utilização do GN nos motores, sendo que a base utilizada para entendimento do uso deste combustível é aquela utilizada no item 3.2.4.4 Usinas a Motores Alternativos, em que foi apresentada a utilização do GN em motores de combustão interna.

Quanto ao HFO, há um sistema de tanques e bombas que transportam o combustível até o motor, como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23- Diagrama do sistema HFO.



Fonte: Multiner (s.d).

O sistema HFO inicia na UTE pela unidade de descarregamento e, depois, é bombeado para o tanque de armazenamento. O combustível a ser utilizado, é transferido para o tanque pulmão, que funciona como armazenamento intermediário, onde é aquecido até aproximadamente 60° C e garante temperatura e pressão constantes na sucção dos separadores, melhorando o processo de limpeza do combustível. Após essa etapa, o combustível é bombeado para a unidade separadora, onde ele é tratado (retirada de água e impurezas) antes de ser transportado para o tanque do dia. A partir deste tanque, o combustível é transferido para o motor via bomba alimentadora e de condicionamento e também para a unidade de óleo, a qual protege o motor, proporcionando uma filtragem final antes da admissão do combustível no motor. Em caso de não utilização de todo combustível no tanque do dia, este é transportado novamente para o tanque pulmão.

Devido ao caráter de uso intermitente do LFO, não será discutido em maiores detalhes esse sistema, uma vez que não será utilizado na avaliação.

4.1.1.3. Sistema de óleo lubrificante

O funcionamento adequado do sistema de lubrificação protege o motor contra quebras devido à pressão muito baixa, temperatura elevada, pressão muito baixa de pré-lubrificação ou impurezas no óleo. Para tanto, é importante que seja mantida uma vazão adequada em todo o sistema para que o óleo lubrifique o motor e remova o calor (resfriamento) e a contaminação gerada pelo processo de combustão.

O sistema de circulação de óleo lubrificante conta com bomba de pré-lubrificação, que transfere o óleo do cárter do motor, bombeando-o através do trocador de calor resfriado pela água de resfriamento do motor. A temperatura do óleo de lubrificação em circulação no sistema de lubrificação do motor aumenta durante a operação e deve, portanto, ser resfriada. A plena carga, a temperatura sobe para 75 a 80 °C em função do tipo de motor.

4.1.1.4. Sistema de ar comprimido

O sistema de ar comprimido fornece ao motor o ar comprimido necessário para a partida para os dispositivos de segurança de bloqueio e fechamento. Ele também fornece o ar de serviço e ar de instrumentação para equipamentos auxiliares e para fins de manutenção e de limpeza.

4.1.1.5. Sistema de ar de carga

A principal função do sistema de ar de carga externo é fornecer ao motor um suprimento adequado de ar limpo e seco. O sistema de ar de carga é composto principalmente de tubulações, juntas flexíveis para compensar a expansão térmica, unidades de filtração na entrada de ar e silenciadores do ar de carga. O ar de combustão (ar de carga) é captado na parte externa do edifício (ar ambiente), por meio da unidade de filtração de ar através de um sistema de tubulação, equipado de silenciador que vai até os turbocompressores instalados no motor. O ar de carga comprimido é resfriado nos resfriadores do ar de carga antes de entrar no reservatório do ar de carga do motor.

4.1.1.6. Sistema de resfriamento

O sistema de resfriamento do motor remove o calor gerado pela operação normal do motor e ocorre principalmente no: bloco do motor, turbocompressor e trocadores de calor do ar de carga. O sistema apresenta um circuito único de resfriamento, sendo que todas as fontes de calor são resfriadas de forma sequencial e o resfriamento é realizado por radiadores com inversor de frequência, o que torna possível variar a carga de resfriamento conforme a taxa de produção do momento.

O sistema interno de água de resfriamento do motor é um sistema fechado que utiliza água tratada quimicamente, por meio de aditivos, para evitar corrosão e a formação de depósitos de incrustação ou outros depósitos que ocorrem em sistemas fechados de circulação. Para impulsionar o movimento da água, bombas centrífugas acionadas diretamente foram montadas no motor.

4.1.1.7. Sistema de Geração de Vapor

O sistema de recuperação de calor é utilizado para reciclar o calor dos gases da exaustão dos motores por meio do uso de uma caldeira de recuperação. Nesse sentido, o calor dos gases de exaustão gera o vapor que é conduzido pelas linhas de alimentação até os tanques de HFO, para os separadores de HFO e óleo de lubrificação e, por fim, para as unidades de alimentação e de condicionamento. Nesses lugares, os combustíveis (ou óleo de lubrificação) são aquecidos por trocadores de calor e o condensado retorna para o sistema de produção de vapor.

4.1.1.8. Sistema de Água Oleosa

A função do sistema de tratamento da água oleosa é coletar a água oleosa produzida na usina de energia, e separá-la em água tratada e lodo.

O processo de separação consiste em duas etapas, no qual as emulsões de óleo/água primeiro são quimicamente quebradas, de modo que o óleo emulsificado possa ser removido da água. O sistema opera com elementos químicos disponíveis no mercado brasileiro. Em uma segunda etapa, a água é conduzida por filtros de polimento. A água tratada pode ser misturada com outros fluxos de efluentes antes de descarregar da usina de energia. O lodo é descarregado do tanque de armazenamento para um caminhão-tanque por uma bomba operada manualmente.

O sistema de coleta é composto de valas de dreno instaladas para coletar a descarga em vários locais, tais como: unidades de separação, drenos do parque de tanques, drenos no piso na casa de força e drenos no piso da oficina. A água contaminada é tratada para limpar a fração de água e permitir sua descarga na natureza enquanto a parte sólida, separada no fundo, e o lodo oleoso mais leve são bombeados para o tanque de lodo.

4.1.1.9. Sistema de Exaustão

A exaustão do motor é descarregada na altura necessária, através do silenciador do gás de exaustão, que reduz o ruído do motor, e do tubo da chaminé. O gás de exaustão é descarregado através de chaminé própria.

- **Fronteiras do sistema de produto**

A fronteira do sistema de produto são os portões da UTE em questão. No entanto, neste trabalho, a ACV tem uma abordagem *cradle-to-gate*. Dessa maneira, na Figura 21, foram demarcadas outras fronteiras, a saber: tecnosfera, biosfera e *cradle-to-gate*. Na fronteira da tecnosfera, que é caracterizada por sistemas nos quais ocorrem transformações humanas (IBICT, 2014), encontram-se os processos unitários fornecedores de materiais para a usina. Na biosfera, encontram-se os recursos naturais que serão utilizados pelos processos da tecnosfera, bem como o recebimento das emissões deste sistema. Por fim, a fronteira *cradle-to-gate* compreende todas as etapas à montante da UTE, e compõe todos os processos envolvidos nesta ACV. Quando o sistema opera somente com o HFO, há somente a retirada dos processos oriundos da produção e utilização do Gás Natural (em destaque na Figura 21).

- **Procedimentos de Alocação**

O sistema de produto deste estudo não apresentou multifuncionalidade, uma vez que há somente a geração de um produto que é a energia recebida na rede elétrica, portanto, o procedimento de alocação não foi necessário neste estudo.

- **Metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada**

O método de cálculo utilizado para a avaliação do impacto é o CML IA *baseline*, versão 3.01, com uma abordagem *Midpoint* (PRÉ, 2016). Tal método foi escolhido devido a sua abrangência de impactos (depleção abiótica, aquecimento global, depleção da camada de Ozônio, toxicidade humana, toxicidade aquática, toxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização) e, também, por ser um método indicado para o Brasil (MENDES, 2013). O *software* empregado para modelagem é o SimaPro 8.0.3.14.

- **Requisitos dos dados**

Os dados dentro da fronteira do sistema da UTE serão, prioritariamente, primários, obtidos por meio de registros de operação mensal, relatórios de empresas terceiras que analisaram as emissões atmosféricas. Em caso de não obtenção dos dados primários, serão utilizados trabalhos científicos com relevância tecnológica, espacial e temporal com a tecnologia empregada na usina.

Para os processos unitários da tecnosfera, os dados serão provenientes de bases de dados disponíveis do software utilizado, que é Ecoinvent v3.0.

- **Suposições**

A fim de completeza no inventário, faz-se necessário utilizar de algumas suposições, as quais devem ser explicitamente explicadas e justificadas conforme as Normas (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Nesse sentido, serão apresentadas as suposições utilizadas neste trabalho.

- 1) Consumo de água

A água utilizada é proveniente de poços artesianos e é, posteriormente, tratada pela adição de produtos químicos para ser utilizada no arrefecimento do motor. Segundo informações da UTE, o ciclo é fechado e, por isso, apresenta um consumo mínimo de água (WÄRTSILÄ, 2013a). Colossi (2012) aponta que o consumo de água é 1800 litros por hora (L/h) com base em entrevista com o operador. Esse volume é recirculado e há uma reposição de água devido a perdas associada à evaporação.

Nesse sentido, para estimar o uso de água, considerou-se que a reposição de água é equivalente à água perdida por evaporação nesse sistema. Para tanto, utilizou-se a equação apresentada no trabalho de Torres (2006), a qual calcula a taxa de transferência de calor para o fluido de arrefecimento por meio da seguinte equação:

$$E = m * c * (T_Q - T_F) \quad (1)$$

Onde:

E = Taxa de calor retirado pelo fluido de arrefecimento [kW];

m = Vazão do fluido de arrefecimento [kg/s];

c = Calor específico do fluido de arrefecimento [kJ/kg. °C];

T_Q = Temperatura de saída do fluido do motor [°C];

T_F = Temperatura de entrada do fluido do motor [° C];

Algumas conversões de unidades foram efetuadas e, para tanto, utilizou-se a referência de Baukal (2004), que apresenta as conversões mais comuns. Por exemplo, o valor do calor específico do fluido de arrefecimento foi passado para kJ/ kg ° C pelo fator 4,184. Nesse sentido são apresentados os valores utilizados na Equação (2) no Quadro 9.

Quadro 9- Valores de Entrada da Equação 1.

Variável	Valor	Unidade	Referência
m	5E-1	kg/s	COLOSSI, 2012
T_Q	91	° C	WÄRTSILÄ, 2001
T_F	25	° C	WÄRTSILÄ, 2001
c	1	kcal/kg ° C	BAUKAL, 2004

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assumiu-se que todo o calor retirado será utilizado para a evaporação. Dessa maneira, utilizou-se a equação do calor latente de vaporização (Equação (3)) para calcular a massa de água evaporada.

$$Q = m * L \quad (3)$$

Onde:

Q = quantidade de calor latente (kJ/s);

m = massa a ser calculada (kg/s);

L = calor latente de vaporização da água (kJ/kg). O valor do calor latente de vaporização da água (540cal/g) (BAUKAL, 2004), foi convertida para kJ/kg a partir da multiplicação 4,184 kJ/kcal. Antes, a unidade foi passada de cal/g para kcal/kg, mas não implicou em multiplicação.

Dessa maneira, calcula-se a quantidade de água evaporada no sistema de arrefecimento, que será utilizada para estimar a reposição de água na operação.

2) Emissões Atmosféricas

As emissões atmosféricas foram estimadas por meio dos resultados de relatórios de amostragem de empresas especializadas, que analisaram os valores das emissões em diferentes condições de operação, como se pode perceber no Quadro 10

Quadro 10- - Relatórios de fontes estacionárias analisadas

Mês	Ano	Fontes Monitoradas (Chaminés)	Condições de Operação	Coletas	Repetições
Julho	2011	1 a 5	100% HFO	3	6
Outubro	2011	1 a 5	100% HFO	3	6
Abril	2012	1 a 5	100% HFO	3	6
Março	2013	2	90% HFO e 10% de GN	3	1
Abril e Maio	2013	1 e 3	10% HFO e 90% de GN	3	1
Maio	2013	5	10% HFO e 90% de GN	3	1
Junho	2013	4	10% HFO e 90% de GN	3	1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As amostragens foram realizadas baseando-se nas normas da EPA bem como nas Normas Brasileiras (NBRs) específicas de amostragem, entre as quais podem-se citar:

- ABNT/NBR – 10700/89 – Planejamento de amostragens em Dutos e Chaminés de fontes estacionárias;
- ABNT/NBR – 10701/89 – Determinação de pontos de Amostragens em Dutos e Chaminés de fontes estacionárias;
- ABNT/NBR – 10702/89 – Efluente gasoso em Dutos e Chaminés de fontes estacionárias – Determinação da Massa Molecular base seca;
- ABNT/NBR 11966/89 – Efluente gasoso em Dutos e Chaminés de fontes estacionárias – Determinação da Velocidade e Vazão;
- ABNT/NBR 11967/89 - Efluente gasoso em Dutos e Chaminés de fontes estacionárias – Determinação da Umidade;
- ABNT/NBR 12020/92 - Efluente gasoso em Dutos e Chaminés de fontes estacionárias – Calibração dos Equipamentos utilizados na amostragem;
- US – EPA Method 7E 08/14/90 Instrumental – Determinação de Óxidos Nitrosos (NO_x);
- US – EPA Method 3^a 6/13/90 Instrumental – Determinação de Dióxido de Carbono (CO₂) e Oxigênio (O₂);
- US – EPA Method 10B 11/08/94 Instrumental – Determinação de Monóxido de Carbono (CO) de fontes estacionárias;

As concentrações dos relatórios foram convertidas às condições referenciais de oxigênio, conforme preconiza a CONAMA 436/2011, pela equação (4).

$$Cr = \frac{21 - Or}{21 - Om} * Cm \quad (4)$$

Onde:

Cr = Concentração do poluente corrigida;

Or = Percentagem de oxigênio de Referência;

Om = Percentagem de oxigênio medido durante a amostragem;

Cm = Concentração do poluente determinada na amostra.

A referida Norma estabelece valores de concentração de oxigênio de referência para diferentes combustíveis e utilizações. Por exemplo, para a geração de calor proveniente do uso do óleo combustível o valor é 3% enquanto que para a geração elétrica a partir de gás natural o valor é 15%. Devido à variação, optou-se por 7% de O₂.

De posse das concentrações e vazões médias dos gases, a taxa de emissão foi calculada pela equação(5).

$$TE_{kg/h} = n * C_{(mg/Nm^3)} * Q_{\left(\frac{Nm^3}{h}\right)} * 10^{-6} \frac{(kg)}{(mg)} \quad (5)$$

Onde:

n= número de motores em funcionamento;

TE = Taxa de Emissão (kg/h);

C = Concentração média do poluente (mg/Nm³)

Q = Vazão média do gás de exaustão (Nm³/h);

É importante destacar que a consideração do número de motores é necessária, uma vez que cada motor apresenta sua chaminé própria, como mencionado anteriormente no item 4.1.1.9 sobre o Sistema de Exaustão.

Os valores de taxa de emissão (kg/h) foram relacionados com o tempo de operação de cada mês, resultando nas taxas de emissões mássicas para cada mês. Por sua vez, essas informações foram relacionadas com a energia entregue à rede nos referidos meses.

No decorrer da análise dos dados, verificaram-se inconsistências nos valores de emissão de Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO₂) nas diferentes

condições de operações. Considerando o que preconiza a Norma ISO 14040, em relação a estudos comparativos, é necessário que haja equivalência entre os sistemas por meio de, por exemplo, mesmas considerações metodológicas (ABNT, 2009a). Nesse sentido, considerou-se prudente utilizar os fatores de emissão apresentados pela empresa responsável, que são expostos no Quadro 11.

Quadro 11- Fatores de Emissão (kg/kcal)

Fatores de Emissão (kg/kcal)		
Poluente	Gás Natural	Óleo
CO ₂	2,106E-04	2,952E-04
CO	7,200E-08	5,940E-08

Fonte: Adaptado de Wärtsila (2013a).

De posse dos fatores de emissão, estes foram relacionados aos Poderes Caloríficos Inferiores (PCI) médios dos combustíveis utilizados na UTE nos referidos meses de uso. Dessa maneira, os PCI são apresentados no Quadro 12.

Quadro 12- Poder Calorífico Inferior (PCI) dos combustíveis empregados na UTE

Períodos	Óleo Combustível Pesado (kcal/kg)	Gás Natural (kcal/m ³)
Uso 100%HFO	9871,22	-
Uso de GN e HFO	9905,48	7528,00

Fonte: Elaboração Própria.

Por fim, calculam-se as taxas de emissão pela equação (6).

$$TE = PCI * FE \quad (6)$$

Onde:

TE= Taxa de Emissão (kg poluente/ kg ou m³ de combustível)

PCI= Poder Calorífico Inferior (kcal/kg) ou (kcal/m³);

FE= Fator de Emissão (kg poluente/ kcal energia do combustível)

As unidades da equação (5), quando em m³, referem-se ao Gás Natural. Por fim, os valores das taxas de emissão para os dois períodos são apresentados no Quadro 13. É importante destacar que o HFO, no período de utilização em conjunto com o GN, emite mais que quando utilizado sozinho, devido ao maior PCI no período.

Quadro 13- Taxas de Emissão de CO₂ e CO para os combustíveis utilizados na UTE.

Períodos	Combustível	Unidade	Taxa de Emissão	
			CO ₂	CO
Uso 100% HFO	HFO	kg/kg	2,914E+00	5,864E-04
Uso de GN e HFO	HFO	kg/kg	2,924E+00	5,884E-04
	Gás Natural	kg/m ³	1,585E+00	5,420E-04

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, os valores encontrados foram multiplicados pelas quantidades de combustíveis empregadas em cada período.

3) Efluentes Hídricos

Os efluentes hídricos gerados na UTE foram considerados como aqueles gerados no Sistema de Separação Óleo-Água, visto que - segundo informações coletadas na UTE - cerca de 2% do HFO é composto por água. Dessa maneira, calculou-se o volume de efluente com base neste dado, que foi calculado para Litro (L) a partir da densidade da absoluta da água em 70°C (que é a temperatura atingida neste sistema), cujo valor é 977,8 kg/m³.

Com o volume de efluente, foram calculadas as cargas a partir da equação (7):

$$L = V * C * 10^{-6} \frac{(kg)}{(mg)} \quad (7)$$

Onde:

L= Carga poluidora (kg);

V= Volume (L);

C= Concentração (mg/L).

Devido à falta de dados primários dessa temática, os valores de concentrações foram coletados do trabalho de França (2015), que analisou os efluentes gerados pela UTE Manaura, localizada em Manaus, que utiliza a mesma tecnologia empregada (mesmos motores) pela UTE em questão. França (2015) disponibiliza dados acerca das concentrações do efluente da UTE que tem uma abrangência de 6 anos (2008 - 2014), sendo que de 2008 a 2010 a UTE operava somente com HFO e no restante do tempo (2011-2014) com 90%GN e 10%HFO. Ambos períodos foram utilizados no presente trabalho para fins de elaboração dos cenários

propostos. Por fim, os parâmetros analisados por França (2015) que foram utilizados neste trabalho são apresentados no Quadro 14. Os dados brutos são apresentados no ANEXO A (para o modo de operação somente com HFO) e ANEXO B para modo bicomcombustível.

Quadro 14- Parâmetros utilizados na carga poluidora da UTE

Parâmetros	Unidade
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg O ₂ / L
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	mg O ₂ / L
Fenóis Totais	mg C ₆ H ₅ O/L
Fosfato	mg P/L
Nitrato	mg N/L
Nitrito	mg N/L
Óleos e Graxas	mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L
Sólidos Suspensos	mg/L
Sólidos Sedimentáveis	mg/L
Sulfato	mg SO ₄ /L
Sulfeto	mg S/L

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4) Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos provenientes da operação da UTE foram considerados como sendo a borra oleosa, gerada no Sistema de Tratamento da Água Oleosa. Para a caracterização deste resíduo, utilizou-se o trabalho de França (2015), uma vez que não há dados primários para geração desse resíduo. Os dados acerca da geração da borra oleosa têm a mesma extensão temporal daqueles mostrados anteriormente na parte dos efluentes hídricos.

A geração de borra oleosa está associada ao consumo de HFO bem como ao bom funcionamento dos motores. Como as UTEs utilizam o mesmo fornecedor de motores, os quais têm uma rígida inspeção, monitoramento e manutenção, considerou-se que o desempenho dos motores são iguais. Nesse sentido, relacionou-se o uso de HFO e a geração de borra do trabalho de França (2015) e deslocou-se esse desempenho para os motores da UTE em questão. Os valores da geração de borra, em percentuais, em relação ao uso de HFO são apresentados no Quadro 15. Os dados brutos são apresentados no ANEXO C e ANEXO D para modo de operação com somente HFO e bicomcombustível respectivamente.

Por fim, os valores médios de cada tipo de operação foram multiplicados pelas quantidades de HFO empregadas em cada período. Quanto à destinação, a borra oleosa é encaminhada para Aterro da região, cerca de 50 km da UTE.

Quadro 15- Geração de Borra Oleosa.

Ano	Geração de Borra Oleosa (em relação ao consumo de HFO)	Condição de Operação
2008	0,503%	100 % HFO
2009	0,866%	
2010	0,698%	
2011	0,949%	90 % GN e 10% HFO
2012	1,786%	
2013	1,765%	
2014	2,613%	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5) Utilização de Substâncias Químicas

Há inúmeros produtos químicos utilizados pela UTE, sendo que seus usos são, basicamente, para dois propósitos: tratamento da água de arrefecimento e separação óleo-água. A fim de estabelecer um entendimento sobre a composição dos produtos químicos utilizados, uma vez que são essas substâncias que se tornam dados de entrada na etapa de inventário, fez-se uma análise nas referidas Fichas de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ). Ainda, foi necessário relacionar as substâncias, presentes nos produtos químicos usados, àquelas presentes na base de dados do *software* empregado. Nesse sentido, foi necessário realizar algumas considerações, a saber:

- Para produtos químicos que tenham mais de uma substância, sendo que somente uma delas esteja na base de dados, considerou-se a soma de todas as substâncias igual àquela presente no *software*;
- Para produtos químicos que não tenham nenhuma substância química presente na base de dados, procurou-se por sinônimos de substância;
- Caso não haja dados disponíveis na base de dados do *software* nem para substância, nem para os sinônimos, as substâncias serão desconsideradas.

Por fim, apresenta-se no Quadro 16 os produtos empregados, bem como sua composição e existência na base de dados do SimaPro.

Quadro 16- Produtos Químicos utilizados na UTE.

Produto Químico	Substâncias presentes			Existência no software	Fonte
	Nome	Composição (% mássica)	Número CAS		
Corrrsheild MD 4100	Molibdato de Sódio	10 a 20	7631-95-0	Não	GE Betz (2011)
	Nitrito de Sódio	7 a 13	7632-00-0	Sim	
Betzdearborn PQ 682	Ácido Fosfórico	2,5 a 10	53006-98-7	Sim	GE Betz (2016)
	Tetra Sódio (1- Hidroxi etilideno) bisfosfonato	2,5 a 10	3794-83-0	Não	
Cortrol OS 5607	Dihidrazida Carbônica	5 a 10	497-18-7	Não	GE Betz (2003)
Steamate 560	Morfolina	15 a 40	110-91-8	Não	Ge Betz (2012)
	Ciclo Hexilamina	15 a 40	108-91-8	Não	
Optisperse ADJ 5050	Hidróxido de Sódio	40 a 60	1310-73-2	Sim	GE Betz (2013)
Hypersperse MSI 310	5-cloro-2-metil-4-iso-tiazolin-3-one	< 0,0015	55965-84-9	Não	Ge Betz (2003a)
	2-metil-4-iso-tiazolin-3-one		-		
Floculante Polyfloc CP 1600	Ácido adípico	2.5 a 10	124-04-9	Sim	GE Betz (2014)
	Acrilamida/Trimetilamino acrilato de etila	-	69418-26-4	Sim	
Coagulante Klaraid PC 2700	Formaldeído	0.1 a 1	50-00-0	Sim	GE Betz (2011a)
	Monoetanolamina	3.0 a 7.0	2002-24-6	Sim	
Inhinior AZ 8104	Clorotoltriazole	10 a 20	202420-04-0	Não	GE Betz (2010)
	Diclorotoltriazole	3 a 7		Não	
	Tolitriazol	1 a 5	64665-57-2	Não	
	Hidróxido de Sódio	1 a 5	1310-73-2	Sim	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Portanto, de 9 produtos químicos, 2 são considerados em plenitude (ou seja, com todas as substâncias do produto químico inserida na avaliação), 4 são consideradas de maneira simplificada (somente uma substância) e 3 produtos químicos não foram considerados na

avaliação devido à inexistência de dados. Um produto que não foi destacado no Quadro 16 é o Corrrshield NT 4200, visto que foi utilizado uma vez em substituição ao Corrrshield MD 4100, no entanto o produto substituinte tem, em sua composição majoritária, a mesma substância química que o substituído (GE BETZ, 2014a). Assim, considerou-se a adição da substância devido ao uso desse produto químico também.

No Quadro 17, são apresentas as referências empregadas para a modelagem dos produtos químicos utilizados na UTE. Os processos citados são oriundos da base de dados do *Ecoinvent* e estão disponíveis no software *SimaPro*.

Quadro 17- Processos da Base de Dados para as substâncias utilizadas.

Substância	Processo da Base de dados	Fonte
Nitrito de Sódio	Sodium Nitrite {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3
Ácido Fosfórico	Phosporic Acid, Industrial grade, without water, in 85% solution State {RoW} Alloc Def, U	Ecoinvent 3
Hidróxido de Sódio	Neutralising Agent, sodium Hydroxide-equivalent {GLO} Sodium Hydroxide to generic market for neutralising agent Alloc Def, U	Ecoinvent 3
Ácido adípico	Adipic Acid {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3
Acrilamida/Trimetilamino acrilato de etila	Ammonium Chloride {GLO} Production Alloc Def, U	Ecoinvent 3
Formaldeído	Formaldehyde {GLO}- market for Alloc Def, U	Ecoinvent 3
Monoetanolamina	Monoethanolamine {RoW} Ethanolamine Production Alloc Def, U	Ecoinvent 3

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ainda, os produtos químicos mencionados são fornecidos por uma mesma empresa, que está situada no município de Sorocaba, no estado de São Paulo. A distância considerada entre esta cidade e a UTE é de 3996 km, levando em conta o trajeto das rodovias. O processo

utilizado para simulação no *software* foi o “Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RoW}”, que é responsável pela maior parte da carga transportada no Brasil em ton.km (WORLD BANK, 2011). Para todos os transportes terrestres, esse processo foi considerado, bastando somar as distâncias e as cargas transportadas no cálculo. Importante destacar que este procedimento foi empregado para aqueles processos que não tinham transporte associado. Sendo assim, por exemplo, não contabilizou-se o transporte para o Formaldeído, uma vez que o processo já continha o transporte.

6) Transporte do HFO

Segundo informações coletadas na UTE, o HFO utilizado tem duas origens: parte do combustível (metade dele) é proveniente da Venezuela e a outra metade é de origem nacional.

O HFO importado é transportado por navio. Para saber a distância entre os portos, fez-se uma análise de todos os portos da Venezuela por meio da ferramenta *online Sea Distances*, que calcula as distâncias entre os portos do mundo. Os portos bem como suas distâncias são apresentados no Quadro 27 no APÊNDICE A. Considerou-se a maior distância como sendo aquela empregada no deslocamento, com um valor de 4837,42 km. O processo utilizado para simulação no *software* foi o “Transport sea ship, 35000 DWT, 100%LF, long, empty return/GLO”. Para fins de análise de sensibilidade, será considerado um cenário com a menor distância entre os portos para detecção se há alterações significativas nos resultados.

Considerou-se, neste trabalho, que o petróleo utilizado é oriundo de Urucu. Como já mencionado anteriormente (item 3.2.2.2 Derivados do Petróleo), o transporte do petróleo processado ocorre por meio de oleoduto (285 km) e o restante do percurso é feito por navio até a Refinaria Isaac Sabbá (REMAN), em Manaus. Segundo informações da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), a distância entre os portos de Coari e de Manaus é de 452 km (ANTAQ, 2016).

Em seguida, o transporte até a UTE é feito por via rodoviária por cerca de 50 km. Segundo relatório de informações portuárias, o trecho fluvial de aproximação do terminal de Coari, onde há o recebimento do petróleo pelos navios, permite a navegação de navios petroleiros de até 30.000 TPB (Tonelada de Porte Bruto) (TRANSPETRO, 2006). Nesse sentido, considerou o processo citado anteriormente para o transporte de navio, uma vez que os limites de peso são semelhantes.

- **Limitações:**

De maneira geral, pode-se fazer um paralelo entre as considerações e as limitações do trabalho, uma vez que aquelas são feitas para contornar as limitações da coleta de informações.

Quanto à UTE, as limitações de dados impuseram ao sistema de produto a ser trabalhado como um processo unitário, sendo que o ideal seria uma maior divisão dos processos para obter-se resultados de impactos mais localizados dentro do sistema da UTE. Além disso, a tecnologia empregada na UTE é singular, visto que a empresa fornecedora do motor aprimorou a tecnologia de combustão para dois combustíveis diferentes. Isto se torna uma limitação no sentido da geração dos gases da combustão, uma vez que, numa mistura de combustíveis, as emissões podem variar daquelas calculadas por fatores de emissão. Nessa temática, ainda, a despeito dos dados sobre emissões serem primários, a abrangência de amostragem dos gases foram realizadas para aqueles parâmetros que são obrigatórios conforme o licenciamento ambiental da planta térmica, mas não para uma avaliação ambiental plena, que cobriria mais poluentes atmosféricos. Por exemplo, nas medições realizadas não houve análise de Compostos Orgânicos Voláteis (COV).

Em relação à cobertura temporal das informações disponibilizadas pela UTE quanto aos insumos, ela é de um ano (2013), disponibilizados de forma mensal a partir de relatórios de operação e relatório gerencial anual. Nesse intervalo de tempo, houve a mudança de tecnologia, que pode influenciar o consumo de alguns produtos devido ao período de acomodação da operação aos novos procedimentos inerentes da nova tecnologia. Ainda, devido à transição existente, fez-se a avaliação da UTE utilizando somente HFO, que ocorreu durante os três primeiros meses do ano, enquanto que no restante do ano a UTE utilizou tanto HFO quanto GN. Nesse sentido, há um descompasso de cobertura temporal entre as duas condições de operação, no entanto fez-se essa opção para manter a fidedignidade das operações que ocorreram na UTE no período.

Quanto aos efluentes e resíduos sólidos gerados na UTE, a limitação foi imposta devido à falta de dados primários, que foi suprimida com dados secundários da UTE Manaura, que utiliza o mesmo arranjo tecnológico empregado na UTE em questão. Dessa maneira, ainda que sejam dados secundários, a relação tecnológica e espacial é bastante precisa. Vale destacar que a condição de operação da UTE Manaura também passou por o momento de transição de HFO para GN, sendo que os dados foram separados na condição de 100 % de uso HFO para 90% HFO e 10% GN (FRANÇA, 2015). Neste ponto reside a limitação, visto que, neste trabalho, não foi considerada essa condição de operação, mas sim a condição real que

aconteceu no período de 2013, quando houve uso concomitante dos dois combustíveis supracitados.

Há limitação também nas considerações realizadas sobre os produtos químicos, uma vez que alguns produtos químicos não foram considerados na avaliação, devido à inexistência destes nas bases de dados. Ainda, a maior fonte de informações sobre os produtos químicos é a FISPQ a qual tem um regramento no Brasil conforme a ABNT NBR 14725. Segundo essa Norma, a FISPQ é um meio de transferir informações sobre os riscos de um produto químico ao usuário (ABNT, 2001). Sendo assim, no item de composição do químico, somente há informações daqueles que causam riscos à saúde e perigo de manuseio. Dessa maneira, se, por ventura, houver em um determinado químico uma quantidade de material que não cause riscos (água, por exemplo), esta informação não estará na FISPQ e, por conseguinte, não será considerada na ACV.

- **Tipo de formato do relatório requerido para o estudo**

Este estudo de ACV foi desenvolvido com o propósito de atender tanto aos preceitos acadêmicos quanto às Normas NBR ISO (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Devido a esse duplo atendimento, o relatório previsto na NBR ISO 14040:2009 foi substituído por esta dissertação, uma vez que esta preenche os requisitos apontados pela referida Norma.

Por fim, com o atendimento de todos os itens obrigatórios previstos na NBR ISO 14040:2009 para a parte de Objetivo e Escopo, será abordado, no próximo item, sobre a Análise de Inventário do Ciclo de Vida.

4.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida

As considerações efetuadas para a elaboração do ICV foram previamente discutidas no item anterior, de acordo como estabelece a Norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a).

Pela análise dos relatórios de operação obtiveram-se as quantidades dos fluxos de entrada do sistema de produto. Para a avaliação, adotou-se o valor médio de cada insumo utilizado. Os fluxos de saída (exceto o de referência e de emissões atmosféricas), por sua vez, foram calculados com base no trabalho de França (2015). Para o cálculo dos resíduos, foi feita uma correlação com o uso de HFO, visto que é o maior contribuinte na geração do resíduo, gerando um fator de produção de borra oleosa. Assim, multiplicou-se o fator ao consumo de HFO do ICV, resultando na quantidade de borra.

Para os efluentes líquidos, calcularam-se os valores médios das amostras, que foram utilizadas no cálculo da carga poluidora conforme a Equação (7). O fluxo de referência foi calculado com base nos relatórios de operação, utilizando a média da energia entregue a subestação em cada período.

Com os valores médios de fluxos de entrada e do fluxo de referência, fez-se a correlação à unidade funcional pela divisão deles respectivamente. Para a modelagem no *software*, utilizaram-se parâmetros, além dos fatores de emissão já apresentados no Quadro 13, para uma maior agilidade da elaboração do inventário, e são apresentados no Quadro 18.

Quadro 18- Parâmetros utilizados na avaliação.

Parâmetro	Valor	Unidade	Comentário
Energia Recebida_HFO	4,42E+04	MWh	Energia entregue à subestação no modo de operação somente com HFO
Energia Recebida_GN	4,39E+04	MWh	Energia entregue à subestação no modo de operação bicombustível
Distância 1	4300	km	Distância entre Rio de Janeiro e Manaus (Óleo Lubrificante)
Distância 2	4837,42	km	Distância entre portos da Venezuela e Manaus (HFO Importado)
Distância 3	3996	km	Distância entre Cotia (SP) e Manaus (Aditivos químicos)
Distância 4	50	km	Distância entre Manaus e UTE/ Distância entre UTE e Aterro
Distância 5	663,2	km	Gasoduto Urucu-Coari-Manaus (Gás Natural)
Distância 6	452	km	Distância entre portos Coari e Manaus (HFO nacional)
Distância 7	285	km	Extensão do Oleoduto Urucu-Coari (HFO nacional)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3. Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida

A escolha do método de AICV já foi realizada no capítulo 4.1 Objetivo e Escopo. O método bem como suas categorias de impacto já foram discutidos no 3.3.3.3 Avaliação dos Impactos.

4.4. Interpretação

Nesta fase será feita a análise de contribuição, que é utilizada para identificar os processos e substâncias responsáveis por contribuições significativas nos impactos. Além disso, será realizada análise de sensibilidade para determinar as possíveis variações que

ocorrem nos resultados devido à mudança de alguns dados e/ou parâmetros utilizados na avaliação. Ainda, será feita análise de incerteza utilizando o método de Monte Carlo (MC), que é um método estocástico (BOGUSŁAW, 2014) e permite gerar simulações a partir dos valores médios, superior e inferior (PRÉ, 2016a) baseadas em números aleatórios (MACIEL, 2014). Por fim, As simulações de MC foram conduzidas no software SimaPro com intervalo de confiança de 95% e mil ciclos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da ACV realizada. Inicialmente, serão apresentados os respectivos inventários para cada configuração de operação. Depois, a AICV será mostrada e, por fim, a interpretação com a análise de contribuição, de sensibilidade e de incerteza.

5.1. Inventário do Ciclo de Vida

A seguir, serão expostos os fluxos de entrada e saída que estão presentes no sistema de produto. Além dos valores médios, foram modelados no *SimaPro* as quantidades mínimas e máximas para a posterior simulação de MC. Antes, apresenta-se o Quadro 19, o qual mostra a energia entregue à subestação mensalmente, bem como o valor médio do período de cada modo de operação. Dessa maneira, a média dos três primeiros meses é referente ao modo de operação somente com HFO e o restante do ano, para o modo bicomcombustível. Portanto, os fluxos de entrada e saída do sistema de produto serão relacionados a esses dois valores médios, os quais resultam na unidade funcional do sistema para os dois modos de operação.

Quadro 19- Energia recebida na Sub Estação por mês.

Mês	Energia Recebida na Subestação (MWh)	
	Mensal	Média
1	4,58E+04	4,42E+04*
2	4,08E+04	
3	4,60E+04	
4	4,25E+04	4,39E+04**
5	4,25E+04	
6	-	
7	3,65E+04	
8	4,48E+04	
9	4,58E+04	
10	-	
11	4,68E+04	
12	4,83E+04	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nota: *Operação somente com HFO. **: Operação Bicomcombustível.

5.1.1. ICV para Operação com HFO

A operação com HFO refere-se aos três primeiros meses da base de dados disponibilizada pela Usina. Os fluxos de entrada e saída da UTE para este período de tempo são exibidos no Quadro 28 no APÊNDICE B assim como os valores mínimos e máximos

associados. Os transportes associados aos insumos não foram incluídos no Quadro 28, mas foram considerados como já destacados no item 4.1 Objetivo e Escopo.

Por fim, relacionando os dados do Quadro 28 com a energia média entregue à sub estação do Quadro 19 para o período de operação somente com HFO, resulta no ICV para o sistema de produto, que é mostrado no Quadro 20.

Quadro 20- ICV para a UTE no modo de operação somente com HFO.

Fluxo		Substância	Unidade (1/MWh)	Média	Mínimo	Máximo
Sentido (Origem/Destino*)	Compart* *					
Entrada (T)		HFO	kg	2.02E+02	1.86E+02	2.11E+02
Entrada (T)		Óleo Lubrificante	kg	5.27E-01	4.93E-01	5.95E-01
Entrada (T)		Nitrito de Sódio	kg	1.42E-03	0.00E+00	1.70E-03
Entrada (T)		Ácido Fosfórico	kg	1.22E-05	1.09E-05	1.45E-05
Entrada (T)		Hidróxido de Sódio	kg	6.71E-04	6.79E-05	8.37E-04
Entrada (T)		Ácido Adípico	kg	6.11E-06	5.43E-06	7.24E-06
Entrada (T)		Acrilamida	kg	3.17E-06	2.04E-06	4.75E-06
Entrada (T)		Formaldeído	kg	2.26E-05	1.13E-05	3.39E-05
Entrada (T)		Monoetanolamina	kg	1.58E-04	7.92E-05	2.38E-04
Entrada (E)		Água	L	3.20E+00	2.94E+00	3.46E+00
Saída (T)		Borra Oleosa	kg	1.39E+00	1.28E+00	1.46E+00
Saída (E)	água	DQO	kg	6.87E-01	1.32E-01	2.22E+00
Saída (E)	água	DBO	kg	1.34E-01	2.65E-02	3.79E-01
Saída (E)	água	Fenóis Totais	kg	1.01E-03	4.14E-04	2.07E-03
Saída (E)	água	Fosfato	kg	2.01E-02	8.28E-04	4.18E-02
Saída (E)	água	Nitrato	kg	8.48E-03	4.14E-04	4.22E-02
Saída (E)	água	Nitrito	kg	2.82E-01	4.14E-04	2.62E+00
Saída (E)	água	Óleos e Graxas	kg	4.74E-02	3.31E-03	2.03E-01
Saída (E)	água	Sólidos Dissolvidos Totais	kg	1.82E+00	7.45E-03	4.05E+00
Saída (E)	água	Sólidos Suspensos	kg	4.91E-01	1.28E-02	1.51E+00
Saída (E)	água	Sólidos Sedimentáveis	kg	5.06E-04	0.00E+00	2.07E-03
Saída (E)	água	Sulfato	kg	4.07E-03	0.00E+00	2.03E-02
Saída (E)	água	Sulfeto	kg	2.18E-03	0.00E+00	4.14E-03
Saída (E)	ar	Monóxido de Nitrogênio (NO)	kg	4.16E+01	2.95E+01	5.04E+01
Saída (E)	ar	Óxido de Nitrogênio (NOx)	kg	6.43E+01	4.31E+01	7.91E+01
Saída (E)	ar	Dióxido de Enxofre (SO2)	kg	4.83E+00	2.21E+00	7.73E+00
Saída (E)	ar	Material Particulado (MP) como Partículas Totais	kg	3.41E+00	2.64E+00	4.05E+00
Saída (E)	ar	Dióxido de Carbono (CO2)	kg	5.90E+02	5.42E+02	6.16E+02

Fluxo		Substância	Unidade (1/MWh)	Média	Mínimo	Máximo
Sentido (Origem/ Destino*)	Compart* *					
Saída (E)	ar	Monóxido de Carbono (CO)	kg	1.19E-01	1.09E-01	1.24E-01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: * (E): Ecosfera ou (T): Tecnosfera **:Compartmento

5.1.2. ICV para modo bicombustível

A operação bicombustível refere-se ao restante do ano base de dados (2013). Os fluxos de entrada e saída da UTE para este período de tempo são exibidos no Quadro 29 no APÊNDICES C.

Por fim, relacionando os dados do Quadro 29 com a energia média entregue à sub estação do Quadro 19 para o período de operação bicombustível, resulta na tabela do ICV para o sistema de produto, que é exposta no Quadro 21.

Quadro 21- ICV para o modo de operação bicombustível.

Fluxo		Substância	Unidade (1/MWh)	Média	Mínimo	Máximo
Sentido (Origem*)	Compart**					
Entrada (T)		HFO	kg	7.56E+01	4.24E+01	1.54E+02
Entrada (T)		Gás Natural	m ³	1.90E+02	6.61E+01	2.54E+02
Entrada (T)		Óleo Lubrificante	kg	6.33E-01	5.36E-01	7.73E-01
Entrada (T)		Nitrito de Sódio	kg	7.55E-04	9.02E-05	1.62E-03
Entrada (T)		Ácido Fosfórico	kg	1.41E-05	7.29E-06	1.82E-05
Entrada (T)		Hidróxido de Sódio	kg	2.88E-04	0.00E+00	5.47E-04
Entrada (T)		Ácido Adípico	kg	2.34E-06	6.83E-07	4.10E-06
Entrada (T)		Acrilamida	kg	2.34E-06	6.83E-07	4.10E-06
Entrada (T)		Formaldeído	kg	2.70E-05	1.14E-05	4.56E-05
Entrada (T)		Monoetanolamina	kg	1.89E-04	7.97E-05	3.19E-04
Entrada (E)		Água	L	2.79E+00	2.37E+00	2.94E+00
Saída (T)		Borra Oleosa	kg	1.34E+00	7.55E-01	2.74E+00
Saída (E)	água	DQO	kg	3.87E-01	4.64E-02	1.38E+00
Saída (E)	água	DBO	kg	1.43E-01	1.39E-02	3.29E-01
Saída (E)	água	Fenóis Totais	kg	2.87E-04	0.00E+00	7.73E-04
Saída (E)	água	Fosfato	kg	7.31E-03	0.00E+00	1.93E-02
Saída (E)	água	Nitrato	kg	3.29E-03	0.00E+00	1.08E-02
Saída (E)	água	Nitrito	kg	1.11E-03	0.00E+00	5.41E-03
Saída (E)	água	Óleos e Graxas	kg	1.69E-02	1.55E-03	3.56E-02
Saída (E)	água	Sólidos Dissolvidos Totais	kg	6.68E-01	1.58E-02	1.40E+00
Saída (E)	água	Sólidos Suspensos	kg	6.54E-02	1.55E-02	3.23E-01
Saída (E)	água	Sólidos Sedimentáveis	kg	7.37E-05	0.00E+00	1.55E-03

Fluxo		Substância	Unidade (1/MWh)	Média	Mínimo	Máximo
Sentido (Origem*)	Compart **					
Saída (E)	água	Sulfato	kg	2.95E-02	0.00E+00	1.24E-01
Saída (E)	água	Sulfeto	kg	5.23E-04	0.00E+00	1.24E-03
Saída (E)	ar	Óxido de Nitrogênio (NO _x)	kg	2.51E+01	1.99E+01	2.92E+01
Saída (E)	ar	Óxidos de Enxofre (SO _x)	kg	2.29E+00	1.35E+00	3.05E+00
Saída (E)	ar	Material Particulado (MP) como Partículas Totais	kg	1.10E+00	7.42E-01	1.28E+00
Saída (E)	ar	Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	5.22E+02	2.29E+02	8.54E+02
Saída (E)	ar	Monóxido de Carbono (CO)	kg	1.47E-01	6.08E-02	2.28E-01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: * (E): Ecosfera ou (T): Tecnosfera **: Compartimento

Como este estudo trata sobre a comparação da operação da UTE, é necessário destacar as diferenças entre ambos os inventários. Em relação às entradas, houve uma diminuição de 6 produtos, com maior destaque para o Ácido Adípico, que no modo bicomustível representa 38% do uso no modo somente com HFO. Por outro lado, o óleo lubrificante teve um aumento de 20% devido ao sistema de compressores, que comprime o gás natural e que utiliza óleo lubrificante em sua operação (FRANÇA, 2015). Em relação aos fluxos de saída, houve uma redução de 73% nos fluxos para todos os compartimentos, mas houve também alguns aumentos, como é o caso da DBO, Sulfato e CO.

5.2. Avaliação de Impacto

Neste item será apresentada a significância dos impactos ambientais potenciais, conforme o modo de operação e, posteriormente, a comparação entre eles.

5.2.1. Operação com HFO

Os resultados dos potenciais impactos caracterizados absolutos para o modo de operação com HFO são apresentados no Quadro 22 em termos numéricos totais e na Figura 24 em termos percentuais da contribuição dos processos constituintes.

Pela análise da Figura 24, pode-se perceber que a UTE, operando com HFO, tem uma concentração maior nos seguintes potenciais impactos: Aquecimento Global, Toxicidade Humana, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Acidificação e Eutrofização. No impacto de Ecotoxicidade Aquática, há praticamente um empate entre o Aterro Sanitário e a Produção de

HFO em termos de contribuição. Nos demais impactos, exceto Ecotoxicidade Aquática, a produção do HFO é o maior contribuinte para os impactos.

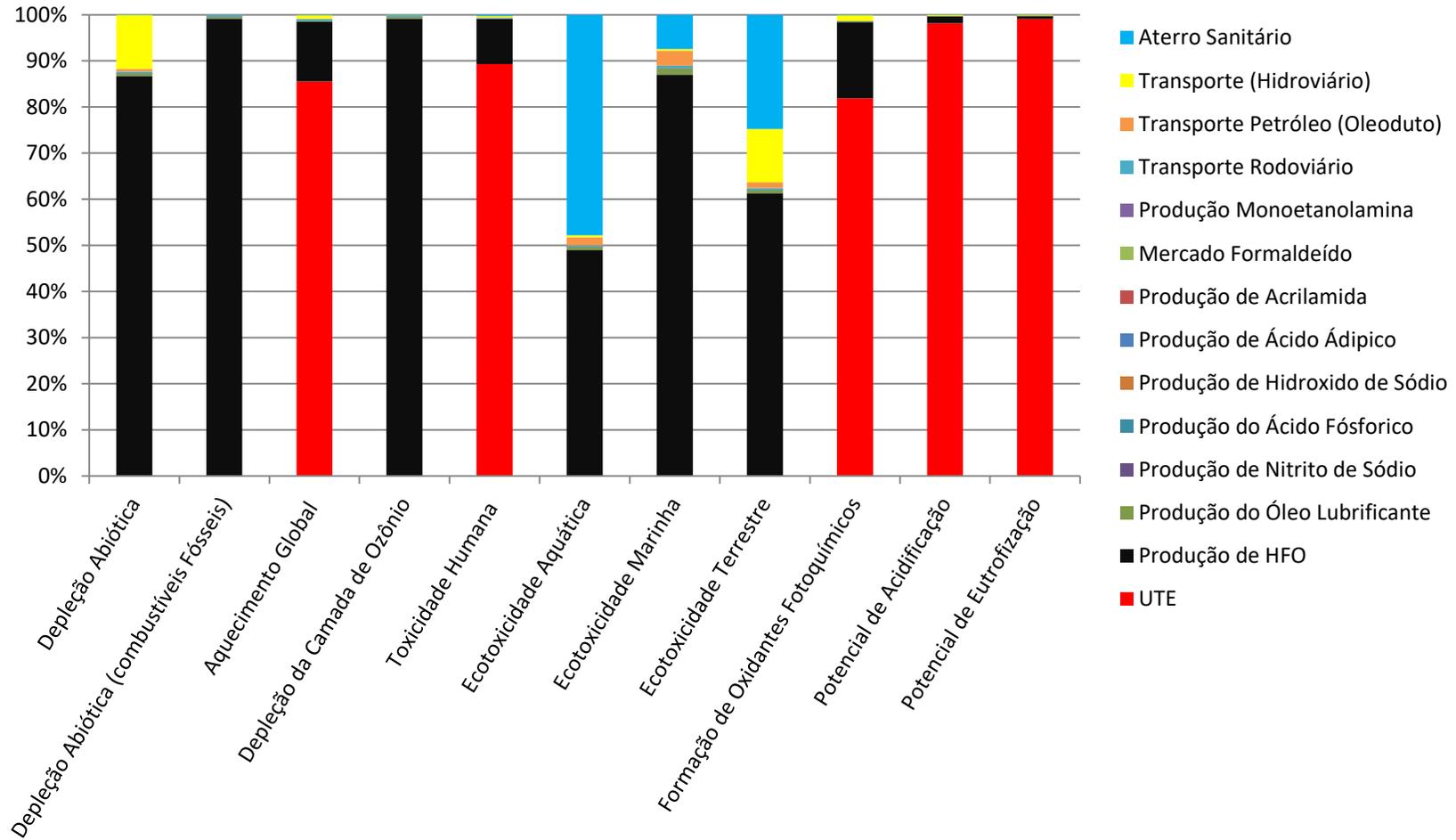
Quadro 22- Resultados caracterizados absolutos para entrega de 1MWh (UF) da UTE operando com HFO

Nome	Impacto	
	Valor	Unidade (kg)
Potencial de Depleção Abiótica	1,56E-06	Sb eq
Potencial de Depleção Abiótica (combustíveis Fósseis)	1,02E+04	MJ
Potencial de Aquecimento Global	6,90E+02	CO ₂ eq
Potencial de Depleção da Camada de Ozônio	4,87E-05	CFC-11 eq
Potencial de Toxicidade Humana	8,68E+01	1,4-DB eq
Potencial de Ecotoxicidade Aquática	5,66E+00	1,4-DB eq
Potencial de Ecotoxicidade Marinha	1,77E+04	1,4-DB eq
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre	7,55E-03	1,4-DB eq
Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos	2,86E-01	C ₂ H ₄ eq
Potencial de Acidificação	3,86E+01	SO ₂ eq
Potencial de Eutrofização	8,49E+00	PO ₄ eq

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01.

Figura 24- Resultados caracterizados relativos para entrega de 1MWh (UF) da UTE operando com HFO



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01.

5.2.2. Operação Bicombustível

Os resultados dos potenciais impactos caracterizados absolutos para o modo de operação bicombustível são expostos no Quadro 23 em termos numéricos totais e na Figura 25 em termos percentuais da contribuição dos processos constituintes.

Quadro 23- Resultados caracterizados absolutos para entrega de 1MWh (UF) da UTE operando no modo bicombustível.

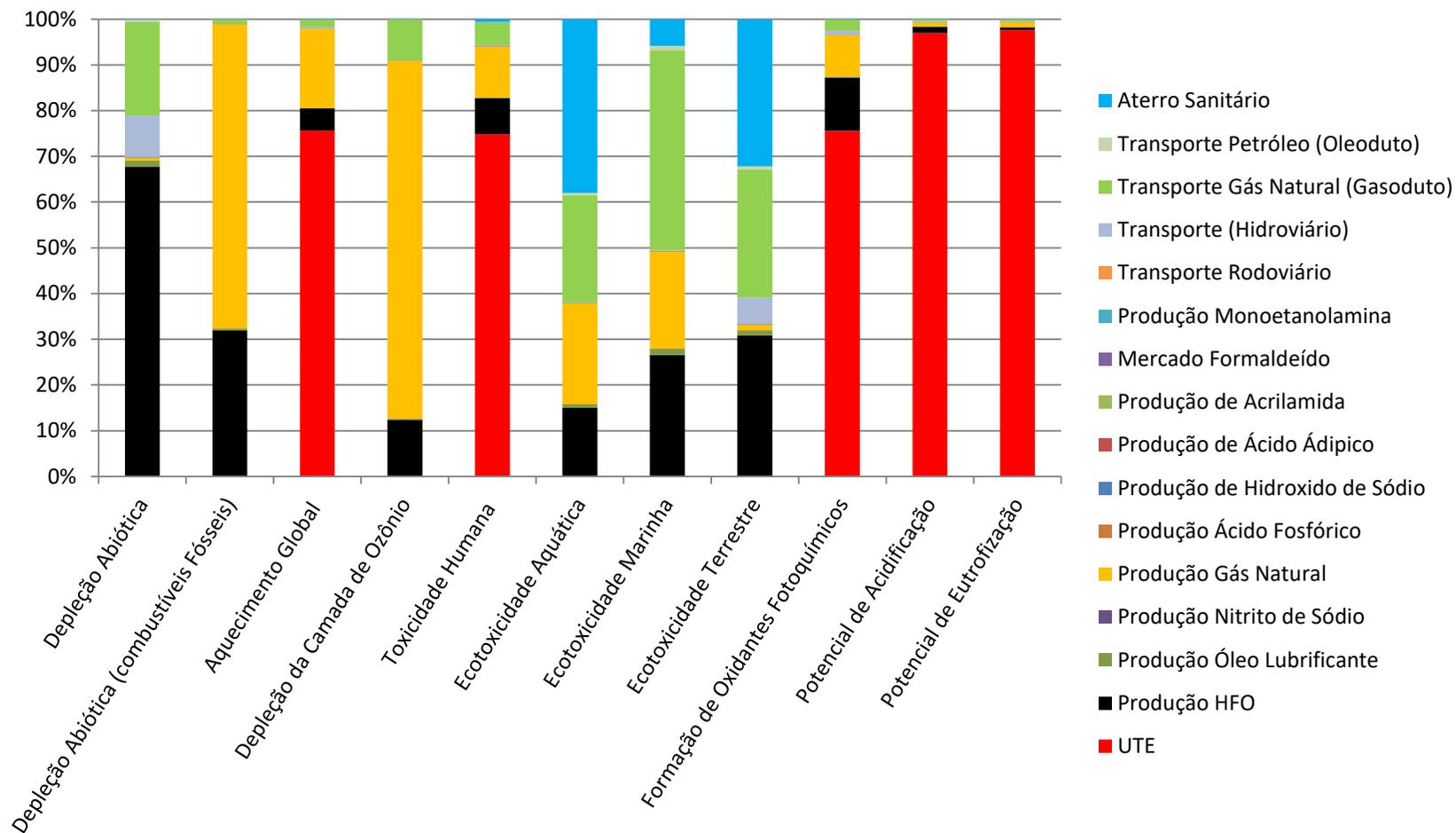
Nome	Impacto	
	Valor	Unidade (kg)
Potencial de Depleção Abiótica	7,46E-07	kg Sb eq
Potencial de Depleção Abiótica (combustíveis Fósseis)	1,19E+04	MJ
Potencial de Aquecimento Global	6,90E+02	CO ₂ eq
Potencial de Depleção da Camada de Ozônio	1,46E-04	CFC-11 eq
Potencial de Toxicidade Humana	4,05E+01	1,4-DB eq
Potencial de Ecotoxicidade Aquática	6,88E+00	1,4-DB eq
Potencial de Ecotoxicidade Marinha	2,17E+04	1,4-DB eq
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre	5,61E-03	1,4-DB eq
Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos	1,51E-01	kg C ₂ H ₄ eq
Potencial de Acidificação	1,58E+01	kg SO ₂ eq
Potencial de Eutrofização	3,36E+00	kg PO ₄ eq

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01.

Pela análise da Figura 25, pode-se perceber que a UTE, em operação bicombustível, tem uma grande participação nos seguintes impactos: Aquecimento Global, Toxicidade Humana, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Acidificação e Eutrofização. A Produção do GN tem impactos relevantes na Depleção Abiótica (combustíveis fósseis) e na Depleção da Camada de Ozônio, enquanto que a Produção do HFO tem a maior contribuição na Depleção Abiótica. Os demais impactos têm processos diferentes como maiores contribuintes, tais como: Aterro Sanitário (Ecotoxicidade Aquática e Terrestre) e Transporte do GN (Ecotoxicidade Marinha).

Figura 25- Resultados caracterizados relativos para entrega de 1MWh (UF) da UTE operando no modo bicomcombustível



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

5.2.3. Comparação entre modos de operação

A comparação dos modos de operação é apresentada na Figura 26. Dos 11 impactos levantados, a operação somente com HFO foi maior que a operação bicomcombustível em 6 deles (54,5 % dos impactos), sendo que os potenciais impactos são: Depleção Abiótica, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Acidificação e Eutrofização. Por outro lado, a operação bicomcombustível demonstra maiores potenciais impactos em 4 categorias, a saber: Depleção Abiótica (combustíveis fósseis), Depleção da Camada de Ozônio, Ecotoxicidade Aquática e Marinha.

Quanto ao potencial de Aquecimento Global, considerou-se inconclusivo o resultado entre os modos de operação, uma vez que há diferenças entre os valores apenas na segunda casa decimal. Na operação com HFO, o impacto ao longo do ciclo de vida foi de 690,19 kg de CO₂ eq., enquanto que na operação bicomcombustível foi de 690,11 kg de CO₂ eq. Importante destacar neste resultado é a participação da UTE nos dois cenários, uma vez que no modo de operação somente com HFO a contribuição da UTE para este impacto era de 85,56 % e passou para 75,61 % com a utilização do GN. Ao analisar isoladamente, a UTE operando com GN apresenta uma diminuição deste impacto. Na configuração apenas com HFO era de 590,50 kg CO₂ eq e passou para 521,77 kg CO₂ eq. Colossi (2012) calculou o impacto para esta usina, pelo método ReCiPe, resultando em uma magnitude de 624,52 kg CO₂ eq para operação somente com HFO. A discrepância de valores pode ter ocorrido devido à diferença da metodologia empregada, além da fonte de dados de emissão atmosférica da UTE, os quais, neste trabalho, são primários e naquele estudo foram calculados por balanço de massa. Castelazo et al. (2011), em seu estudo sobre a geração elétrica no México, chegou a um fator de emissão de 571 kg CO₂ eq/MWh, sendo que os combustíveis fósseis representavam cerca de 79% do total da geração. Turconi et al. (2013) analisou 167 estudos de ACV sobre a temática de geração elétrica e constatou que os estudos que utilizavam o Gás Natural como fonte energética tinham valores de impacto ao longo do ciclo de vida que variam de 380 a 1000 kg CO₂ eq/ MWh(entregue à rede) enquanto que as usinas a óleo combustível variam de 530-900 kg CO₂ eq/ MWh. Mais precisamente, Agrawal et al. (2014), em seu trabalho, calculou os impactos da geração elétrica de uma termelétrica à GN com ciclo combinado, resultando em um impacto de 584 kg CO₂ eq/

MWh produzido, sendo que cerca de 80 % desse impacto é de origem da combustão na UTE, que foram similares aos valores encontrados neste trabalho, em termos de contribuição da UTE, a qual será demonstrada posteriormente.

Quanto à comparação do desempenho da UTE propriamente dita (*gate-to-gate*), os resultados podem ser analisados no Quadro 24, o qual mostra a contribuição da UTE para as diferentes categorias de impacto. Além disso, apresenta-se a variação dos impactos que a mudança do modo de operação proporcionou. Nesse sentido, fica evidente a diminuição dos impactos ambientais da UTE em todas as categorias de impactos, nas quais a UTE contribuiu, com destaque para o Potencial de Eutrofização e Potencial de Toxicidade Humana e o Potencial de Acidificação, os quais tiveram as maiores reduções (em torno de 60% de diminuição). Essas categorias de impacto apresentam a mesma substância como a maior representante de contribuição, que são os Óxidos de Nitrogênio, sendo que houve uma redução deste tipo de emissão de 2,84E+6 kg para 1,10E+6 kg, ou seja, uma redução de 61,27 %.

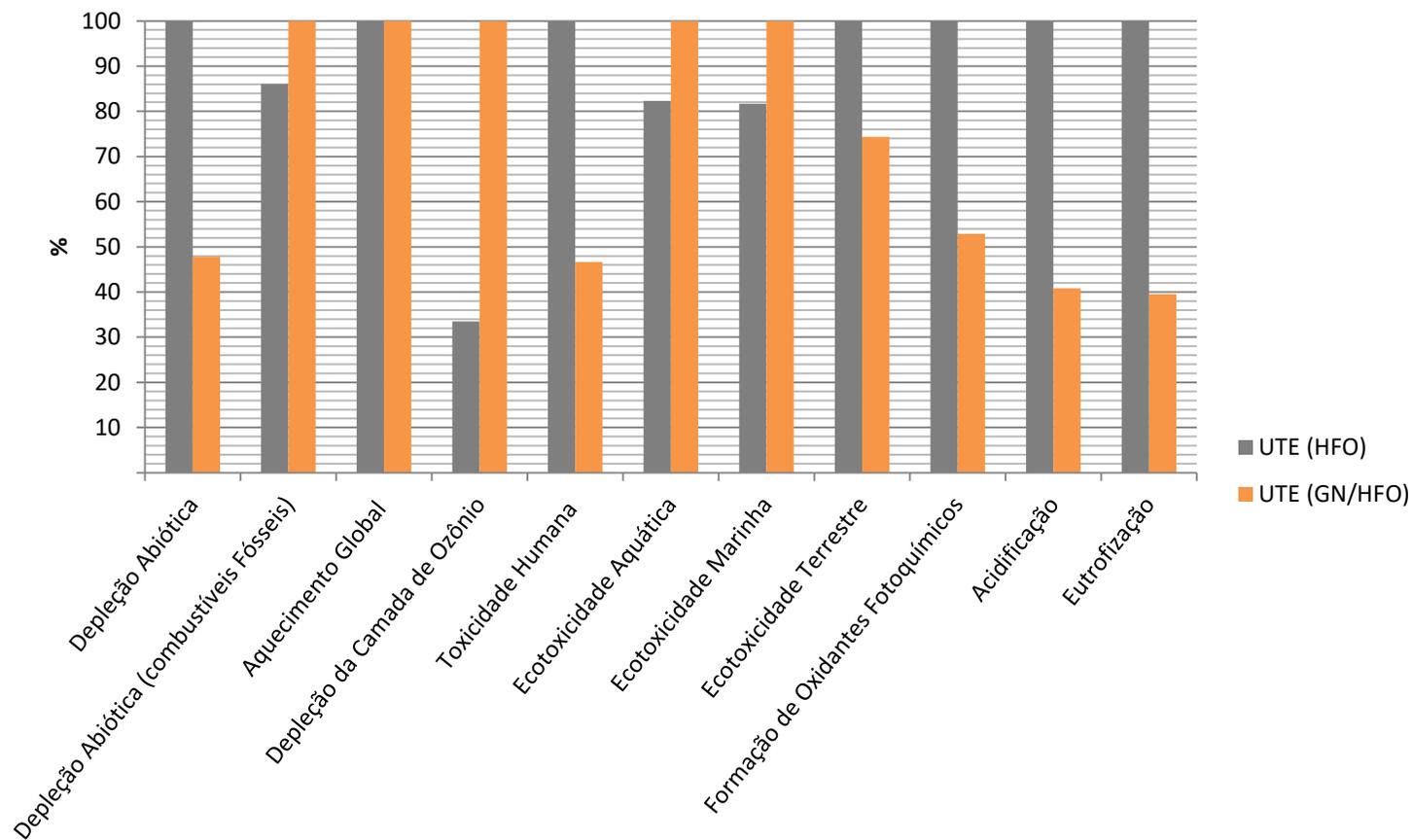
Quadro 24- Potenciais Impactos da UTE nas diferentes configurações e sua variação em relação ao modo de operação com HFO.

Categoria de Impacto	Unidade	Modo de Operação		Variação (2)-(1)/(1)
		Somente HFO (1)	Bicombustível (2)	
Potencial de Aquecimento Global	kg CO ₂ eq	590,50	521,77	-11,6%
Potencial de Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	77,57	30,30	-60,9%
Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg C ₂ H ₄ eq	0,23	0,11	-51,2%
Potencial de Acidificação	kg SO ₂ eq	37,91	15,80	-58,4%
Potencial de Eutrofização	kg PO ₄ eq	8,42	3,27	-61,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

Figura 26- Resultados caracterizados comparativos entre os modos de operação da UTE para a entrega de 1 MWh(UF).



A comparar 1 MWh 'UTE (HFO)' com 1 MWh 'UTE (GN/HFO)'; Método: CML-IA baseline V3.01 /
Caracterização / Excluindo processos de infraestrutura

Fonte: Elaborado pelo autor.

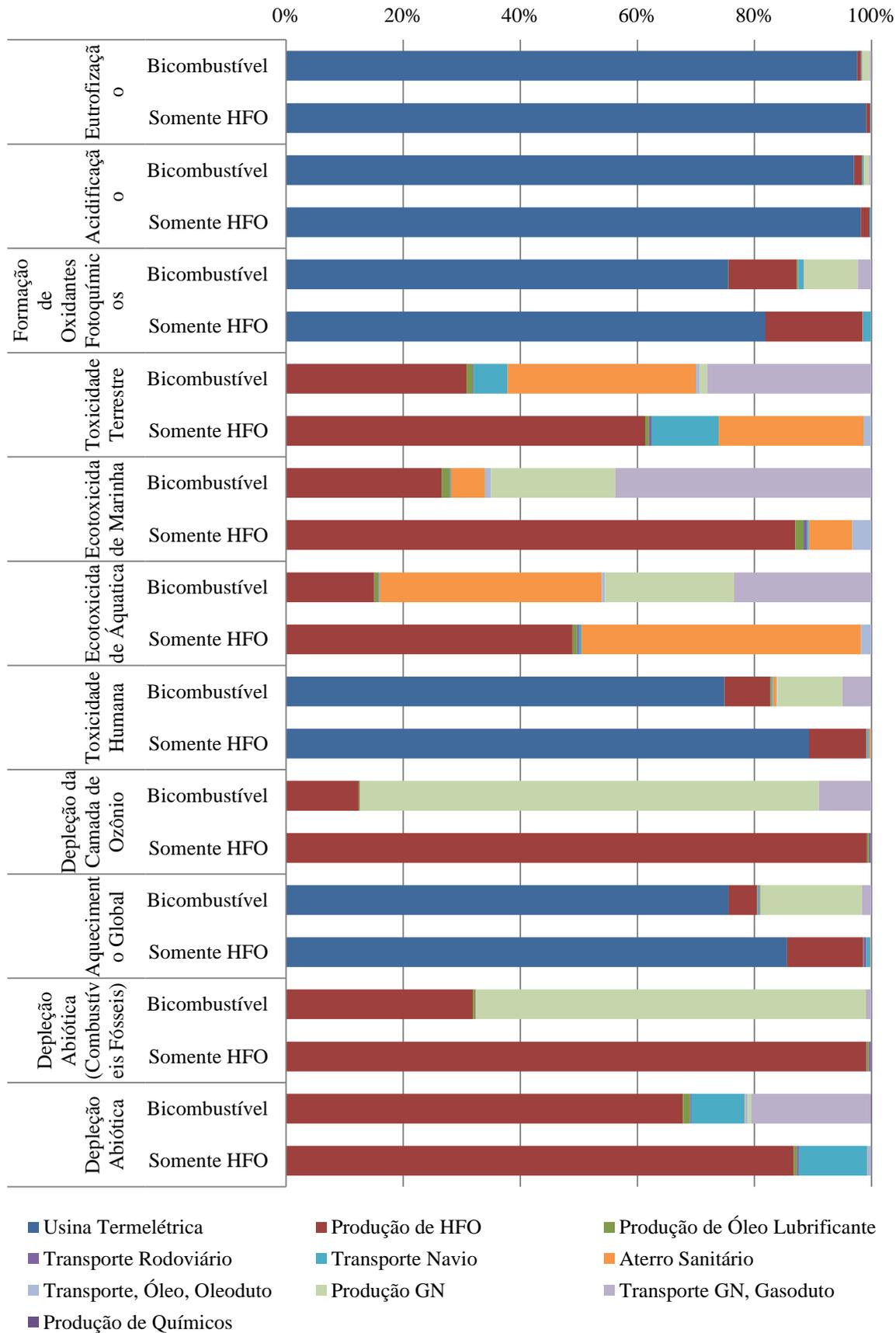
Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

Os resultados da Figura 26 mostram que a operação bicombustível apresenta menores impactos considerados como locais e regionais, que é o caso para Acidificação, Formação de Oxidantes Fotoquímicos e Eutrofização (regionais) e Ecotoxicidade Terrestre, Toxicidade Humana (locais) (HEIDI et al., 2005).

Por fim, apresenta-se a Figura 27, que mostra a contribuição dos processos para todas as categorias de impacto de forma comparativa para os dois modos de operação. Como se pode perceber, o impacto local (Toxicidade Humana) e os impactos regionais têm, em comum, uma considerável contribuição da UTE. Tais categorias de impacto atingem diretamente a região de estudo, onde está localizada a floresta Amazônica, que tem uma grande importância e significância para o equilíbrio ambiental mundial (DIVINO; MCALEER, 2009). Ainda, é importante destacar que a conversão bicombustível resultou em uma menor contribuição da UTE nos impactos destacados anteriormente. Apesar da diminuição da contribuição da usina, outros processos tiveram crescimento, como é o caso da cadeia do GN (produção e transporte) nas categorias de Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Toxicidade Humana e Aquecimento Global, por exemplo. A produção de GN é o maior contribuinte, na operação bicombustível, para a Depleção Abiótica (Combustíveis Fósseis) e Depleção da camada de Ozônio. Para Ecotoxicidade Aquática, os processos relativos ao GN têm 56% de contribuição, com 23,4% relativo ao transporte por gasoduto, o qual tem maior contribuição para Ecotoxicidade Marinha. Para Toxicidade Terrestre, a contribuição é bem distribuída entre Aterro Sanitário, transporte por gasoduto e produção do HFO.

Na operação somente com HFO, os maiores contribuintes são ou a UTE ou a produção do HFO, sendo que, na operação bicombustível, este processo é responsável como maior contribuinte somente para Depleção Abiótica, na operação bicombustível.

Figura 27- Contribuição dos processos nos diferentes modos de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3. Interpretação

Nesta etapa, serão realizadas análises de contribuição, de forma a identificar os principais contribuintes para as categorias de impacto ao longo do ciclo de vida. Ainda, será executada também análise de sensibilidade, para verificação se alterações no inventário geram grandes modificações nos impactos e, por fim, análise de incertezas entre os impactos e entre os sistemas de produto, ou seja, os modos de operação da UTE.

5.3.1. Análise de Contribuição

Afim de realização desta análise, utilizar-se-á, como cenário, o modo de operação bicomcombustível, uma vez que a usina trabalhará nesta configuração a partir da conversão efetuada. Para consecução desta avaliação, foram consideradas contribuições acima de 1% de cada categoria de impacto. Dessa maneira, são exibidos no Quadro 25 o valor da contribuição dos processos que mais contribuíram para as diferentes categorias de impacto.

Quadro 25- Identificação dos processos com contribuições relevantes para cada categoria de impacto.

Caracterização	Processo	Contribuição (%)
Depleção Abiótica	Produção HFO	67,78
Depleção Abiótica (Combustíveis Fósseis)	Produção Gás Natural	66,67
Aquecimento Global	UTE	75,61
Depleção da Camada de Ozônio	Produção Gás Natural	78,43
Toxicidade Humana	UTE	74,85
Ecotoxicidade Aquática	Aterro Sanitário	37,95
Ecotoxicidade Marinha	Transporte Gás Natural (Gasoduto)	43,74
Ecotoxicidade Terrestre	Aterro Sanitário	32,18
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	UTE	75,55
Acidificação	UTE	97,00
Eutrofização	UTE	97,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

Portanto, pode-se perceber que a UTE apresenta uma prevalência de contribuição em 5 categorias de impactos, sendo o processo com maior número de aparições nas maiores contribuições. Além disso, vale ressaltar que as contribuições, em termos numéricos, são elevadas. Por exemplo, a menor contribuição deste processo foi para a categoria de Toxicidade Humana com 74,85 %, como pode ser visto no Quadro 25.

Em segundo lugar, o processo de Produção do Gás Natural tem maiores contribuições em 2 categorias, enquanto que o seu transporte, por gasoduto, tem contribuição maior em uma categoria (Ecotoxicidade Marinha). Por fim, tem-se a Produção de HFO com contribuição majoritária em uma categoria de impacto. Importante destacar que houve uma redução de consumo de HFO de 62,8 % devido à mudança para o modo bicombustível e, mesmo assim, a cadeia produtiva deste insumo conseguiu maiores contribuições em Depleção Abiótica. Finalmente, as Ecotoxicidades Terrestre e Aquática tem, como maior contribuinte, o Aterro Sanitário, mas com contribuição diminuta em relação às outras categorias de impacto.

Em termos de substâncias, as contribuições para cada categoria de impacto é apresentada no Quadro 26.

Quadro 26- Identificação das substâncias com contribuições relevantes para cada categoria de impacto.

Caracterização	Substância	Contribuição (%)
Depleção Abiótica	Chumbo	20,03
Depleção Abiótica (Combustíveis Fósseis)	Óleo cru	74,51
Aquecimento Global	Dióxido de Carbono	90,29
Depleção da Camada de Ozônio	Bromotrifluorometano, Halon 1301	90,78
Toxicidade Humana	Óxidos de Nitrogênio	75,63
Ecotoxicidade Aquática	Cobre	29,73
Ecotoxicidade Marinha	Ácido Fluorídrico	43,52
Ecotoxicidade Terrestre	Mercúrio	51,32
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	Dióxido de Enxofre	79,48
Acidificação	Óxidos de Nitrogênio	80,91
Eutrofização	Óxidos de Nitrogênio	98,83

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

Como se pôde perceber, as contribuições para as diferentes categorias de impacto têm magnitudes variáveis. Por exemplo, para Depleção Abiótica, a maior contribuição é do Chumbo com 20,03% enquanto que para Eutrofização, os Óxidos de Nitrogênio são os responsáveis por praticamente todo o impacto, com uma totalidade de 98,83%.

Quanto à depleção abiótica (combustíveis fósseis), a substância de maior aporte de impacto é o Óleo cru, apesar do fato de que, como mostrado no Quadro 25, o processo que mais contribui é a Produção de Gás Natural. Isso ocorre devido à utilização de óleo também neste processo, além do fato de que o fator de impacto do

óleo cru (42 MJ/kg) ser maior que o do Gás Natural (35 MJ/m³), segundo o método de cálculo CML.

Na categoria de impacto de Depleção da Camada de Ozônio, o Bromotrifluorometano foi o maior responsável. Essa substância está presente majoritariamente na Produção do Gás Natural, com 86,39% de participação neste processo e é utilizada como supressores de incêndio e refrigerantes em gasodutos (ATILGAN; AZAPAGIC 2015).

Quanto à Ecotoxicidade Aquática, a substância Cobre teve o maior impacto, no entanto a predominância é pequena, visto que a contribuição é 29,73%, sendo que tem maior presença na Produção do Gás Natural. Já na Ecotoxicidade Marinha, a substância predominante está associada ao Transporte do Gás Natural. No estudo de Agrawal et al (2014), a categoria de impacto de Ecotoxicidade Marinha foi bem menor que neste estudo (2,94E-1 kg 1,4-DB eq/MWh), visto que a distância entre a fonte de extração do GN e a UTE era de 253 km, enquanto que, neste estudo, é de 663,2 km. Além disso, naquele trabalho os maiores contribuintes para este impacto Dióxido de Enxofre (SO₂) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂), os quais apresentam fator de caracterização de 0,5 kg 1,4-DB eq/kg. Neste estudo, o maior contribuinte para este impacto é o Ácido Fluorídrico, o qual tem um fator de impacto de 1,82E+3 kg 1,4-DB eq/kg, sendo um dos mais altos nesta categoria por ser mais nocivo. Por fim, na Ecotoxicidade Terrestre a substância está associada à destinação final do resíduo, ou seja, o Aterro Sanitário.

Pela avaliação concomitante do Quadro 25 e Quadro 26, é possível perceber que as categorias de impactos Acidificação, Eutrofização e Toxicidade Humana têm, como processo de maior aporte, a UTE e, como substância mais impactante, os Óxidos de Nitrogênio. Quando comparado às emissões dessa substância com a operação somente com HFO, houve uma redução de emissão média de 64,3 para 25,1 kg/MWh, representando uma diminuição de 39,0%. No entanto, mesmo com a retração, essa substância foi a principal contribuinte para os impactos supracitados.

5.3.2. Análise de Sensibilidade

Com o intuito de verificar a mudança nos resultados com a variação de parâmetros e de dados de entrada, foram elaboradas algumas análises de sensibilidade. Para tanto, buscou-se realizar variações que correspondiam à realidade do sistema de produto estudado. Dessa maneira, as análises feitas foram as seguintes:

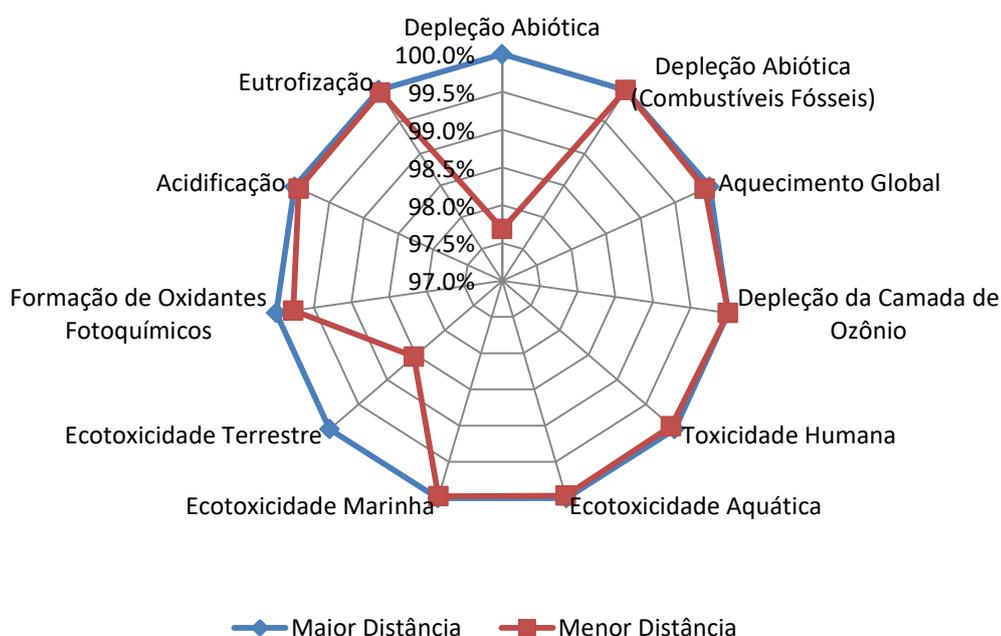
- Alteração da distância percorrida pelo navio;
- Alteração da localização da Extração e processamento do HFO;
- Alteração do consumo de HFO em contrapartida do aumento do uso de GN.

5.3.2.1. Distância percorrida por navio;

Como já expresso anteriormente, metade do HFO empregado na UTE é oriundo da Venezuela. Para viabilizar o estudo, foi necessário fazer uma suposição da distância percorrida pelo navio até Manaus e, para tanto, realizou-se uma análise dos portos da Venezuela, bem como a distância até o porto de Manaus. Como escolha, optou-se pela maior distância entre portos.

Portanto, para realização da análise de sensibilidade, fez-se uma comparação entre o cenário normal (maior distância, 4837 km) e outro com a menor distância (3496 km). O resultado da comparação pode ser visto na Figura 28. Nessa figura, pode-se perceber que a mudança de distância percorrida pelo navio não gera grandes alterações no resultado, sendo que a maior variação ocorre para o impacto de Depleção Abiótica, com cerca de 2,5% em relação ao cenário de maior distância, seguida da Ecotoxicidade Terrestre, com aproximadamente 1,5 % de diferença.

Figura 28- Análise de Sensibilidade para alterações de distância no transporte por navio do HFO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

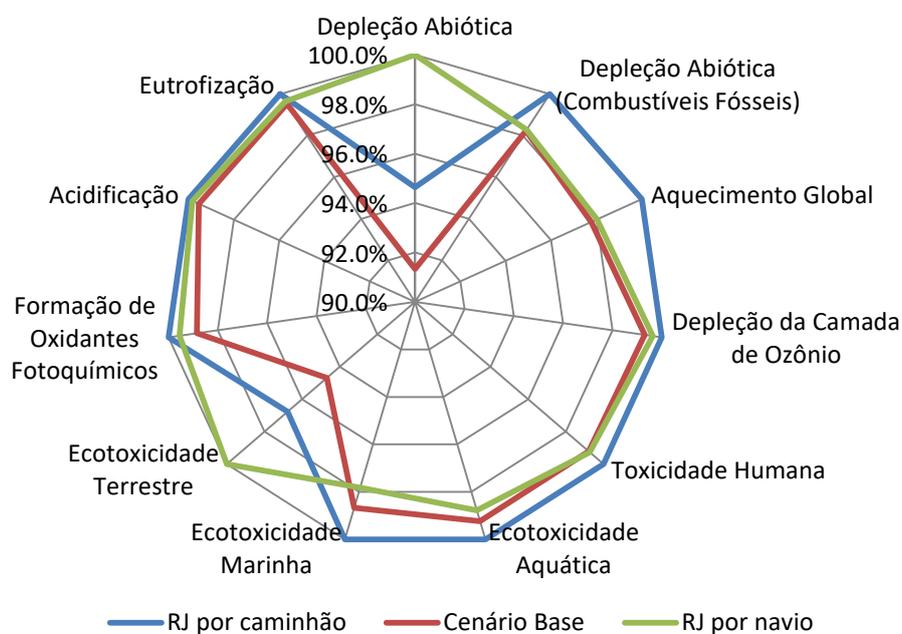
Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

5.3.2.2. *Localização da Extração e Processamento do HFO*

Segundo informações da Agência Nacional do Petróleo, o Estado com maior produção de petróleo é o Rio de Janeiro, com cerca de 67% da produção diária total no País (ANP, 2016). Devido a essa supremacia em produção, optou-se por analisar as possíveis influências nos resultados da troca da origem do petróleo utilizado na UTE, alterando, assim, as distâncias percorridas por este insumo. Nesse sentido, analisaram-se duas hipóteses aliadas ao cenário base: transporte por navio do Rio de Janeiro à Manaus (5745 km) e transporte por rodovia (4300 km).

O resultado da avaliação é apresentado na Figura 29, a qual mostra que o transporte por via rodoviária tem as maiores contribuições em 9 dos 11 impactos levantados. O cenário base, por sua vez, tem maiores impactos que o transporte por navio somente para 2 impactos, que são as Ecotoxicidades Aquática e Marinha. A maior distinção de valores ocorre para a categoria de impacto de Depleção Abiótica, sendo que o cenário base contribui cerca de 8% a menos que o transporte por navio.

Figura 29- Análise de Sensibilidade para alterações localização da Extração.



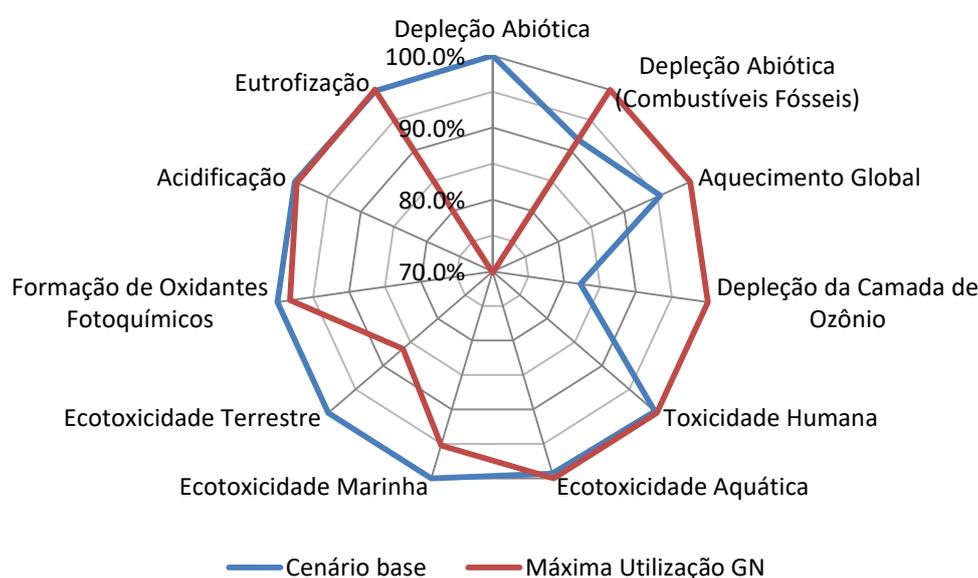
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

5.3.2.3. Diminuição do Consumo de HFO

Como a UTE utiliza motores bicompostíveis que podem alterar o consumo dos dois combustíveis, resolveu-se elaborar uma comparação entre o cenário base com o mínimo uso de HFO e, conseqüentemente, o máximo uso de GN. Importante destacar que, nessa avaliação, além dos valores ao longo do ciclo de vida de ambos combustíveis serem alterados, as emissões de CO e de CO₂ também se alteram, uma vez que estão associados à utilização dos combustíveis. Dessa maneira, o resultado dessa comparação é mostrada na Figura 30.

Figura 30- Análise de Sensibilidade para diferentes proporções de uso dos combustíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Calculado pelo método CML-IA baseline V3.01

Há três categorias de impacto em que a máxima utilização de GN tem maior impacto, a saber: Depleção Abiótica (Combustíveis Fósseis), Aquecimento Global e Depleção da Camada de Ozônio. Por outro lado, o cenário base apresenta maiores contribuições nas Ecotoxicidades Marinha e Terrestre e Formação de Oxidantes Fotoquímicos. A categoria de impacto Depleção Abiótica é a que apresenta maior disparidade entre os cenários, sendo que o atual cenário é 30% maior em termos de contribuição. As demais categorias de impactos têm pequenas distinções nos valores, sendo que nem são perceptíveis na Figura 30.

5.3.3. Análise de Incertezas

Neste trabalho, a Análise de Incerteza foi utilizada para a quantificação das incertezas associadas ao inventário utilizado (e, conseqüentemente, aos valores das categorias de impactos) e também para comparação entre os modos de operação. A seguir, serão apresentados os resultados para os impactos e, posteriormente, entre os modos de operação.

5.3.3.1. Dos Impactos

Os fluxos inventariados nos processos básicos da tecnosfera é oriundo da base de dados do Ecoinvent, os quais apresentam uma variabilidade determinada por estimativas ao se aplicar uma matriz de referência que descreve a qualidade dos dados por sua origem (QUANTIS, 2011). Os dados do sistema de produto estudado foram associados a uma distribuição uniforme, pelo fato de ser limitada por valores mínimos e máximos, conforme apresentado no item 5.1.2 (ICV para modo bicomcombustível).

O resultado da avaliação é apresentado na Tabela 1, com um intervalo de confiança de 95 %, o qual indica que, em 95% dos casos, os resultados da caracterização da ACV do modo bicomcombustível encontram-se dentro do intervalo (A,B).

O coeficiente de variação (CV) é o indicador de dispersão nos resultados dos indicadores de categoria. Como se pode perceber numericamente pela Tabela 1 e graficamente pela Figura 31, a maior incerteza é em relação à categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre, seguida da Depleção Abiótica e Ecotoxicidade Aquática. O resultado mais seguro foi para a Acidificação.

Tabela 1- Resultados da Análise de Incerteza para o modo de operação bicomcombustível.

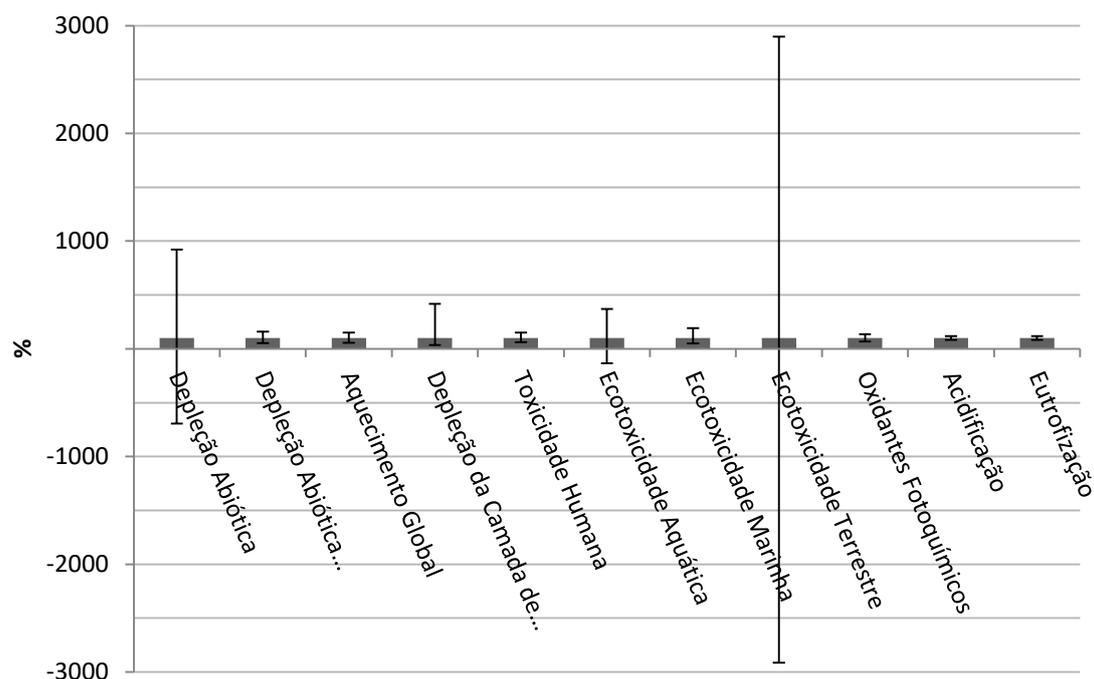
Categoria de impacto	Unidade	Média	Mediana	SD**	CV*	A (2.50%)	B (97.50%)	Err.Pad. da média
Depleção Abiótica	kg Sb eq	1.06E-06	1.08E-06	4.25E-06	400%	-7.49E-06	9.94E-06	1.26E-01
Depleção Abiótica (Combustíveis Fósseis)	MJ	1.18E+04	1.17E+04	3.30E+03	27.90%	6.20E+03	1.87E+04	8.81E-03
Aquecimento Global	kg CO2 eq	6.96E+02	6.91E+02	1.93E+02	27.70%	3.77E+02	1.05E+03	8.75E-03
Depleção da Camada de Ozônio	kg CFC-11 eq	1.34E-04	1.03E-04	1.10E-04	81.90%	3.54E-05	4.30E-04	2.59E-02

Categoria de impacto	Unidade	Média	Mediana	SD**	CV*	A (2.50%)	B (97.50%)	Err.Pad. da média
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	4.02E+01	3.95E+01	9.13E+00	22.70%	2.43E+01	5.88E+01	7.18E-03
Ecotoxicidade de Aquática	kg 1,4-DB eq	7.89E+00	7.67E+00	9.49E+00	120%	-1.03E+01	2.84E+01	3.80E-02
Ecotoxicidade de Marinha	kg 1,4-DB eq	2.18E+04	2.08E+04	7.46E+03	34.30%	1.06E+04	4.01E+04	1.08E-02
Ecotoxicidade de Terrestre	kg 1,4-DB eq	1.46E-01	3.15E-01	4.62E+00	3170%	-9.18E+00	9.13E+00	1.00E+00
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg C2H4 eq	1.50E-01	1.49E-01	2.76E-02	18.40%	9.96E-02	2.03E-01	5.82E-03
Acidificação	kg SO2 eq	1.55E+01	1.55E+01	1.44E+00	9.31%	1.28E+01	1.81E+01	2.94E-03
Eutrofização	kg PO4 eq	3.32E+00	3.33E+00	3.48E-01	10.50%	2.74E+00	3.88E+00	3.32E-03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: *: Coeficiente de Variação/ **: Desvio Padrão.

Figura 31- Análise de Incerteza para o modo de operação bicomustível.



Fonte: Elaborado pelo autor.

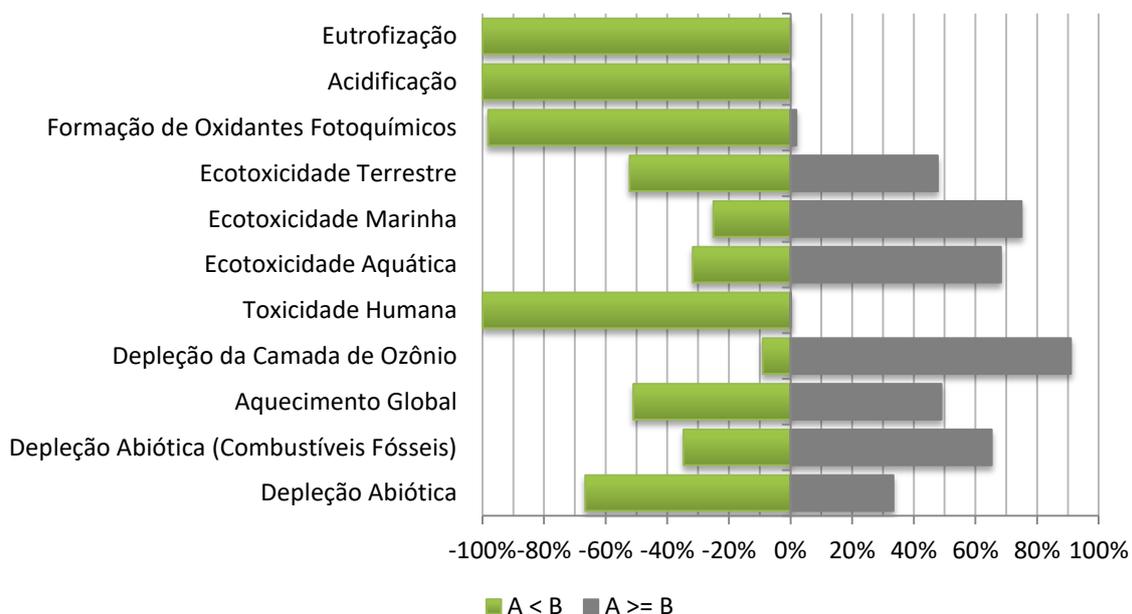
5.3.3.2. Entre os Sistemas de Produto

A simulação comparativa realiza a subtração de dois sistemas, em que os resultados indicam a probabilidade de uma opção gerar mais dano que a outra

(QUANTIS, 2011) ou o número de vezes que um sistema de produto tem maior ou menor carga que outra (PRÉ, 2016a). Importante destacar que a simulação de MC foi realizada com mil ciclos e intervalo de confiança de 95 %. Logo, o resultado, a seguir, é relacionado ao número de ciclos da avaliação.

Como resultado da análise, apresenta-se a Figura 32, onde é mostrada a comparação entre o modo bicombustível (A) e o modo de operação somente com HFO (B), sendo que a barra em verde simboliza quando a operação bicombustível apresenta menor carga ambiental que a operação somente com HFO e, em cinza, simboliza quando a operação somente com HFO apresenta menor carga ambiental em relação à operação bicombustível.

Figura 32-Análise de Monte Carlo – Comparação entre Modo bicombustível (A) e somente com HFO (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela análise da figura acima, pode-se concluir que, com 95 % de certeza, que em 100 % dos casos os potenciais de Eutrofização, Acidificação são menores na operação bicombustível. Outras categorias de impacto também têm menores impactos no modo bicombustível, que são: Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Toxicidade Humana e Depleção Abiótica.

Por outro lado, a operação bicombustível tem, com diferentes graus de certezas, maiores impactos nas seguintes categorias: Ecotoxicidades Marinha e Aquática, Depleção da Camada de Ozônio e Depleção Abiótica (Combustíveis Fósseis).

Considerou-se inconclusivo a categoria de impacto Aquecimento Global, uma vez que houve diferença pouco significativa entre o número de vezes que os dois sistemas tiveram menor carga ambiental para este quesito. Por exemplo, a operação bicombustível teve menor carga em 51% dos casos, enquanto 49% para operação somente com HFO. Portanto, é possível afirmar em termos estatísticos que não há diferenças significativas entre os dois modos de operação para a categoria de impacto aquecimento global. Outra categoria inconclusiva foi a Ecotoxicidade Terrestre, que apresentou, como processo de menor carga, a operação bicombustível com 52,2% dos casos. No entanto, cabe salientar que nesta categoria de impacto (Ecotoxicidade Terrestre) os resultados absolutos apresentaram uma diferença entre os dois modos de operação (ver Figura 26), com valor menor para a operação no modo bicombustível, porém, a partir dos resultados da simulação de MC é possível afirmar em termos estatísticos que não há diferenças significativas entre os dois modos de operação para esta categoria de impacto.

6. CONCLUSÃO

Para verificar as consequências, em termos de potenciais impactos ambientais da entrada do Gás Natural no *grid* energético do Sistema Isolado de Manaus, este estudo se propôs a realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida de uma Usina Termelétrica que foi convertida para operação bicomcombustível. Nesse sentido, empregaram-se as Normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b) para a utilização correta da ferramenta de ACV.

Para realização do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), utilizaram-se dados primários fornecidos pela empresa responsável pela UTE. Quanto aos dados faltantes, utilizou-se dados da literatura que correspondiam a mesma realidade encontrada na Usina, tanto em termos de tecnologia (mesmos motores e infraestrutura), quanto em termos locais (mesma cidade, ou seja, Manaus). Com base nessas informações e considerações efetuadas na ACV, foi possível estabelecer dois ICVs da operação da UTE, ou seja, utilizando apenas HFO e no modo bicomcombustível (uso de HFO e Gás Natural).

Com o emprego do método de avaliação de impacto CML *baseline*, calcularam-se os possíveis impactos ambientais do fornecimento de energia da UTE nas duas configurações supracitadas. Como mostrado neste trabalho, a operação bicomcombustível da Usina Termelétrica diminuiu 6 dos 11 potenciais impactos, pela metodologia do CML, os quais são: Depleção Abiótica, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Acidificação e Eutrofização. Além disso, a transição do uso do HFO para o uso concomitante com o GN trouxe benefícios para a operação da usina em termos dos potenciais impactos. Em geral, a operação bicomcombustível apresenta menores impactos locais e regionais e não contribui para aumentar as tendências globais em emissões que contribuem para o Aquecimento Global, quando comparada com a operação somente com HFO. Dos impactos, onde houve participação da UTE, todas as contribuições da usina reduziram em diferentes proporções. Por exemplo, a categoria que menos reduziu foi o Potencial de Aquecimento Global com 11,6 %, enquanto a que mais reduziu foi o Potencial de Eutrofização com diminuição de 61,1 %. Por outro lado, o impacto é maior em outras

categorias quando comparado com a operação somente com HFO, tais como: Ecotoxicidades Aquática e Marinha, Depleção da Camada de Ozônio e Depleção Abiótica (Combustíveis Fósseis). Essas três últimas categorias têm relação com a produção e transporte do Gás Natural, sendo que – com o aumento do uso do GN no modo bicomcombustível - esses processos tiveram as maiores contribuições nos impactos. Já a Ecotoxicidade Aquática está relacionada ao uso do Aterro Sanitário, no entanto é pequena a contribuição comparada as demais categorias de impacto, evidenciando que há relevantes contribuições de outros processos, tais como Produção e Transporte do GN .

A Usina Termelétrica apresenta 5 categorias de impacto as quais tem maior contribuição. As substâncias de maiores contribuições para esses impactos estão relacionados com as emissões atmosféricas da Usina. Para o Potencial de Aquecimento Global, o Dióxido de Carbono é o maior contribuinte com 90,29 % enquanto que para Formação de Oxidantes Fotoquímicos é o Dióxido de Enxofre com 79,48 %. Já as outras categorias (Toxicidade Humana, Acidificação e Eutrofização), o maior contribuinte é a mesma substância, ou seja, os Óxidos de Nitrogênio com contribuição de 75,63 %, 80,91% e 98,83% respectivamente. Dessa maneira, é possível concluir que a UTE tem uma grande responsabilidade em termos de impacto ao longo do ciclo de vida da geração de energia e, caso haja interesse na diminuição deste ônus, deve ser focado na redução das emissões. Por exemplo, reduzindo as emissões de NO_x em 20%, há uma redução de 4,3% na contribuição da UTE e de 14,8 % deste impacto ao longo do ciclo de vida.

As análises de sensibilidade realizadas neste trabalho mostraram as possíveis variações, tanto em termos de operação, que pode ser variável em relação à escolha do combustível, quanto às incertezas dos dados. Nesse sentido, para a incerteza quanto à distância percorrida pelo navio que faz o transporte do HFO da Venezuela, não houve diferenças significativas, sendo a maior variação na Depleção Abiótica com 2,5% de alteração no resultado. Quanto à localização da Extração do HFO, o resultado mais discrepante foi também para Depleção Abiótica, com variação de 8% entre os cenários pesquisados. Por fim, a maximização do uso de GN altera consideravelmente a Depleção Abiótica, com uma redução de 30% neste impacto. Por outro lado, há aumento em outras categorias de impacto, como a Depleção da Camada de Ozônio em torno de 18 % em relação ao cenário base.

Pela análise de Monte Carlo, foi possível perceber um resultado mais robusto, ou seja, tornou-se possível afirmar em termos estatísticos que as categorias de impacto Eutrofização e Acidificação são menores na operação bicomustível em 100% dos casos. As outras categorias (Depleção Abiótica, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre, Formação de Oxidantes Fotoquímicos) também apresentam-se, segundo a análise de MC, com 95 % de confiança, com a maioria dos casos apontando a operação bicomustível com menor carga ambiental. Quanto às incertezas dos Impactos, a categoria com maior incerteza foi a Ecotoxicidade Terrestre, quando comparada com as demais. O resultado mais seguro foi para a Acidificação.

Em síntese, a técnica de ACV mostrou-se eficiente para comparação entre os modos de operação da UTE, pois – além de mostrar as consequências dessa alteração dentro dos portões da UTE – demonstrou as influências ao longo do ciclo de vida de produção da energia. Isso se demonstrou interessante, principalmente na categoria de impacto de Aquecimento Global, onde houve redução da contribuição da UTE, no entanto houve similaridade na magnitude do impacto ao longo do ciclo de vida para as duas configurações. Ainda, com a análise de contribuição, foi possível encontrar os principais atores nas diferentes categorias de impacto, tanto em termos de processos quanto substâncias envolvidas. A análise de sensibilidade trouxe a possibilidade de alteração do inventário, de forma a analisar o impacto das possíveis variações no modo de operação. Por sua vez, a análise de incerteza traz uma robustez maior aos resultados, visto que avalia inúmeras vezes o inventário formando uma distribuição dos resultados, diferentemente de uma avaliação pontual, como é a ACV quando feita sem a análise de incerteza. Cabe destacar, por outro lado, que a ACV é fortemente dependente do fornecimento e/ou existência de dados para a elaboração do inventário, que é a base para a etapa posterior de avaliação de impactos. Portanto, se não há disponibilidade de dados dos processos incluídos dentro do sistema de produto, a avaliação pode ficar comprometida em caso de não existência de bibliografia na área.

Por fim, os resultados deste estudo ajudam a identificar os principais aspectos e impactos ambientais envolvendo a geração de eletricidade em uma usina termelétrica que utiliza motores alternativos bicomustíveis. Ainda, os resultados podem ser úteis para futuros estudos de ACV que envolvem materiais produzidos no Brasil, mais especificamente na Zona Franca de Manaus. Outra possibilidade é a utilização dos resultados para comparação com outras tecnologias de geração de energia elétrica

7. RECOMENDAÇÃO

A seguir, sugerem-se algumas propostas que podem ser utilizadas em trabalhos futuros:

- Elaborar a ACV de termelétricas que utilizam outros combustíveis para comparação;
- Elaborar a ACV de termelétricas que utilizam os mesmos combustíveis com outras tecnologias para comparação;
- Realizar estudo acerca da volatilização dos produtos químicos empregados na UTE para uma melhor modelagem dos potenciais impactos ambientais;
- Avaliar outras emissões atmosféricas não incluídas neste trabalho;
- Propor um sistema para aumento de eficiência da UTE por meio de recuperação energética do vapor, por exemplo;
- Propor estudos visando diferentes técnicas para redução de emissão de NO_x , visando uma redução dos impactos, para os quais a UTE contribui.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da Energia Elétrica no Brasil**. 236f. ISBN: 978-85-87491-10-7. 3ª Edição, Brasília 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 115/2013**. 13f. Brasília, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Último Acesso: 01 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **O Gás Natural Liquefeito no Brasil- Experiência da ANP na Implantação dos Projetos de Importação de GNL**. Séries ANP; 4. ISBN 978-85-88286-12-2. Rio de Janeiro, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Rio Urucu 2014**. Brasília, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Número 65. Rio de Janeiro, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Anuário Estatístico Portuário**. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/portal/Estatisticas_Anuarios.asp#>. Último Acesso: 01 ago. 2016.

AGRAWAL, K. ; JAIN, S. ; JAIN, A. ; DAHIYA, S. A life cycle environmental impact assessment of natural gas combined cycle thermal power plant in Andhra Pradesh, India. **Environmental Development**. Volume 11. Pages 162-174. Apr, 2014.

ALMEIDA, R. **A Zona Franca de Manaus no contexto da Política Industrial Brasileira**. In: XXXV Encontro da ANPAD. 4 a 7 de Setembro. Rio de Janeiro, 2011.

AMBIENTEBRASIL. **Usina Termelétrica**. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/termelétrica/usina_termelétrica.html>. Último Acesso: 02 fev. 2016.

AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. **CAS Registry Fact Sheet**. Disponível em: <<https://www.cas.org/about-cas/cas-fact-sheets/registry-fact-sheet>> Último Acesso: 27 jul. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14725. **Ficha de Informações de Produtos Químicos- FISPQ**. Rio de Janeiro. Jul. , 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 14040- Avaliação do Ciclo de Vida- Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 14044- Avaliação do Ciclo de Vida- Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.

ATILGAN, B.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 106, p. 555–564, 2015.

AZAPAGIC, A; CLIFT, R. Allocation of Environmental Burdens by Whole-System Modelling – The Use of Linear Programming In: **Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA**. Leiden, 1994.

BAHIAGÁS. **Gás Natural: Benefícios Ambientais no Estado da Bahia**. 132f. Editora: Solisluna Design. Salvador, 2005.

BAIOCO, J.S.; SANTAREM, C.A.; BONE, R.B.; FILHO, V.J. **Custos e Benefícios Econômicos de Tecnologias de Transporte de Gás Natural no Brasil**. In: IV Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás. Campinas, 2007.

BALOGH, T.S; PEDRIALI, C.A; BABY, A.R; ROBLES, M.V; KANEKO, T.M. **Proteção à Radiação Ultravioleta: Recursos Disponíveis na Atualidade em Fotoproteção**. In: Anais Brasileiros de Dermatologia. Março, 2010.

BARDELIN, C.E. **Os Efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com Ênfase no Consumo de Energia Elétrica**. 2004. 113f. Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2004.

BAUKAL, C.E. **Industrial Combustion Pollution and Control**. USA. New York, 2004. ISBN: 0-8247-4694-5.

BELICO, L. **Conceitos Básicos, Configurações, Potência Gerada e Energia Produzida**. Universidade de São Paulo (USP). Disponível em: <disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=22511> Último Acesso: 01 abr. 2016.

BENDENZÚ, M.A. **Avaliação Técnico-Econômico das Alternativas Tecnológicas de Transporte de Gás Natural**. 81f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRJ). Rio de Janeiro, 2009.

BEZERRA, D.P. **Estudo sobre os Processos Físicos envolvidos nos Motores que utilizam como Combustíveis Óleos (Ciclo Diesel). Estudo sobre a Viabilidade da “Ottonização” do Ciclo Diesel**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Católica de Brasília (UCB). Brasília, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Uso Sustentável e Conservação dos Recursos Florestais da Caatinga**. Brasília/DF, 2010. ISBN 978-85-63269-04-1

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Número 436, 22 de Dezembro de 2011**. Brasília, 2011.

BRASIL. Núcleo de Estudos e Pesquisas. Senado Federal. **Por que o Brasil está trocando as Hidrelétricas e seus Reservatórios por Energia mais Cara e Poluente?** Brasília, 2013. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-128-por-que-o-brasil-esta-trocando-as-hidreletricas-e-seus-reservatorios-por-energia-mais-cara-e-poluente>> Último Acesso: Abril, 2017.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Diário Oficial da União**. Brasília/DF, 2015a. ISSN 1677-7042

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015**. 232f. Rio de Janeiro, 2015b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2014**. 32f. Rio de Janeiro, 2015c.

BOGUSŁAW, B. Application of Stochastic Approach based on Monte Carlo (MC) Simulation for Life Cycle Inventory (LCI) to the Steel Process Chain: Case Study. **Science of The Total Environment**. Volume 481. Pages 649-655 15 May, 2014.

BONFIM, M.S. **Considerações sobre a Utilização do Gás Natural na Geração de Energia Elétrica em Municípios da Região Amazônica**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2008.

BUENO, C.; MENDES, N.C.; OMETTO, A.R; ROSSIGNOLO, J.A.; **Metodologias de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV): Discussão comparativa**. In: Anais do III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços. 03 a 06 de Setembro. Pgs 334-339. Maringá, 2012.

CASTELAZO, E.S; GUJBA, H.; AZAPAGIC, A. Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Mexico. **Energy**. Volume 36. Pages 1488-1499 Jan, 2011.

CAVALCANTE, Z.; SILVA, M. **A Importância da Revolução Industrial no Mundo da Tecnologia**. In: VII Encontro Internacional de Produção Científica. Maringá (PR) ISBN 978-85-8084-055-1. 25 a 28 de Outubro de 2011.

CEMIG. **História da Eletricidade no Brasil**. Disponível em: < http://www.cemig.com.br/pt_br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/historia_da_eletricidade_no_brasil.aspx> Último Acesso: 01 abr. de 2016.

CHANDEL, M.K; PRATSON, L.F; JACKSON, R.B. The Potencial Impacts of Climate-Change Policy on Freshwater Use in Thermoelectric Power Generation. **Energy Policy**. Volume 39, Issue 10, Pages 6234–6242. October, 2011

COGEN. **Conversão de Motores Diesel: Utilização de combustíveis indutores de menores emissões**. Portugal, 2011.

COLOSSI, B.R. **Avaliação Ambiental de uma Usina Termoeletrica a Óleo Combustível utilizando Análise do Ciclo de Vida**. Porto Alegre. UFRGS, 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Poluentes**. Disponível em: < http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_saude.asp>. Último Acesso: 27 jul. 2016.

COMPANHIA DE GÁS DO AMAZONAS. **Reservas de Óleo e Gás Natural na Amazônia Ocidental- Uso Industrial e Polo Gás Químico**. In: VII Feira Internacional da Amazônia- FIAM. 27 a 30 Novembro, 2013.

CONSOLI, F.; ALLEN, D.; BOUSTEAD, I.; FAVA, J.; FRANKLIN, W.; JENSEN, A.; OUDE, N.; PARRISH, R.; PERRIMAN, R.; POSTLETHWAITE, D.; QUAY, B.; SÉGUIN, J.; VIGON, B.; SETAC-Society of Environmental Toxicology and Chemistry. **Guidelines for Life-Cycle Assessment: A “Code of Practice”**. Sesimbra: Portugal, 1993.

DELGADO, B.; CARVALHO, M. **Avaliação do Ciclo de Vida para verificação do potencial de energia solar fotovoltaica em reduzir a pegada de carbono do mix elétrico brasileiro.** In: V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida. Setembro, 2016. Fortaleza, p. 140-146.

DIVINO, J. A.; MCALEER, M. Modelling sustainable international tourism demand to the Brazilian Amazon. **Environmental Modelling and Software**, v. 24, n. 12, p. 1411–1419, 2009.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Life Cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information sources.** United Kingdom, 1997.

ESPOSITO, A.S. **Competitividade da Termoeletricidade movida a Gás Natural no Brasil: Estudo de Caso de um Sistema Predominantemente Hidroelétrico.** 204f Dissertação (Mestrado)- Instituto de Economia. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos. Gestão Ambiental.** Instituto Politécnico de Viseu. 80 p., 2004.

FIGUEIREDO, M.; HEDLUND, K.; GRAEPIN, C.; SILVA, T.; AZEVEDO, F.; KEMERICH, P. Gás Natural: Potencialidades de Utilização no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.** Santa Maria, 2013. v(10), nº 10, p. 2251-2265, JAN-ABR, e-ISSN: 2236-1170. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5902/223611707896> >. Último Acesso: 01 abr. de 2016.

FLEMSTRÖM, K; CARLSON, R; ERIXON, M. **Relationships between Life Cycle Assessment and Risk Assessment- Potentials and Obstacles.** Naturvårdsverket. Report 5379. Jun, 2004.

FRANÇA, A.J. **Influência do Efluente Gerado por uma Termoelétrica Lançado em um Corpo D'água – Estudo Casa na UTE Manaus- Manaus/AM.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará (UFPA). Belém, 2015.

FURNAS. **Usina Termelétrica Convencional.** Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemaFurnas/usina_term_funciona.asp>. Último Acesso: 27 mar. 2016.

GABATHULER, H. **The CML Story: How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA.** International Journal LCA, vol. 2 (4) 187-194. Landsberg, Germany, 1997.

GASNET. **Termelétricas.** Disponível em:<<http://www.gasnet.com.br/termelétricas/ciclo.asp>>. Último Acesso: 01 abr.de 2016.

GE BETZ. **Material Safety Data Sheet Cortrol OS 5607.** United States, 2003.

GE BETZ. **Material Safety Data Sheet Hypersperse MSI 310.** United States, 2003a.

GE BETZ. **Material Safety Data Sheet Corrrshield MD 4100.** United States, 2011.

GE BETZ. **Material Safety Data Sheet Klaraid PC 2700.** United States, 2011a.

GE BETZ. **Material Safety Data Sheet Steamate NA0560.** United States, 2012.

GE BETZ. **Safety Data Sheet Optisperse ADJ 5050.** United States, 2013.

GE BETZ. **Safety Data Sheet Polyfloc 1601.** United States, 2014.

GE BETZ. **Safety Data Sheet Corrrshield NT 4200.** United States, 2014a.

- GE BETZ. **Safety Data Sheet Betzdearborn PQ 682**. United States, 2016.
- GEPEA. Relatório Técnico GEPEA/14: **Aspectos Tecnológicos do GNL e do Transporte do Gás Natural**. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2003.
- GOLDEMBERG, J; VILLANUEVA, L.D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. Editora USP. São Paulo, 2003.
- GOLDEMBERG, J; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estudos Avançados 21 (59). 2007.
- GOMES, C.G. **Noções de Geração de Energia utilizando algumas Fontes de Baixo Impacto Ambiental**. 100f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)- Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2010.
- GUINÉE, J.B. **Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards**. Kluwer Academic Publishers, New York, 2004.
- GUINÉE, J.B; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **Journal Environmental Science Technology**. 2010, vol. 45, p. 90-96.
- GURGEL, A. **Refino de Petróleo e Petroquímica**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Departamento de Engenharia Química. Disponível em: <http://www.nupeg.ufrn.br/downloads/deq0370/curso_refino_ufrn-final_1.pdf>. Último Acesso: 01 abr. 2016.
- HEIDI K. STRANDDORF; LEIF HOFFMANN; ANDERS SCHMIDT; Impact categories, normalisation and weighting in LCA. **Environmental News**, v. 78, p. 90, 2005.
- HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. B.; HAES, H.A; **Environmental Life Cycle Assessment of Products - Guide**. Leiden, October, 1992.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Manual do Sistema ILCD: Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos**. Brasília, 2014.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013 The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., ISBN 978-1-107-05799-1. 1535 pp, 2013.
- JOINT RESEARCH CENTRE- INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment First edition**. European Union, 2010.
- JOLLIET, O.; MULLER-WENK, R.; BARE, J.; BRENT, A.; GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; ITSUBO, N.; PEÑA, C.; PENNINGTON, D.; POTTINGS, J.; REBITZER, G.; STEWART, M.; HAES, H.D.; WEIDEMA, B. **The LCIA Midpoint damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative**. **International Journal Life Cycle Assessment**. Number 9 (6). Pages 394-404, 2004.
- JUNIOR, G. **Processamento Primário de Petróleo/ Noções de Processo de Refino**. Disponível em: <http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/processamento_primario.pdf>. Último Acesso: 01 abr. de 2016.

KENNY, J.F; BARBER, N.L; HUTSON, S.S.; LINSEY, K.S; LOVELACE, J.K; MAUPIN, M.A. **Estimated Use of Water in the United States in 2005**. U.S Geological Survey Circular 1344. USA, 2009.

KLÖPFFER, W. ; CURRAN, M. A.; **Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment**. Germany, 2014. ISBN: 978-94-017-696-6.

LEHTINEN, H.; SARENTAUS, A.; ROUHIAINEN, J.; PITTS, M.; AZAPAGIC, A. **A Review of LCA Methods and Tools and their Suitability for SMEs**. Manchester, 2011.

LEÃO, R. P. S. **Tecnologias de Geração de Energia Elétrica: Geração Termoelétrica. Conversão Termoelétrica**. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~edsonh/Repositorio/PIPprojeto_e_Instalacoes_Eletricas_Prediais/Material%20de%20Aula/Parte_I_GTD/Complemento/Geracao%20II.pdf>. Último Acesso em: 27 mar. 2016.

LIMA, H. **Apresentação à Comissão da Amazônia, Integração Nacional e Desenvolvimento Regional**. Brasília, 2007.

MACIEL, P.; MACHADO, W.; RIVAS, A. **O Impacto da Zona Franca de Manaus – ZFM no Desenvolvimento do Estado do Amazonas: a eficácia do modelo**. In: XXXIII Encontro Nacional de Eng. De Produção. 21 a 24 de Out. Ouro Preto, 2003.

MACIEL, V.G. **Avaliação do Desempenho Ambiental da Fase Agrícola no Sistema de Produto do Biodiesel de Soja no Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. 136f. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Porto Alegre, 2014.

MARTINS, F.R; PEREIRA, E.B; ABREU, S.L; COLLE, S. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics Applications. **Energy Policy**. Vol 36, p 2865-2877, 2008.

MAZZEI, T.B. **Um Enfoque Logístico para Massificação do Uso do Gás Natural**. 117f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)- Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2007.

MENDES, N.C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: Análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. São Carlos. USP, 2013.

MULTINER. **Especificação Técnica 4x18V46**.

NEOENERGIA. **História do Setor Elétrico**. Disponível em: <<http://www.neoenergia.com/Pages/O%20Setor%20El%C3%A9trico/HistoriaDoSetor.aspx>>. Último Acesso em: 26 de jan. de 2016.

NERI, F. **Petróleo**. Disponível em: <<http://www.neri.adm.br/produtos.pdf>>. Último Acesso: 01 abr. 2016.

NOBEL,B. **The Role of LCA in Decision Making in the Context of Sustainable Development**. October, 2007.

NOGUEIRA, A.R. **Análise de Métodos de Alocação utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida**. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, A.M.; MARCHESAN, T.B.; CAMPOS, A.; PRADO, R.N. **Distributed Emergency Lighting System LEDs Driven by two Integrated Flyback Converters.** In: Industry Applications Conference (IAS), 2007.

OJUTKANGAS, M; **Dual Fuel Engine Development and Design.** Wärtsilä Ship Power Merchant. Disponível em: <
<http://www.kmtp.lt/uploads/Renginiai/Klaipeda%20LNG%20Forum%202011%2006%2016/Dual%20fuel%20engine%20development%20and%20design.pdf>> Último Acesso: 02 mai. 2016.

PANTANALENERGIA. **Operação de Usinas.** Disponível em: <
<http://www.pantanalenergia.com.br/operation.asp>>. Último Acesso: 27 jul. 2016.

PASSUELLO, A. C. B. **Aplicação da Avaliação do ciclo de vida em embalagens descartáveis para frutas: estudo de caso.** 2007. 148p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PEREIRA, R.H; BRAGA, S.L; BRAGA, C.V. **O Gás Natural como Substituto do Diesel na Geração Distribuída de Energia Elétrica.** In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Salvador, 2005.

PEREIRA, R.H; BRAGA, S.L; BRAGA, C.V. **Substituição Parcial do Óleo Diesel pelo Gás Natural em Motores- Atratividade da Tecnologia e sua Avaliação Experimental.** Disponível em: <
http://www.workoutenergy.com.br/publicacao_vencontro/trabalhos_tecnicos/download/ricardo_hernandez.pdf>. Último Acesso: 01 abr. 2016.

PETROBRAS. **Estudo Prévio de Impacto Ambiental para Construção do Gasoduto Juruá/Urucu.** Disponível em <
http://www.ipaam.am.gov.br/arquivos/download/arqeditor/RIMA_Jurua-Urucu.pdf> . Último Acesso em: 10 abr. 2015. Manaus, 2008a.

PETROBRAS. **Biodiversidade na Província Petrolífera de Urucu.** Disponível em: <
http://sites.petrobras.com.br/biomas/Content/Files/Biodiversidade__Urucu.pdf>
 Último Acesso: 10 abr. 2016. 194f. ISBN: 978-85-99891-04-9. Rio de Janeiro, 2008b.

PHUMPRADAB, K.; GHEEWALA, S. H.; SAGISAKA, M. Life cycle assessment of natural gas power plants in Thailand. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, p. 354–363, 2009.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de Avaliação de Impactos do ciclo de Vida: Uma Discussão para Adoção de Métodos nas Especificidades Brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 08, n. 03, p. 222-240, 2012.

PRAÇA, E. R. **Distribuição de gás natural no Brasil: um enfoque crítico e de minimização de custos.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Fortaleza: DET/UFCE, 2003.

PRÉ. **SimaPro Database Manual- Methods.** Report Version 2.9. San Francisco, USA. April, 2016.

PRÉ. **SimaPro Tutorial.** Report Version 5.3. San Francisco. USA. January, 2016a.

QUANTIS. **Análise Comparativa do Ciclo de Vida das Telhas Cerâmicas versus Telhas de Concreto.** Relatório Final preparado para ANICER. Canadá, 2011.

RAMÍREZ, P. K. S. **ANÁLISE DE MÉTODOS DE ALOCAÇÃO UTILIZADOS EM AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.** 138f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2009.

REBITZER, G et al. **Life Cycle Assessment Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis and Applications.** Environment International 30 (2004) 701–720.

REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável.** São Paulo: Manole, 2. ed, 2005.

RONCEROS, N.G. **Simulação do Processo de Liquefação de Gás Natural APCI C3MR.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRJ). Rio de Janeiro, 2008.

ROSENBAUM, R.K. **Interpretation: Uncertainty and Sensitivity.** Material didático da disciplina Life Cycle Assessment of Products and Systems. Division for Quantitative Sustainability Assessment, DTU Management Engineering, Technical University of Denmark, 2012.

SANTOS, G.J. **Simulador Interativo da Estabilidade de Usinas Termelétricas de Ciclo Combinado para Projeto, Pesquisa e Treinamento.** 2012. 114f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2012.

SONNEMANN, G.; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. **Integrated Life Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes.** CRC Press Company, Boca Raton. 2003.

SUFRAMA. **Zona Franca de Manaus.** Disponível em: <http://www.suframa.gov.br/zfm_o_que_e_o_projeto_zfm.cfm>. Último Acesso: 29 Ago. , 2016.

TAESA. **Sistema Interligado Nacional.** Disponível em: <<http://institucional.taesa.com.br/a-taesa/nosso-negocio/sistema-interligado-nacional-sin/>> Último Acesso: 01 abr. 2016.

TORRES, F.C. **Estudo da Utilização do Biodiesel para Geração de Energia Elétrica no Brasil.** Dissertação de mestrado. PUCRIO. Rio de Janeiro, 2006.

TRANSPETRO. **Informações Portuárias - Terminal Coari.** 1º Edição. Rio de Janeiro, 2006.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life Cycle Assessment (LCA) of electricity generation Technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Volume 28. Pages 555-565. Sept, 2013.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice.** Disponível em: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF> Último Acesso: 27/07/2016. USA, 2006.

VENDITTI, R. A. ; **Lecture 5: Life Cycle Inventory.** North Carolina State University, 2012. Disponível em : < <http://www4.ncsu.edu/~richardv/documents/Lecture5-Lifecycleinventoryanalysis.pdf>> Último Acesso: 14 abr. de 2015.

WÄRTSILÄ. **Project Guide for Marine Applications.** Finland, 2001.

WÄRTSILÄ. **Fuel efficiency in gas conversions: More flexibility, less emissions and lower fuel costs.** Finland, 2013a. Disponível em: <<http://www.wartsila.com/docs/default-source/services-documents/White-papers/wartsila-bwp-fuel-efficiency-in-gas-conversions.pdf?sfvrsn=6>>. Último Acesso: 02. mai 2016.

WÄRTSILÄ. **Smart Power Generation.** Disponível em: <http://www.mcilvaineconomy.com/Universal_Power/Subscriber/PowerDescriptionLinks/Dan%20Shelledy,%20Wartsila%20-%205-16-13.pdf>. Finland, 2013b. Último Acesso: 11 jul. 2016.

WÄRTSILÄ. **GAS AND MULTI-FUEL POWER PLANTS.** Finland, 2014.

WEIDEMA, B. P. **System Expansions to handle Co-Products of Renewable Materials.** 7th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe. Presentation Summaries, pp45-48. 1999.

WORLD BANK. Brasil: Eco-Transporte de Cargas. Novembro, 2011.

YANAGIHARA, J.I.; **Ciclo Brayton.** Universidade de São Paulo (USP). Disponível em: <http://www.lete.poli.usp.br/PME2321_files/cicloBrayton.PDF>. Último Acesso: 01 abr. 2016.

ZOCHE, L. Identificação das Limitações da ACV sob a Ótica de Pesquisas Acadêmicas. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Ponta Grossa, 2014.

ZORTEA, R. **Avaliação da Sustentabilidade do Biodiesel da Soja no Rio Grande do Sul: uma abordagem de ciclo de vida.** 213f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2015.

9. APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 27- Distâncias entre os portos da Venezuela e o de Manaus.

Número	Portos	Distância ao porto de Manaus	
		(milhas náuticas)	(km)
1	Alcasa	2003	3709.56
2	Amuay Bay	2400	4444.80
3	Bachaquero	2612	4837.42
4	Bajo Grande Refinery	2512	4652.22
5	Borburata	2236	4141.07
6	Caripito	1956	3622.51
7	Cumabero	2311	4279.97
8	El Chaure	2236	4141.07
9	El Palito	2246	4159.59
10	El Tablazo	2490	4611.48
11	Guaraguao	2054	3804.01

12	Guaranao	2402	4448.50
13	Guiria	1888	3496.58
14	La Estacada	2493	4617.04
15	La Guaira	2173	4024.40
16	Las Piedras	2173	4024.40
17	Los Cocos	2047	3791.04
18	Maracaibo	2498	4626.30
19	Moron	2243	4154.04
20	Palua	2003	3709.56
21	Pamatacual	2047	3791.04
22	Paradero	2003	3709.56
23	Pertigalete	2054	3804.01
24	Puerto Cabello	2236	4141.07
25	Puerto La Cruz	2054	3804.01
26	Puerto Miranda	2490	4611.48
27	Puerto Ordaz	2003	3709.56
28	Punta Cardon	2406	4455.91
29	Punta Cuchillo	2003	3709.56
30	Punta de Palmas	2512	4652.22
31	San Felix	2003	3709.56
32	San Lorenzo	2608	4830.02
33	Ventterminales	2236	4141.07

APÊNDICE B

Quadro 28- Entradas e Saídas da UTE operando com HFO.

Fluxo		Substância	Unidade	Média	Mínimo	Máximo
Sentido (Origem/ Destino*)	Compart **					
Entrada (T)		HFO	kg	8.94E+06	8.22E+06	9.34E+06
Entrada (T)		Óleo Lubrificante	kg	2.33E+04	2.18E+04	2.63E+04
Entrada (T)		Nitrito de Sódio	kg	6.28E+01	0.00E+00	7.50E+01
Entrada (T)		Ácido Fósforico	kg	5.40E-01	4.80E-01	6.40E-01
Entrada (T)		Hidróxido de Sódio	kg	2.97E+01	3.00E+00	3.70E+01
Entrada (T)		Ácido Adípico	kg	2.70E-01	2.40E-01	3.20E-01
Entrada (T)		Acrilamida	kg	1.40E-01	9.00E-02	2.10E-01
Entrada (T)		Formaldeído	kg	1.00E+00	5.00E-01	1.50E+00
Entrada (T)		Monoetanolamina	kg	7.00E+00	3.50E+00	1.05E+01
Entrada (E)		Água	L	1.41E+05	1.30E+05	1.53E+05
Saída (T)		Borra Oleosa	kg	6.16E+04	5.66E+04	6.44E+04
Saída (E)	água	DQO	kg	3.04E+04	5.85E+03	9.80E+04
Saída (E)	água	DBO	kg	5.91E+03	1.17E+03	1.67E+04

Fluxo		Substância	Unidade	Média	Mínimo	Máximo
Sentido (Origem/Destino*)	Compart **					
Saída (E)	água	Fenóis Totais	kg	4.47E+01	1.83E+01	9.14E+01
Saída (E)	água	Fosfato	kg	8.88E+02	3.66E+01	1.85E+03
Saída (E)	água	Nitrato	kg	3.75E+02	1.83E+01	1.87E+03
Saída (E)	água	Nitrito	kg	1.24E+04	1.83E+01	1.16E+05
Saída (E)	água	Óleos e Graxas	kg	2.09E+03	1.46E+02	8.96E+03
Saída (E)	água	Sólidos Dissolvidos Totais	kg	8.03E+04	3.29E+02	1.79E+05
Saída (E)	água	Sólidos Suspensos	kg	2.17E+04	5.67E+02	6.69E+04
Saída (E)	água	Sólidos Sedimentáveis	kg	2.24E+01	0.00E+00	9.14E+01
Saída (E)	água	Sulfato	kg	1.80E+02	0.00E+00	8.96E+02
Saída (E)	água	Sulfeto	kg	9.65E+01	0.00E+00	1.83E+02
Saída (E)	ar	Monóxido de Nitrogênio (NO)	kg	1.84E+06	1.31E+06	2.23E+06
Saída (E)	ar	Óxido de Nitrogênio (NO _x)	kg	2.84E+06	1.91E+06	3.50E+06
Saída (E)	ar	Dióxido de Enxofre (SO ₂)	kg	2.13E+05	9.75E+04	3.41E+05
Saída (E)	ar	Material Particulado (MP) como Partículas Totais	kg	1.51E+05	1.17E+05	1.79E+05
Saída (E)	ar	Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	2.61E+07	2.40E+07	2.72E+07
Saída (E)	ar	Monóxido de Carbono (CO)	kg	5.24E+03	4.82E+03	5.48E+03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: * (E): Ecosfera ou (T): Tecnosfera **:Compartimento

APÊNDICE C

Quadro 29 - Entradas e Saídas da UTE operando no modo bicomcombustível.

Fluxo		Substância	Unidade	Média	Mínimo	Máximo
Sentido (Origem/Destino*)	Compart **					
Entrada (T)		HFO	kg	3.32E+06	1.86E+06	6.77E+06
Entrada (T)		Gás Natural	m ³	8.33E+06	2.90E+06	1.12E+07
Entrada (T)		Óleo Lubrificante	kg	2.78E+04	2.35E+04	3.39E+04
Entrada (T)		Nitrito de Sódio	kg	3.31E+01	3.96E+00	7.13E+01
Entrada (T)		Ácido Fósforico	kg	6.17E-01	3.20E-01	8.00E-01
Entrada (T)		Hidróxido de Sódio	kg	1.26E+01	0.00E+00	2.40E+01
Entrada (T)		Ácido Adípico	kg	1.03E-01	3.00E-02	1.80E-01
Entrada (T)		Acrilamida	kg	1.03E-01	3.00E-02	1.80E-01

Entrada (T)		Formaldeído	kg	1.19E+00	5.00E-01	2.00E+00
Entrada (T)		Monoetanolamina	kg	8.30E+00	3.50E+00	1.40E+01
Entrada (E)		Água	L	1.22E+05	1.04E+05	1.29E+05
Saída (T)		Borra Oleosa	kg	5.90E+04	3.31E+04	1.20E+05
Saída (E)	água	DQO	kg	1.70E+04	2.04E+03	6.04E+04
Saída (E)	água	DBO	kg	6.29E+03	6.11E+02	1.44E+04
Saída (E)	água	Fenóis Totais	kg	1.26E+01	0.00E+00	3.40E+01
Saída (E)	água	Fosfato	kg	3.21E+02	0.00E+00	8.49E+02
Saída (E)	água	Nitrato	kg	1.44E+02	0.00E+00	4.75E+02
Saída (E)	água	Nitrito	kg	4.88E+01	0.00E+00	2.38E+02
Saída (E)	água	Óleos e Graxas	kg	7.41E+02	6.79E+01	1.56E+03
Saída (E)	água	Sólidos Dissolvidos Totais	kg	2.93E+04	6.93E+02	6.15E+04
Saída (E)	água	Sólidos Suspensos	kg	2.87E+03	6.79E+02	1.42E+04
Saída (E)	água	Sólidos Sedimentáveis	kg	3.23E+00	0.00E+00	6.79E+01
Saída (E)	água	Sulfato	kg	1.30E+03	0.00E+00	5.43E+03
Saída (E)	água	Sulfeto	kg	2.30E+01	0.00E+00	5.43E+01
Saída (E)	ar	Óxido de Nitrogênio (NOx)	kg	1.10E+06	8.75E+05	1.28E+06
Saída (E)	ar	Óxidos de Enxofre (SOx)	kg	1.01E+05	5.94E+04	1.34E+05
Saída (E)	ar	Material Particulado (MP) como Partículas Totais	kg	4.83E+04	3.26E+04	5.60E+04
Saída (E)	ar	Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	2.29E+07	1.00E+07	3.75E+07
Saída (E)	ar	Monóxido de Carbono (CO)	kg	6.47E+03	2.67E+03	1.00E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: * (E): Ecosfera ou (T): Tecnosfera **:Compartimento

10.ANEXOS

ANEXO A

Quadro 30- Parâmetros qualitativos dos efluentes (operação somente com HFO).

Data	Unidade	22/02/2008	24/04/2008	26/06/2008	21/08/2008	17/10/2008	03/12/2008	02/02/2009	01/04/2009	01/06/2009	13/08/2009	01/10/2009	01/12/2009	02/02/2010	31/03/2010	04/06/2010	20/08/2010	23/10/2010	01/12/2010
DQO (mg O ₂ /L)	mg O ₂ /L	216	202	92	172	292	92	536	140	214	225	32	54	88	108	104	124	145	154
DBO ₅	mg O ₂ /L	43.2	40.4	18.4	32.8	51.4	21.2	91.5	32.9	42.8	45	6.4	10.8	17.6	21.6	20.8	24.8	29	30.8
pH		7.5	7	5.7	7	7.3	6.8	7.9	6.5	6.5	6.5	6.5	6.6	6.9	7	6.8	8.2	7.2	8.4
Condutividade e Elétrica	µS/cm	286	235.2	268.5	89.1	102.3	177.5	139	1398	1202	1190	1149	1102	987	669	1190	1028	1110	1780
Fenóis Totais	mg C ₆ H ₅ O/L	0.3	0.1	0.1	0.2	0.5	0.3	0.4	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.4
Fosfato	mg P/L	3.7	4.5	5.3	4.9	3.1	6.5	5.9	9.4	10.1	7.8	0.2	0.2	3	8.2	5.1	4.6	0.8	4.1
Nitrato	mg N/L	0.3	0.7	0.8	0.1	0.5	3.5	3.2	0.2	3.5	10.2	4.9	4.1	1.3	0.4	0.2	0.6	0.6	1.8
Nitrito	mg N/L	0.2	0.5	0.1	0.1	0.1	1	1.5	2.2	0.6	1.6	632	582	0.5	0.4	0.3	0.3	0.6	1
Óleos e Graxas (mg/L)	mg/L	7.6	9.2	5.9	29.8	3.5	0.9	2.3	14.9	8.8	9.3	49	37	0.8	12.3	2.8	6.7	3.8	1.4
Oxigênio Dissolvido	mgO ₂ /L	2.1	1.4	3.5	1	2	3	0	1.5	1.9	2.1	5.4	3.5	3.5	2.7	3.2	0.05	5.9	0.05
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	601	587	201.4	66.8	76.7	133.1	104.3	768.9	661.1	651.3	3.2	1.8	740.3	501.8	654.5	565.4	610.5	979

Sólidos Suspensos	mg/L	366	254	292	201.2	262.9	55.1	181.6	91.7	116.8	116.8	10.1	12.3	21	3.1	25	10.3	104.6	9.9
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	0	0	0	0.5	0.2	0	0	0	0	0	0.4	0.5	0.3	0	0	0	0	0.3
Sulfato	mg SO4/L	0.3	0.3	0	0.1	0.1	2.2	0.4	0.6	0	0	0.1	0.1	0.4	0.2	4.9	3.5	1.4	3.1
Sulfeto	mg S/L	0.2	0	0.3	0.9	0.9	0	0.9	0.8	0.9	0.9	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	1	0.8	0.9
Temperatura	°C	37	38	33	33	38	39	40	25	39	39	35	28	30	39	39	39	39	39
Turbidez	NTZ	5.2	10.1	12	50.8	24.2	10	21.2	5.7	10.8	15.1	10.9	9.9	30	19.8	33.5	28.4	30.4	31.4

ANEXO B

Quadro 31- Parâmetros qualitativos dos efluentes (operação bicomcombustível).

Data	Unidade	22/02/2008	24/04/2008	26/06/2008	21/08/2008	17/10/2008	03/12/2008	02/02/2009	01/04/2009	01/06/2009	13/08/2009	01/10/2009	01/12/2009	02/02/2010	31/03/2010	04/06/2010	20/08/2010	23/10/2010	01/12/2010
DQO (mg O ₂ /L)	mg O ₂ /L	216	202	92	172	292	92	536	140	214	225	32	54	88	108	104	124	145	154
DBO ₅	mg O ₂ /L	43.2	40.4	18.4	32.8	51.4	21.2	91.5	32.9	42.8	45	6.4	10.8	17.6	21.6	20.8	24.8	29	30.8
pH		7.5	7	5.7	7	7.3	6.8	7.9	6.5	6.5	6.5	6.5	6.6	6.9	7	6.8	8.2	7.2	8.4
Condutividade e Elétrica	µS/cm	286	235.2	268.5	89.1	102.3	177.5	139	1398	1202	1190	1149	1102	987	669	1190	1028	1110	1780
Fenóis Totais	mg C ₆ H ₅ O/L	0.3	0.1	0.1	0.2	0.5	0.3	0.4	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.4
Fosfato	mg P/L	3.7	4.5	5.3	4.9	3.1	6.5	5.9	9.4	10.1	7.8	0.2	0.2	3	8.2	5.1	4.6	0.8	4.1
Nitrato	mg N/L	0.3	0.7	0.8	0.1	0.5	3.5	3.2	0.2	3.5	10.2	4.9	4.1	1.3	0.4	0.2	0.6	0.6	1.8
Nitrito	mg N/L	0.2	0.5	0.1	0.1	0.1	1	1.5	2.2	0.6	1.6	632	582	0.5	0.4	0.3	0.3	0.6	1
Óleos e Graxas (mg/L)	mg/L	7.6	9.2	5.9	29.8	3.5	0.9	2.3	14.9	8.8	9.3	49	37	0.8	12.3	2.8	6.7	3.8	1.4
Oxigênio Dissolvido	mgO ₂ /L	2.1	1.4	3.5	1	2	3	0	1.5	1.9	2.1	5.4	3.5	3.5	2.7	3.2	0.05	5.9	0.05
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	601	587	201.4	66.8	76.7	133.1	104.3	768.9	661.1	651.3	3.2	1.8	740.3	501.8	654.5	565.4	610.5	979
Sólidos Suspensos	mg/L	366	254	292	201.2	262.9	55.1	181.6	91.7	116.8	116.8	10.1	12.3	21	3.1	25	10.3	104.6	9.9

Óleos e Graxas (mg/L)	mg/L	7.2	13	23	21.2	11	9.8	4	20	17	14	8	13	7	8	6	16	14	10	1	4	2
Oxigênio Dissolvido	mgO 2/L	1.6	1.4	1.5	2	1.8	1.5	3.5	2.6	3.1	2.8	2.2	3.7	2.8	3.5	3.5	2.5	3.8	4.1	4	2.6	4
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	611.3	740.3	715	686.3	626.3	630	421.6	307	350	370	290	478	325	346.8	463	906.4	45.1	130	190		10.2
Sólidos Suspensos	mg/L	208.9	81.6	78.6	54.8	45.5	52.1	20	38	26	40	40	34	20	20	14	30	13	20	10	22	20
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sulfato	mg SO4/L	4.1	3.5	3.9	2.5	2.7	1.8	80	50	15	43	19	31	21	1	27	44	6	0	2	43	0
Sulfeto	mg S/L	0.6	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.2	0.4	0.5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0	0.8	0	0	0	0.7	0
Temperatura	°C	34	40	34	34	37	40	30	40	31	24.2	36	56	32	32	34	38	32	25.2	30	35	34.5
Turbidez	NTZ	29.4	36.2	34.8	32.8	31.5	39	45	63	32	55	38	25.3	26	31	18	36	18	18	7	15	3

ANEXO C

Quadro 32- Consumo de HFO e geração de borra (operação somente com HFO)

Ano	Mês	Consumo de Combustível (kg)	Borra
2008	jan	9.11E+06	2.20E+04
	fev	8.39E+06	2.70E+04
	mar	8.83E+06	4.40E+04
	abr	8.64E+06	3.03E+04
	mai	8.57E+06	3.70E+04
	jun	8.43E+06	7.00E+04
	jul	8.93E+06	2.60E+04
	ago	9.18E+06	7.09E+04
	set	8.85E+06	9.43E+04
	out	9.04E+06	3.89E+04
	nov	8.62E+06	5.45E+04
	dez	7.75E+06	1.01E+04
2009	jan	7.40E+06	5.01E+04
	fev	7.20E+06	6.25E+04
	mar	8.38E+06	1.34E+05
	abr	8.36E+06	4.89E+04
	mai	8.83E+06	6.33E+04
	jun	8.51E+06	1.14E+05
	jul	9.26E+06	5.88E+04
	ago	8.93E+06	6.19E+04
	set	9.02E+06	3.71E+04
	out	9.59E+06	1.38E+05
	nov	9.34E+06	8.30E+04
	dez	9.19E+06	4.80E+04
2010	jan	9.08E+06	6.43E+04
	fev	8.38E+06	3.09E+04
	mar	9.02E+06	6.12E+04
	abr	8.43E+06	7.52E+04
	mai	8.81E+06	9.82E+04
	jun	8.74E+06	2.85E+04
	jul	9.21E+06	1.30E+05
	ago	9.26E+06	1.04E+04
	set	9.03E+06	7.09E+04
	out	9.24E+06	4.64E+04
	nov	8.72E+06	6.04E+04
	dez	8.34E+06	6.58E+04

ANEXO D

Quadro 33- Consumo de HFO e geração de borra (operação bicombustível)

Ano	Mês	Consumo de Combustível (kg)	Borra (kg)
2011	jan	8.48E+06	3.29E+04
	fev	7.40E+06	3.63E+04
	mar	6.74E+06	4.04E+04
	abr	4.65E+06	3.64E+04
	mai	4.26E+06	4.37E+04
	jun	3.98E+06	3.59E+04
	jul	2.47E+06	1.82E+04
	ago	1.51E+06	3.54E+04
	set	1.24E+06	6.25E+04
	out	1.44E+06	3.15E+04
	nov	1.48E+06	1.35E+04
	dez	1.07E+06	3.79E+04
2012	jan	1.35E+06	2.70E+04
	fev	1.07E+06	9.82E+03
	mar	1.27E+06	3.01E+04
	abr	1.45E+06	3.23E+04
	mai	1.71E+06	3.76E+04
	jun	2.16E+06	3.87E+04
	jul	1.88E+06	2.38E+04
	ago	1.05E+06	3.03E+04
	set	1.82E+06	1.86E+04
	out	2.95E+06	8.79E+03
	nov	1.40E+06	7.34E+04
	dez	1.12E+06	1.29E+04
2013	jan	4.27E+06	3.83E+04
	fev	2.30E+06	3.75E+04
	mar	1.96E+06	1.20E+04
	abr	1.97E+06	3.63E+04
	mai	1.95E+06	6.51E+04
	jun	1.92E+06	4.94E+04
	jul	1.97E+06	6.65E+04
	ago	2.82E+06	4.66E+04
	set	4.22E+06	3.78E+04
	out	3.92E+06	4.66E+04
	nov	7.40E+05	3.78E+04
	dez	8.51E+05	3.59E+04
2014	jan	2.29E+06	2.33E+04
	fev	1.55E+06	1.52E+04

	mar	8.68E+05	6.38E+04
	abr	1.06E+06	1.18E+04
	mai	9.90E+05	3.72E+04
	jun	7.98E+05	2.46E+04
	jul	7.17E+05	3.34E+04
	ago	9.88E+05	2.62E+04
	set	7.36E+05	2.61E+04
	out		
	nov		
	dez		