

AVALIAÇÃO DO REAL POTENCIAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂
EQUIVALENTE COM USO DA CAPTURA EM UMA UTE A CARVÃO

David Alves Castelo Branco

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador(es): Alexandre Salem Szklo
Roberto Schaeffer

Rio de Janeiro
Abril de 2012

AVALIAÇÃO DO REAL POTENCIAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂
EQUIVALENTE COM USO DA CAPTURA EM UMA UTE A CARVÃO

David Alves Castelo Branco

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof. Alessandra Magrini, D.Sc.

Prof. Rodolfo Dino, D.Sc.

Prof. Suzana Kahn Ribeiro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2012

Castelo Branco, David Alves

Avaliação do real potencial de redução das emissões de CO₂ equivalente com uso da captura em uma UTE a carvão/
David Alves Castelo Branco. - Rio de Janeiro: UFRJ/
COPPE, 2012.

XIII, 173 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Tese (doutorado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de
Planejamento Energético, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 145-157.

1. CCS. 2. CO₂ evitado. 3. ACV. I. Szklo, Alexandre
Salem *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

À minha filha, Luiza.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos professores Alexandre Szklo e Roberto Schaeffer, pela excelente orientação e pelos conselhos que contribuíram para a tese e para a minha formação profissional.

Agradeço especialmente ao professor Alexandre pelo exemplo de dedicação e de profissionalismo e pelos desafios, incentivos e pela sua confiança.

Aos professores Alessandra Magrini, Suzana Kahn e Rodolfo Dino por aceitarem fazer parte da banca examinadora desta tese.

Agradeço aos colegas e amigos do Cenergia, Régis Rathmann, Bruno Borba, Henrique Luz, Isabella Costa, Susanne Hoffmann, Paulo Merschmann, Pedro Rochedo, André Lucena, Larissa Nogueira, Maria Cecília de Moura, Diego Malagueta e Rafael Soria, pelas conversas que tivemos sobre os mais diferentes temas e por proporcionarem um ambiente favorável à produção acadêmica.

Aos funcionários do PPE, Sandra, Queila, Beatriz, Fernando e Paulo.

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudo.

Aos meus irmãos Leonardo e Cláudia pelo apoio nas horas difíceis. À minha mãe e ao meu pai por tudo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVALIAÇÃO DO REAL POTENCIAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ EQUIVALENTE COM USO DA CAPTURA EM UMA UTE A CARVÃO

David Alves Castelo Branco

Abril/2012

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Programa: Planejamento Energético

O uso da tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) gera uma penalidade energética para a UTE devido ao consumo direto de energia. Além do consumo direto, a utilização do CCS resulta em um aumento das emissões indiretas de CO₂ equivalente em processos fora das fronteiras da planta *per se*, tanto na forma de consumo de energia quanto na forma de vazamentos de processos. A contabilização dessas emissões indiretas é extremamente importante para a avaliação do benefício da tecnologia CCS em termos de emissões de CO₂ equivalente evitado. O estudo foi estruturado com base no método de análise de ciclo de vida (ACV). Foram realizadas as simulações de uma UTE a carvão existente no Brasil, com CCS e sem CCS. Na comparação entre as duas simulações, quando as emissões indiretas são consideradas, a quantidade de CO₂ evitado é reduzida. Os resultados obtidos mostram que uma UTE com 90% de captura de CO₂, na prática, evita 72% em CO₂ equivalente, quando utilizada a métrica GWP com o horizonte de 100 anos. Verificou-se que ocorre uma alteração no perfil das emissões da planta com CCS, que passa a emitir um percentual maior de metano, em relação à planta sem CCS. Devido à alteração do perfil de emissões, o horizonte de tempo ganha ainda mais importância para a estimativa do CO₂ evitado.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVALUATION OF THE REAL POTENTIAL TO REDUCE CO₂ EQUIVALENT
EMISSIONS USING CAPTURE IN A COAL FIRED UTE

David Alves Castelo Branco

April/2012

Advisors: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Department: Energy Planning

The carbon capture and sequestration (CCS) technology generates an energy penalty for coal-fired plants due to their direct energy consumption. In addition, the CCS results in an increase in terms of CO₂ equivalent in indirect processes beyond the borders of the plant. These emissions occur either in the form of energy consumption, or in the form of fugitive emissions. The accounting of these indirect emissions is important to assess the net benefits of CCS technology in terms of CO₂ equivalent emissions avoided. The study conducted a life cycle analysis (LCA) for a coal fire-thermal power plant in Brazil, with CCS and without CCS. Comparing the two simulations and considering indirect emissions, the amount of CO₂ avoided is reduced. Findings show that the plant with a capture of 90% of CO₂, in practice, avoid 72% in terms of CO₂ equivalent considering the GWP metric with the horizon of 100 years. It was verified that there is a change in the life cycle emission profile of the plant with CCS, which emits a higher percentage of methane. Due to the change of the emission profile, the time horizon becomes even more important for the estimation of CO₂ avoided.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	METODOLOGIA	7
2.1	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.....	9
2.1.1	Conceito de ACV.....	11
2.1.2	Definição do Objetivo e Escopo	15
2.1.3	Inventário do ciclo de vida (Life Cycle Inventory - LCI).....	16
2.1.4	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	32
2.1.5	Interpretação.....	38
2.2	O SOFTWARE CMLCA	42
2.3	O SOFTWARE IECM	44
3	ESTUDO DE CASO - TECNOLOGIAS DA UTE E DA PLANTA DE CAPTURA DE CO₂	46
3.1	UTE A CARVÃO SEM CAPTURA DE CO ₂	46
3.1.1	Ciclo a Vapor.....	47
3.1.2	Água de Arrefecimento.....	50
3.1.3	Redução e remoção de contaminantes	51
3.2	UTE A CARVÃO COM CAPTURA DE CO ₂	57
3.2.1	Penalidade Energética	59
3.2.2	Princípios da captura pós-combustão com absorção química.....	62
3.2.3	Componentes da planta de captura na pós-combustão.....	67
3.2.4	O Armazenamento do CO ₂	74
4	ESTUDO DE CASO – SIMULAÇÃO	76
4.1	OBJETIVO E ESCOPO.....	76
4.2	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (LCI).....	82
4.2.1	Produção de carvão	82
4.2.2	Transporte de carvão.....	90
4.2.3	Mineração de calcário e produção de cal	96
4.2.4	Transporte da cal.....	101
4.2.5	Unidade Termoelétrica (UTE)	103
4.2.6	Captura de CO ₂	109
4.2.7	Produção do solvente	110
4.2.8	Transporte do solvente	112
4.2.9	Transporte do solvente degradado.....	113
4.2.10	Produção da soda cáustica (NaOH)	114
4.2.11	Transporte da Soda Cáustica (NaOH)	116

4.2.12	Armazenamento de CO ₂	117
5	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	120
5.1	ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO	124
5.2	ANÁLISE DE PERTURBAÇÃO.....	127
5.3	HORIZONTE DE TEMPO E A MÉTRICA UTILIZADA	130
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	139
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
	ANEXO A – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO IECM.....	158
	ANEXO B – DADOS DAS SIMULAÇÕES NO CMLCA	166

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO GENÉRICA DO CICLO DE VIDA DE UM PRODUTO	14
FIGURA 2 – ESTRUTURA DA ACV	15
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DA ABORDAGEM HÍBRIDA EM CAMADAS	25
FIGURA 4- REPRESENTAÇÃO DA ABORDAGEM HÍBRIDA INTEGRADA	28
FIGURA 5 - ESQUEMA DA ETAPA DE LCA DESDE O INVENTÁRIO ATÉ AS CATEGORIAS <i>ENDPOINTS</i>	35
FIGURA 6 – ESQUEMAS CATEGORIAS DE IMPACTO E CARACTERIZAÇÃO PARA OS NÍVEIS DE	36
FIGURA 7 – ESTRUTURA DA TELA PRINCIPAL DO SOFTWARE CMLCA	43
FIGURA 8 - DIAGRAMA DE FASES DA ÁGUA	48
FIGURA 9 - DIAGRAMA T-S DO CICLO RANKINE SUPERCRÍTICO	49
FIGURA 10 - ESQUEMA TÍPICO DE UM SISTEMA DE ABSORÇÃO PARA A RECUPERAÇÃO DE CO ₂ DE GASES DE COMBUSTÃO	63
FIGURA 11 - PERFIL DE TEMPERATURA NO PROCESSO DE ABSORÇÃO QUÍMICA	70
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA PARA O CASO 1	78
FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA PARA O CASO 2	79
FIGURA 14 – ESTRUTURA DE UMA UNIDADE DE PROCESSO	82
FIGURA 15 - PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO DA MPX NA COLÔMBIA	84
FIGURA 16 – EFEITOS SOBRE AS MUDANÇAS NO NÍVEL DE TEMPERATURA CAUSADOS PELAS	135
FIGURA 17 - CONFIGURAÇÃO DA UTE - CASO 1	158
FIGURA 18 – DADOS DO CARVÃO - CASO 1	159
FIGURA 20 – DADOS DA CALDEIRA - CASO 1	159
FIGURA 21 – SISTEMA DO CONTROLE DE NOX - CASO 1	160
FIGURA 21 – SISTEMA DO CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO - CASO 1	160
FIGURA 22 – SISTEMA DO CONTROLE DE SO ₂ PARA - CASO 1	161
FIGURA 23 – SISTEMA DE ARREFECIMENTO - CASO 1	161
FIGURA 24 - CONFIGURAÇÃO DA UTE - CASO 2	162
FIGURA 25 – DADOS DO CARVÃO - CASO 2	162
FIGURA 26 – DADOS DA CALDEIRA DA UTE - CASO 2	163
FIGURA 27 – SISTEMA DO CONTROLE DE NOX - CASO 1	163
FIGURA 28 – SISTEMA DO CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO - CASO 2	164
FIGURA 29 – SISTEMA DE CAPTURA DE CO ₂ - CASO 2	164
FIGURA 30 – SISTEMA DE ARREFECIMENTO - CASO 2	165

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA A ETAPA DE LCI	30
TABELA 2 - APLICAÇÃO DAS CINCO ABORDAGENS NUMÉRICAS PARA A INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA	42
TABELA 3 - PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DA CALDEIRA NA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO MÁXIMA (MCR)	47
TABELA 4 - PENALIDADES ENERGÉTICAS E DE EFICIÊNCIA PARA A CAPTURA DE CARBONO PARA PLANTAS	61
TABELA 5 - PENALIDADES ENERGÉTICAS DE UM CASO PRÁTICO.....	62
TABELA 6 – PROCESSOS E PARÂMETROS UTILIZADOS NO SOFTWARE CMLCA PARA O CASO 1.....	81
TABELA 7 – PROCESSOS E PARÂMETROS UTILIZADOS NO SOFTWARE CMLCA PARA O CASO 2.....	81
TABELA 8 – CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO IMPORTADO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.....	83
TABELA 9 – FATORES DE EMISSÃO DO CH ₄	87
TABELA 10 - FATORES DE EMISSÃO DE CH ₄ PARA PÓS-MINERAÇÃO EM MINAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL....	88
TABELA 11 – FATORES DE EMISSÃO PARA FONTES <i>OFF-ROAD</i> E MAQUINÁRIO	89
TABELA 12 – DADOS DA ETAPA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO UTILIZADOS NO MODELO CMLCA	89
TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DO PORTO DO DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA	91
TABELA 14 - FROTA FERROVIÁRIA NECESSÁRIA PARA AS OPERAÇÕES DA EMPRESA.....	91
TABELA 15 – FATORES DE EMISSÕES PARA TRANSPORTE FERROVIÁRIO	92
TABELA 16 – DADOS PARA SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO.....	93
TABELA 17 – FATORES DE EMISSÃO (G/T DE COMBUSTÍVEL) PARA GEE.....	95
TABELA 18 – DADOS UTILIZADOS PARA O TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARVÃO	96
TABELA 19 – FATORES DE EMISSÕES PARA O TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARVÃO	96
TABELA 20 - CONSUMO DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE 1 M ³ DE CALCÁRIO	98
TABELA 21 - FATORES DE EMISSÃO PARA A MINERAÇÃO DE CALCÁRIO	99
TABELA 22 – DADOS PARA A PRODUÇÃO DA CAL	101
TABELA 23 - DISTÂNCIAS ATÉ A LOCALIDADE DA UTE – ITAQUI VIA RODOVIAS.....	102
TABELA 24 - DADOS UTILIZADOS NA ETAPA DE TRANSPORTE DA CAL	103
TABELA 25 - DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO CONSUMO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	103
TABELA 26 - FATORES DE EMISSÕES PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CAL.....	103
TABELA 27 - CARACTERÍSTICAS DA PLANTA SIMULADA	104
TABELA 28 - RESUMO DAS RESTRIÇÕES DE EMISSÕES.....	106
TABELA 29 – VOLUMES ESTIMADOS DE CONSUMO E DESCARTE DE ÁGUA.....	108
TABELA 30 - DADOS DO ABSORVEDOR	110
TABELA 31 – CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DOS PRINCIPAIS PRODUTOS DA PLANTA OXITENO (BA)	110
TABELA 32 - EMISSÕES RESULTANTES DA PRODUÇÃO DE 1 KG DE MEA.....	112
TABELA 33 - DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO CONSUMO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	113
TABELA 34 - FATORES DE EMISSÕES PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE SOLVENTE	113
TABELA 35 - DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO CONSUMO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	113
TABELA 36 - FATORES DE EMISSÕES PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE SOLVENTE DEGRADADO.....	114

TABELA 37 - DADOS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE NAOH UTILIZADOS NO MODELO CMLCA	116
TABELA 38 - FATORES DE EMISSÕES PARA O CONSUMO DE GÁS NATURAL NA PRODUÇÃO DE NAOH	116
TABELA 39 - DISTÂNCIAS ATÉ A LOCALIDADE DA UTE – ITAQUI VIA RODOVIAS	117
TABELA 40 - DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO CONSUMO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO	117
TABELA 41 - FATORES DE EMISSÕES PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE NAOH	117
TABELA 42 – FATORES DE CARACTERIZAÇÃO PARA A CATEGORIA (C6) AQUECIMENTO GLOBAL (GWP ₁₀₀)	121
TABELA 43 – CARACTERIZAÇÃO EM RELAÇÃO À CATEGORIA (C6) - AQUECIMENTO GLOBAL (GWP100)	122
TABELA 44 - RESULTADO DO INVENTÁRIO – PRODUTOS.....	123
TABELA 45 - RESULTADO DO INVENTÁRIO – FLUXOS ELEMENTARES.....	123
TABELA 46 – CONTRIBUIÇÃO DOS FLUXOS ELEMENTARES PARA AS EMISSÕES.....	124
TABELA 47 - CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS PARA AS EMISSÕES	125
TABELA 48 - CO ₂ EMITIDO, CAPTURADO E EVITADO NA UTE.....	126
TABELA 49 – MULTIPLICADORES EM RELAÇÃO À CATEGORIA AQUECIMENTO GLOBAL (C6) - CASO 1	128
TABELA 50 - MULTIPLICADORES EM RELAÇÃO À CATEGORIA AQUECIMENTO GLOBAL (C6) - CASO 2	129
TABELA 51 - EMISSÃO DE METANO POR PROCESSO, EM KG/A.....	132
TABELA 52 – VALORES DO GWP PARA CO ₂ , CH ₄ E N ₂ O PARA DIFERENTES HORIZONTES DE TEMPO	136
TABELA 53 - CO ₂ EQUIVALENTE (GWP ₁₀₀) EMITIDO, CAPTURADO E EVITADO NO SISTEMA COMPLETO.	136
TABELA 54 - CO ₂ EQUIVALENTE EMITIDO PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS.....	137
TABELA 55 – MATRIZ DE TECNOLOGIA DO CASO 1	166
TABELA 56 – DADOS DO PROCESSO [P1] PRODUÇÃO DE CARVÃO	166
TABELA 57 – DADOS DO PROCESSO [P2] TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARVÃO	167
TABELA 58 – DADOS DO PROCESSO [P3] TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARVÃO	167
TABELA 59 – DADOS DO PROCESSO [P4] MINERAÇÃO DE CALCÁRIO	167
TABELA 60 – DADOS DO PROCESSO [P5] PRODUÇÃO DA CAL	168
TABELA 61 – DADOS DO PROCESSO [P6] TRANSPORTE DA CAL	168
TABELA 62 – DADOS DO PROCESSO [P7] UTE SEM CCS.....	168
TABELA 63 – DADOS DO PROCESSO [P8] PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE	169
TABELA 64 – MATRIZ DE TECNOLOGIA DO CASO 2	169
TABELA 65 – DADOS DO PROCESSO [P1] PRODUÇÃO DE CARVÃO	169
TABELA 66 – DADOS DO PROCESSO [P2] TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARVÃO	170
TABELA 67 – DADOS DO PROCESSO [P3] TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARVÃO	170
TABELA 68 – DADOS DO PROCESSO [P4] MINERAÇÃO DE CALCÁRIO	170
TABELA 69 – DADOS DO PROCESSO [P5] PRODUÇÃO DA CAL	171
TABELA 70 – DADOS DO PROCESSO [P6] TRANSPORTE DA CAL	171
TABELA 71 – DADOS DO PROCESSO [P7] UTE COM CCS	171
TABELA 72 – DADOS DO PROCESSO [P8] PRODUÇÃO DO SOLVENTE	172
TABELA 73 – DADOS DO PROCESSO [P9] TRANSPORTE DO SOLVENTE	172
TABELA 74 – DADOS DO PROCESSO [P10] TRANSPORTE DE NAOH	173

TABELA 75 – DADOS DO PROCESSO [P11] PRODUÇÃO DE NaOH.....	173
TABELA 76 – DADOS DO PROCESSO [P12] PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE	173

1 Introdução

O foco dado às mudanças climáticas não está mais à procura de um consenso, entre as partes envolvidas (cientistas, tomadores de decisão, políticos e líderes empresariais), de que uma ação conjunta será necessária para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A discussão procura soluções práticas sobre o melhor caminho, o seu custo, tempo de implantação e capacidade de redução de emissões (CREYTS *et al.*, 2007; KIRCHGESSNER *et al.*, 2000).

A geração elétrica em muitas grandes economias, incluindo os EUA, baseia-se fortemente em energia elétrica gerada por combustíveis fósseis, especialmente o carvão mineral. Os combustíveis fósseis representam 62% da geração de energia elétrica mundial, sendo que o carvão é o combustível com a maior participação. Aproximadamente 42% da produção mundial de energia elétrica são obtidas com termelétricas a carvão e é provável que o carvão se mantenha como um componente chave do mix de combustíveis para geração de energia para atender a demanda de eletricidade, especialmente a demanda crescente nos países em desenvolvimento (IEA, 2010a).¹

No caso do Brasil, onde a maior parte de geração de energia elétrica é obtida por meio de hidrelétricas, o sistema de geração nacional também vem passando por mudanças em sua configuração.² O aumento das restrições ambientais e a diminuição da capacidade de armazenamento de energia nos reservatórios das usinas hidrelétricas têm levado a um aumento do uso de outras formas de fontes para a manutenção de sua energia firme. Assim, a geração em termelétricas, que podem utilizar combustíveis fósseis ou energia nuclear, terá uma participação inevitável (EPE, 2012).

Na ausência de políticas energéticas ou restrições ambientais para as futuras instalações a combustíveis fósseis, estimativas baseadas nas emissões de 2005 indicam que as emissões do setor de energia deverão crescer 130% até 2050 (IEA, 2008).

Diante desse cenário, muitas economias apostam no desenvolvimento de tecnologias inovadoras de carvão que visam à redução de emissões de CO₂, através do aumento de eficiência dos processos e da adição de sistemas de captura de

¹ Por exemplo, a China, gera aproximadamente 80 % do total da sua energia elétrica à base do carvão. Na Índia a participação do carvão representa 69%, na Alemanha representa 44%, nos Estados Unidos representa 45%, na África do Sul representa 93% e na Austrália representa 76% (IEA, 2011).

² Dados detalhados sobre as usinas em operação no Brasil podem ser encontradas no Banco de Informações de Geração – BIG (ANEEL, 2011).

armazenamento de carbono (*Carbon Capture and Storage – CCS*). Especialmente o CCS é visto como uma solução para mitigação de emissões, que pode ser empregada em grande escala e em diversas indústrias, incluindo termoelétricas a carvão (IEA, 2007; MCKINSEY&COMPANY, 2009; SOCOLOW; PACALA, 2006)

Sistemas de captura de armazenamento de carbono separam o CO₂ durante o processo de conversão do combustível, o comprimem e transportam para locais onde é armazenado de modo estável, por exemplo, em formações geológicas adequadas. Tecnologias de captura e armazenamento já são aplicadas em diferentes indústrias (IPCC, 2005). Para aplicações específicas em termelétricas, diferentes rotas se encontram em fase de desenvolvimento. Contudo, até o momento da realização deste estudo, nenhuma delas vem sendo aplicada em escala comercial (ROCHEDO, 2011).

Paradoxalmente, esta tecnologia aumenta as emissões absolutas de carbono da planta. A captura e o armazenamento de CO₂ necessitam de uma quantidade considerável de energia, que será fornecida, na quase totalidade dos casos, com a utilização de combustíveis fósseis (SPRENG *et al.*, 2007).

O uso de uma parcela da energia no processo de captura faz com que os valores de CO₂ capturado e de CO₂ evitado sejam diferentes. Para uma UTE com captura de CO₂ o valor capturado é expresso pelo percentual de captura do CO₂ emitido.³ No entanto, o uso da tecnologia de captura de CO₂ reduz a eficiência térmica da UTE, aumentando a emissão de CO₂ para a mesma energia gerada (PAGE *et al.*, 2009). A quantidade de CO₂ evitado é a diferença das emissões de CO₂ por kWh fornecido pela UTE com captura de CO₂, em comparação com as emissões de uma UTE que não possui a captura de CO₂, ou seja, a planta que serve de linha de base. Por esta razão, quando plantas com a mesma tecnologia de geração de energia são comparadas, a quantidade de emissões evitadas são inferiores aos montantes capturados.⁴

Além do consumo direto de energia na operação da planta de captura, que resulta em uma penalidade energética para a UTE, a utilização da tecnologia CCS resulta em um aumento das emissões indiretas de CO₂ equivalente em processos fora das fronteiras da planta *per se*, tanto na forma de consumo de energia quanto na forma de vazamentos de processos. As emissões indiretas dependem de diversos fatores

³ Por exemplo, o valor do percentual de captura da planta utilizada nas simulações deste estudo é igual a 90%.

⁴ Em alguns casos, nos quais não é realizado o *retrofitting*, as plantas com captura de CO₂ podem deslocar, ou seja, substituir plantas antigas e ineficientes o que aumentaria a quantidade de CO₂ evitado (IEA, 2007).

como, por exemplo, a distância do sumidouro de carbono, a quantidade e a qualidade do carvão utilizado, a produção e disposição de produtos químicos. Por esta razão, uma análise completa do serviço de geração de energia é fundamental para que as emissões indiretas sejam estimadas.

Neste estudo partiu-se da hipótese de que a contabilização das emissões de processos indiretos é extremamente importante para a avaliação do benefício líquido da tecnologia CCS em termos de emissões de CO₂ equivalente evitado.

Com o objetivo de testar esta hipótese, contabilizaram-se as emissões totais da cadeia do CCS e mensurou-se como as emissões indiretas estão distribuídas nos processos ao longo da cadeia do CCS, a partir da aplicação da metodologia de análise de ciclo de vida (ACV). Assim, o principal objetivo desta tese é estimar a contribuição da tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) em uma UTE a carvão para a redução da emissão de gases de efeito estufa.

O método de ACV pode ser definido como a elaboração e avaliação dos fluxos de material e de energia, bem como os potenciais impactos ambientais destes ao longo do ciclo de vida de um produto. O ciclo de vida inclui várias fases, desde a extração de matérias-primas para o produto e para os materiais e equipamentos auxiliares, por meio da produção e utilização do produto, até o seu transporte de materiais e equipamentos auxiliares, se houver, até a etapa de gestão dos resíduos finais, que inclui a eliminação, bem como a reciclagem. O termo produto inclui tanto bens como serviços (EKVALL, TOMAS; FINNVEDEN, 2001; FINNVEDEN *et al.*, 2009; ISO14040, 1997).

Alguns estudos⁵ que utilizam o método de análise de ciclo de vida a tecnologia CCS estão disponíveis na literatura científica. Esta tese aplica o método de ACV em um estudo de caso que considera o *retrofitting*⁶ para CCS em uma UTE a carvão existente, localizada no Brasil. No entanto, esta tese analisa os resultados obtidos na ACV sob o ponto de vista do horizonte de tempo adotado para a obtenção dos fatores de caracterização relativos ao aquecimento global. Esta abordagem é original na medida em que ainda não foi utilizada por outros estudos sobre esse assunto.

A realização de uma análise de ciclo de vida exige a aquisição de uma grande quantidade de dados. Por esse motivo, a etapa de inventário, que aqui será tratada no

⁵ Por exemplo, KOORNNEEF *et al.* (2008), JAMES *et al.* (2010), HERTWICH *et al.* (2008), DRAUKER *et al.*, (2010), ODEH; COCKERILL (2008), PEHNT; HENKEL (2009) e SPATH *et al.*(1999).

⁶ O termo *retrofitting* representa adaptação da planta existente para a introdução de uma nova unidade de processamento, como no caso da introdução de uma unidade de captura.

capítulo 2, foi a etapa mais intensiva em trabalho e tempo durante a realização da tese. Existem diversas bases de dados, que na maioria das vezes são oferecidas em conjunto com determinados *softwares* de ACV, bancos de dados públicos nacionais ou regionais, da indústria e também de consultores. No entanto, no Brasil dados com esta finalidade ainda não são tão comuns ou disponíveis. Este desafio foi contornado neste estudo utilizando-se as metodologias do IPCC para inventário de emissões de gases de efeito estufa.

A consideração do tempo na ACV é fundamental na avaliação das medidas de mitigação e nas métricas utilizadas. Segundo PETERS *et al.*, (2011), dois aspectos devem ser considerados sobre o tempo: o momento no qual ocorrem as emissões e os impactos e a seleção do horizonte de tempo que será utilizado para a comparação dos impactos climáticos. No entanto, considerar o tempo nos estudos de ACV não é uma prática comum.

Assim, a seleção do horizonte de tempo utilizado equivale a dar um peso ao tempo e é uma das partes mais críticas do processo de contabilidade do carbono emitido. Sendo assim, quanto mais curto o horizonte de tempo, maior a importância dada aos impactos mais próximos no tempo, porque os impactos que ocorrem depois do limite escolhido não são considerados.⁷ A maioria dos métodos de ACV utiliza a métrica GWP₁₀₀. No entanto, o uso de um horizonte de tempo fixo para a análise de um estudo de ACV gera inconsistências entre o horizonte de tempo escolhido para a análise e o período de tempo considerado nos resultados, especialmente para produtos ou projetos com vida longa (LEVASSEUR *et al.*, 2010).

Além do objetivo principal da tese, apresentado anteriormente, a realização da ACV do CCS também se justifica porque pode servir de base para análises futuras visando comparar UTEs com CCS às alternativas capital-intensivas como plantas termonucleares, cuja expansão no Brasil se dá não através de leilões, mas sob a justificativa do caráter estratégico da tecnologia. Esta justificativa poderia ensejar

⁷ Os gases de efeito estufa influenciados pelas atividades humanas são o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), seguidos pelos clorofluorcarbonetos (CFC). Neste estudo serão utilizados o CO₂, CH₄ e o N₂O. O gás de efeito estufa mais importante para o aquecimento global é o vapor de água, mas a sua concentração na atmosfera não é influenciada significativamente pelas emissões diretas provenientes de atividades humanas. O volume de CO₂ emitido está associado em grande parte à queima de combustíveis fósseis o que resulta em um esforço político global para a redução dessas emissões (IPCC, 2007).

investimentos também em plantas termoelétricas a carvão com CCS, desde que fundamentadas em uma metodologia, por exemplo, em uma ACV.⁸

Os resultados obtidos na ACV ainda poderão auxiliar decisões sobre investimentos realizados na expansão do setor de geração elétrica no Brasil. Por exemplo, decisões de investimento em plantas CCS *ready*,⁹ que contemplam a tecnologia CCS no futuro, ou em investimento em plantas que utilizem ciclos de maior eficiência. Os resultados também poderão auxiliar no cálculo mais preciso do custo marginal de abatimento, levando-se em consideração outras variáveis como, por exemplo, os custos indiretos e emissões indiretas da tecnologia.¹⁰

Ao adotar metas de redução de CO₂, o Brasil sinalizou o seu comprometimento do país com a redução de emissões no curto prazo, o que pode fazer com que o CCS ganhe força como opção para a redução de emissões de CO₂ no país.

Finalmente, a inclusão do CCS como atividade para projetos MDL¹¹ e o fato do Brasil possuir um grande potencial para o armazenamento de CO₂, segundo o Projeto *Carbmap Brazil*, podem incentivar o uso de CCS no Brasil (COSTA, 2009).¹²

Esta tese está dividida em cinco 5 capítulos além da introdução, que analisam o CO₂ capturado versus CO₂ equivalente evitado em termelétricas a carvão com captura e armazenamento de CO₂.

⁸ De fato, a energia nuclear voltou a ser considerada como uma das soluções para redução das emissões de CO₂ para a atmosfera (WNA, 2012). No entanto, a sua utilização pode gerar consequência graves ao meio ambiente caso ocorra algum acidente, apesar do pequeno risco de acidentes que a tecnologia apresenta. Por exemplo, podemos citar o acidente que envolveu a usina de Fukushima, no Japão. Além disso, ainda não foi encontrada uma solução definitiva para a disposição dos resíduos gerados durante a sua vida.

⁹ Existe a possibilidade de que o setor elétrico mundial exija requisitos mínimos para novas termoelétricas, visando viabilizar a adição da captura no futuro. As plantas que atendam a estes requisitos mínimos estão sendo chamadas de plantas "*ready*". Por exemplo, exigências "*ready*" mínimas seriam o espaço disponível para os equipamentos de captura e a previsão do aumento do consumo de utilidades (ROCHEDO, 2011).

¹⁰ A lógica da análise sob a ótica da análise de ciclo de vida tem sido utilizada em outras áreas como, por exemplo, a análise de opções de mitigação baseadas no uso de biocombustíveis. Ver ADVANCED BIOFUELS USA (2012); BENOIST *et al.* (2012); CBES (2009); KENDALL; CHANG (2009); MELAMU; BLOTTNITZ, VON (2011).

¹¹ A consideração da inclusão do CCS em formações geológicas como atividades para projetos de MDL tem sido considerada desde 2005, mas somente na última Conferência das Partes - COP17, o CCS passou a ser elegível para o MDL (UNFCCC, 2011). A COP17 (*Seventeenth session of the Conference of the Parties*) ocorreu durante a *United Nations Climate Change Conference 2011*, em Durban, na África do Sul, no período de 28 de Novembro a 09 de Dezembro de 2011 (UNFCCC, 2012).

¹² O potencial de armazenamento não necessariamente é visto como um ponto positivo, uma vez que pode gerar questionamentos sobre o risco que o Brasil estaria assumindo se em algum momento decidisse receber o CO₂ de outros países. Mais informações sobre o projeto *Carbmap Brazil* podem ser obtidas em PUCRS (2011) e ROCKETT *et al.* (2011).

O segundo capítulo apresenta a metodologia utilizada. Neste capítulo são descritos o conceito e as etapas de uma análise do ciclo de vida (ACV) e as duas ferramentas computacionais utilizadas: o software CMLCA, utilizado para a realização da ACV; e o software IECM, utilizado nas simulações dos processos da UTE e da planta de captura.

O terceiro capítulo inicia o estudo de caso, com a descrição das tecnologias da UTE e da planta de captura. Para tal, caracteriza os principais processos de uma UTE sem captura e os principais processos de uma UTE com captura.

O quarto capítulo apresenta o objetivo e escopo do estudo e os dados do inventário do ciclo de vida. O inventário foi dividido em 12 processos: produção e transporte de carvão, mineração de calcário, e produção e transporte da cal, a UTE e a captura de CO₂, produção e transporte de solvente, transporte de solvente degradado, produção e transporte da soda cáustica e armazenamento de CO₂.

O quinto capítulo apresenta a interpretação dos dados obtidos na etapa de inventário. Na interpretação é realizada a análise de contribuição, análise de perturbação e uma discussão sobre a importância do horizonte de tempo na métrica utilizada.

Finalmente, o sexto capítulo apresenta as principais conclusões e algumas recomendações para estudos futuros, que derivam de forma direta ou indireta deste estudo.

2 Metodologia

Neste estudo partiu-se da hipótese que a utilização da tecnologia CCS leva a um consumo indireto significativo de energia, por meio de emissões em etapas fora das fronteiras da UTE *per se*. A contabilização dessas emissões levará, portanto, a uma redução do percentual do carbono evitado, em termos de redução de emissões de CO₂ equivalente, que é atribuído à planta de captura pós-combustão.

Para viabilizar esta análise, foram modeladas as etapas do ciclo de vida de duas configurações de plantas térmicas a carvão. A primeira configuração (caso 1), que servirá como linha de base para a comparação, não utiliza a tecnologia de captura, enquanto que a segunda configuração (caso 2) utilizará uma planta de captura. O estudo de caso foi estruturado com base em uma UTE real (item 4.2.5). No entanto, os dados de processo dessa planta não estão disponíveis publicamente. Por esta razão, as simulações dos processos referentes serão realizadas com o auxílio do modelo IECM (item 2.2) e de dados obtidos na literatura científica.

A utilização da tecnologia CCS será tratada como um caso de *retrofitting*. A escolha da configuração pós-combustão para o *retrofitting* tomou como base os resultados obtidos em outros estudos sobre o tema (item 3.2).¹³

Para testar a hipótese utilizou-se a metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV), que possui quatro etapas, sendo que a etapa de inventário exigiu um grande esforço devido à necessidade de levantamento e manipulação de uma grande quantidade de dados.

Neste estudo optou-se pela utilização do software CMLCA que permite a utilização da notação matricial do sistema estudado. A escolha da notação matricial e do software tomou como base a possibilidade da continuidade deste estudo utilizando-se o método híbrido para a etapa de inventário.

Com o objetivo de facilitar a obtenção de dados para a etapa de inventário, diversas bases de dados são geralmente oferecidas em conjunto com determinados *softwares* de ACV. Mas em quase todos os casos essas bases de dados representam sistemas de produtos de outros países, especialmente EUA e países europeus.

¹³ Por exemplo, KOORNNEEF *et al.* (2008), JAMES *et al.* (2010), HERTWICH *et al.* (2008), DRAUKER *et al.*, (2010), ODEH; COCKERILL (2008), PEHNT; HENKEL (2009) e SPATH *et al.*(1999).

O *software* CMLCA não é disponibilizado com banco de dados de processos e por esse motivo nesta tese considerou-se inicialmente o uso de dados de entrada e saída de produtos e fluxos elementares obtidos em outros estudos de ACV sobre UTEs a carvão, que por sua vez utilizavam dados obtidos nos bancos de dados disponibilizados com os *softwares* utilizados nos respectivos estudos.

A análise de inventário, assim como as outras fases de uma ACV, é um processo iterativo. À medida que aumenta o conhecimento sobre o sistema que está sendo estudado, como consequência do crescente número de dados coletados para a análise e das primeiras simulações, novos requisitos ou limitações podem ser identificados. Pode surgir a necessidade de mudança nos procedimentos de coleta de dados para que os objetivos do estudo ainda sejam alcançados. Também podem ser identificadas questões que levem a revisões no objetivo ou no escopo do estudo.

Nas primeiras simulações também foram incluídos outros gases como o monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxido de nitrogênio (NO_x), componentes voláteis (COV), material particulado (MP), além do mercúrio (Hg) e da amônia (NH₃). No entanto, tomou-se a decisão de retirá-los da análise porque o objetivo principal do estudo é comparar o CO₂ capturado com o CO₂ equivalente evitado. Os gases excluídos causam impactos de natureza distinta ao meio ambiente. Enquanto os GEE estão associados aos impactos de natureza global, os poluentes regulados estão associados aos impactos de ordem local. A relevância dos poluentes controlados está associada com as características do local onde a emissão ocorre, ou seja, ao nível de saturação de determinada região a cada tipo de emissão atmosférica. Geralmente estes poluentes possuem limites de emissão estabelecidos na legislação local. Seria interessante incluir novos poluentes em estudos futuros, mas a falta de dados para todos os processos poderia gerar “falsos positivos” durante a análise de contribuição. Ou seja, poderia ser creditado a um determinado processo uma contribuição para as emissões de um determinado poluente, pelo simples fato do desconhecimento das emissões desse poluente pelos outros processos. Assim, foram considerados apenas os três principais gases de efeito estufa.

Ao longo do estudo os fatores de emissões obtidos de outros estudos foram substituídos pelos fatores disponibilizados pelo IPCC para os respectivos processos. Após a alteração observou-se que os resultados das simulações não sofreram variação significativa e por este motivo os valores do IPCC foram mantidos.

Outras simplificações foram realizadas ao longo do estudo. Alguns processos foram retirados do sistema, por exemplo, o processo que representava a etapa de transporte do carvão por esteira. As primeiras simulações confirmaram a irrelevância desse processo para o resultado final do inventário. Inicialmente a simulação também detalhava os principais processos da UTE, por exemplo, sistema de controle de NOx, particulado e SOx, entre outros. No entanto, ao longo das primeiras simulações ficou evidente que o detalhamento da UTE aumentava muito o trabalho, mas sem agregar precisão ao resultado. Assim, optou-se pela simulação da UTE sem captura e da UTE com captura como um único processo chamado de “caixa preta” (*black box process*).

O objetivo deste capítulo é descrever a metodologia de ACV e as duas ferramentas computacionais utilizadas. Inicialmente serão discutidos aspectos da metodologia de ACV, por exemplo, o seu conceito, as suas fases, tipos de inventário e ferramentas computacionais disponíveis. Em seguida será descrito o software CMLCA, que permite a realização de diferentes tipos de análises referentes à metodologia de ACV. Ao final do capítulo, será descrito o *software* IECM, que é a ferramenta utilizada na simulação dos processos da UTE, que serão descritos no capítulo de estudo de caso.

2.1 Análise do Ciclo de Vida

Os processos de uma cadeia demandam entradas e produzem saídas de material e energia. Além da entrada de energia na sua forma direta, as entradas de material, ou seja, os insumos utilizados, também possuem certa quantidade de energia incorporada. Neste caso, essa parcela de energia incorporada aos insumos do processo representa a entrada de energia de uma forma indireta (SPRENG, 1988).

Visando possibilitar o estudo do fluxo de energia pelas complexas cadeias de processos, que transformam e dissipam energia com o objetivo de aumentar a qualidade da energia final, alguns processos ou conjunto de processos são isolados, criando cadeias simplificadas com início e fim definidos. O uso de cadeias simplificadas também permite um melhor entendimento de quão eficientemente esta energia está sendo utilizada e como a eficiência pode ser melhorada (SPRENG, 1988).

Nos sistemas industriais os fluxos de energia e materiais são aparentemente intuitivos. Alguns fluxos de energia podem ser bem definidos com acurácia e detalhamento, especialmente se eles puderem ser identificados como fluxos energéticos

e se apresentarem valor monetário. No entanto, outros fluxos energéticos não são tão evidentes (SPRENG, 1988).¹⁴

Ainda segundo SPRENG (1998), a análise energética apresenta problemas como definição das fronteiras do estudo e a presença de produtos conjuntos.

Quando em uma atividade são produzidos mais de um produto, a energia utilizada na atividade pode ser atribuída a esses produtos por diferentes métodos. No entanto, não existe um modo unívoco para atribuir esse consumo energético ao produto, o que gera uma arbitrariedade na contabilidade energética.

A análise de um sistema de energia deve ser aplicada no contexto de uma combinação específica de capacidades e práticas industriais, mas esse *mix* está em constante mudança. Por exemplo, pode haver diferenças no consumo de energia para a produção do mesmo produto entre diferentes plantas industriais localizadas em um mesmo país, assim como diferenças nas médias de consumo energético na produção, dos mesmos produtos padrões, entre países diferentes. Em um sistema ideal os processos de produção ocorreriam sem perdas ou dissipação de energia, no entanto, nos sistemas reais todo processo envolve irreversibilidade e uma diversidade de rejeitos para o meio ambiente.

Nesse contexto, onde a análise energética contabiliza a entrada e saída de fluxos energéticos nos sistemas industriais, surge o conceito da análise do produto em uma perspectiva de análise do seu ciclo de vida completo. O conceito de ciclo de vida, que surge com o objetivo de racionalizar os gastos energéticos, evolui para um conceito mais abrangente, chamado de análise de ciclo de vida (ACV), integrando os impactos ambientais causados pelos processos.

O interesse crescente pela ACV na década de 1990 pode ser observado pelo crescimento no número de publicações científicas sobre este tema e uma grande expectativa em relação à utilização dessa ferramenta nesta década (FINNVEDEN *et al.*, 2009).¹⁵

¹⁴ Neste caso, a utilização da análise econômica é de grande utilidade porque fornece grande parte da informação da contabilidade energética. Os custos das entradas incluem os custos de todos os requisitos diretos e indiretos de energia na forma comercial e ainda contém os custos de mão de obra, capital, uso da terra insumos e outras *utilities*, além da energia. Se o custo das entradas é menor que o preço da energia de saída, então o sistema tem que ser um produtor líquido de energia comercial (SPRENG, 1988).

¹⁵ O desenvolvimento e a harmonização das metodologias resultaram na norma internacional ISO14040, assim como na publicação de diversos guias e livros texto sobre o assunto. Isso aumentou a maturidade e solidez metodológica da ACV, que ainda hoje se encontra em fase de desenvolvimento. Entre as iniciativas internacionais em curso para ajudar a construir um consenso e fornecer recomendações para a aplicação da ACV estão: a *Life Cycle Initiative of United Nations Environment Program* (UNEP), a

Embora análises de ciclo de vida detalhadas sejam necessárias em alguns casos, em geral abordagens que possam ser utilizadas de forma mais eficiente são necessárias para transformar a ACV baseada em uma abordagem acadêmica para uma ACV que será utilizada como uma ferramenta de gestão (REBITZER, GERALD; BUXMANN, 2005).¹⁶

Uma vez definido o contexto no qual surgiu a ACV, serão apresentados o seu conceito, seu objetivo, as suas diferentes fases, premissas, limitações, assim como os tipos de ACV e as metodologias disponíveis para a etapa de inventário. A descrição das metodologias permitirá uma visão mais adequada das metodologias que podem ser escolhidas para um estudo futuro mais detalhado, uma vez que as diferentes metodologias podem gerar resultados com diferenças significativas.

2.1.1 Conceito de ACV

A análise do ciclo de vida (ACV) pode ser definida como a elaboração e avaliação dos fluxos de material e de energia, bem como os potenciais impactos ambientais destes ao longo do ciclo de vida de um produto. O ciclo de vida de um produto inclui diversas fases, desde a extração de matérias-primas para a fabricação do produto e fabricação dos materiais e equipamentos auxiliares, a produção e utilização do produto propriamente dito, o transporte de materiais e equipamentos auxiliares, até a etapa de gestão dos resíduos finais, que inclui a eliminação, bem como a reciclagem. O termo produto inclui tanto bens como serviços (EKVALL, FINNVEDEN, 2001; FINNVEDEN *et al.*, 2009; ISO14040, 1997).

O principal objetivo da ACV é a avaliação dos impactos ambientais. Apesar de ser possível combinar com outras metodologias, a ACV *per se* não considera outros tipos de impactos, por exemplo, análise de custos, riscos ou segurança (GUINÉE *et al.*, 2002).¹⁷

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), a Plataforma Europeia para ACV da Comissão Europeia e o *International Reference Life Cycle Data System* - ILCD (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

¹⁶ Vale ressaltar que a ACV é apenas uma das técnicas de gestão ambiental que estão disponíveis. Existem outras técnicas como, por exemplo, a Avaliação de Desempenho Ambiental, a Avaliação de Risco, a Auditoria Ambiental e a Avaliação de Impacto Ambiental. Portanto, esta técnica pode ser a mais apropriada apenas em determinados casos (NBR/ISO 14040, 2001).

¹⁷ Por exemplo, uma ACV pode ser combinada com uma análise de custo (*Life Cycle Costing* - LCC).

Esse método pode ser aplicado a qualquer tipo de produto e a qualquer decisão onde os impactos ambientais do ciclo de vida completo ou parte do ciclo de vida constituem o interesse final do estudo.¹⁸

Vale ressaltar que a principal ideia do método é avaliar a função que está associada a determinado produto. Portanto, a ACV tem como propósito compilar e avaliar as consequências ambientais para diferentes opções para o fornecimento ou cumprimento de determinada função (GUINÉE *et al.*, 2002).

Funções são serviços que estão relacionados a objetos materiais, chamados de bens ou produtos. Certas funções envolvem produtos materiais que estão intimamente relacionados à função potencial que eles preenchem (GUINÉE *et al.*, 2002).

Um dos pontos importante na análise de ciclo de vida diz respeito ao horizonte de tempo da análise e o horizonte de tempo dos seus efeitos. O horizonte de tempo que envolve a decisão tomada na análise de ciclo de vida é relativamente curto. No entanto, o horizonte temporal dos efeitos dessa decisão pode ser significativamente maior que o horizonte de tempo da decisão.

Uma ACV pode tratar de escolhas ocasionais, ou seja, escolhas que envolvem um curto espaço de tempo. No entanto, quando estas escolhas são repetidas com frequência podem ter efeitos em um horizonte de tempo maior que o horizonte de tempo da decisão (GUINÉE *et al.*, 2002).¹⁹

As escolhas também podem ser do tipo estrutural, quando se referem a escolhas feitas por indivíduos ou empresas que afetam a sociedade de uma forma limitada e reversível. Neste caso o horizonte de tempo pode ser longo. O contexto que serve de base para as decisões tomadas em termos de instalações necessárias é dado no curto prazo, mas as restrições são facilitadas a cada ano, como investimentos e desgaste alteraram as capacidades das várias tecnologias instaladas. A principal característica neste caso é que a escolha é reversível (GUINÉE *et al.*, 2002).²⁰

¹⁸ *A priori* a ACV é restrita a consequências ambientais. A inclusão da análise de depleção de recursos pode ser controversa, porque alguns autores consideram isso um problema apenas econômico. Outros aspectos como efeitos dos custos, desemprego, consequências sociais, como violação dos direitos humanos, entre outros, são excluídos, não pela importância que estes possuem, mas pelo fato de que uma ACV procura focar somente na análise ambiental (GUINÉE *et al.*, 2002).

¹⁹ Um exemplo, relacionado a este estudo seria a escolha do transporte de determinado produto pelo modal de transporte rodoviário. Esta escolha pode fazer com que haja um aumento do fluxo de veículos em uma determinada estrada e conseqüentemente haja uma redução no tempo para que a estrada passe por manutenção.

²⁰ Um exemplo, relacionado a este estudo seria o aumento do consumo de cal da UTE com CCS. Neste caso os fornecedores da cal podem vir a fazer investimentos na produção, por exemplo, no tipo de forno ou processo utilizado.

O último tipo de escolha são as estratégicas, que se referem às escolhas de indivíduos, empresas e governos em torno das decisões que afetam a sociedade de forma substancial e praticamente irreversível.²¹

O horizonte de tempo das atividades envolvidas no processamento da função é maior para as escolhas estratégicas do que para escolhas ocasionais. Escolhas estruturais têm um horizonte de tempo semelhantes ou mais limitado que as escolhas estratégicas (GUINÉE *et al.*, 2002). Sobre os efeitos na cadeia, pode-se novamente optar por considerar um período mais curto ou mais longo.

Uma ACV geralmente tem o caráter quantitativo, no entanto, quando não é possível, aspectos qualitativos podem e devem ser levados em consideração com o objetivo de se conseguir a análise mais completa possível os impactos ambientais (GUINÉE *et al.*, 2002).

Em relação a sua completude, uma ACV pode ser detalhada ou simplificada. O objetivo e escopo, o nível de detalhe requerido, o nível de incerteza que se deseja obter e a disponibilidade de recursos para o estudo são considerados na escolha de diferentes estratégias para a simplificação de uma ACV. A quantidade de esforço necessário para conduzir uma ACV detalhada não corresponde necessariamente a um benefício em seus resultados (REBITZER, G *et al.*, 2004).

A metodologia de ACV pode ser utilizada para diversas finalidades. Segundo (TILLMAN, 2000), a metodologia pode ser utilizada para a identificação de oportunidades visando melhorar os aspectos ambientais dos produtos, na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais, na seleção de indicadores de desempenho ambiental (incluindo técnicas de medição) e no *marketing*.²²

A ACV tem implicações na tomada de decisão, porque todas as suas aplicações visam uma mudança e/ou melhoria, sendo alguns de forma mais direta e algumas de forma indireta. A influência entre a ACV e a tomada de decisão é recíproca. Portanto, a tomada de decisão também gera implicações para a ACV. Por exemplo, a forma como o sistema será modelado depende da finalidade do estudo (TILLMAN, 2000).

²¹ A utilização da tecnologia CCS estende o período durante o qual o CO₂ será emitido, uma vez que permite uma extensão do uso de combustíveis fósseis. Este período está relacionado com o tempo de armazenagem estimado em depósitos geológicos. Assim, o CCS pode propiciar um alívio rápido e temporário para as emissões, mas pode tornar a humanidade ainda mais dependente dos combustíveis fósseis e tornar uma mudança mais tarde ainda mais difícil (SPRENG *et al.*, 2007).

²² Por exemplo, em um programa de rotulagem ecológica ou certificação ambiental de produto.

A ACV apresenta diversas limitações, entre elas estão: a natureza das decisões e as escolhas utilizadas. Por exemplo, a escolha das fronteiras do estudo, que pode ser subjetiva.

O alcance da ACV também deve ser observado, porque uma análise que utilize e estude condições locais pode não ser representativa para questões globais ou de outra região, ou vice-versa. Ainda, a falta de acessibilidade, qualidade, delimitação espacial e temporal podem limitar a ACV, introduzindo incertezas nos resultados obtidos sobre os impactos (NBR/ISO 14040, 2001).

A Figura 1 mostra um esquema simplificado do ciclo de vida de um produto que inclui *loops* entre diferentes fases da vida do produto.

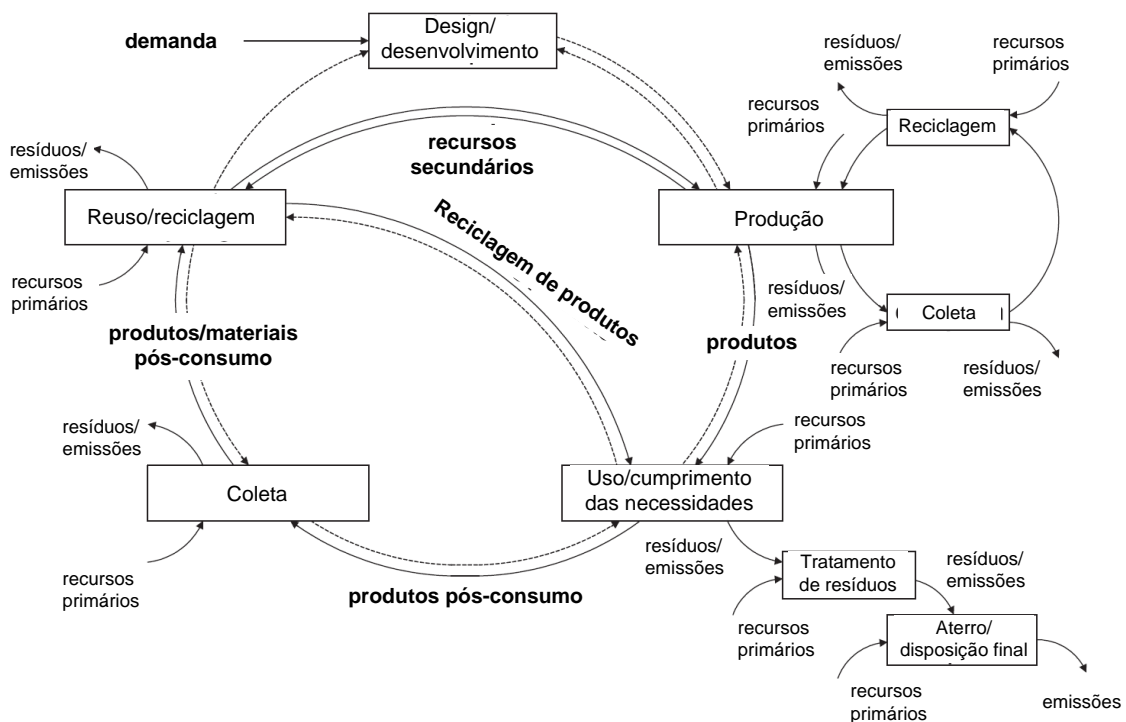


Figura 1 – Representação genérica do ciclo de vida de um produto
 Fonte: Adaptado de REBITZER *et al.* (2004)

Vale lembrar que não existe um método único para a realização de uma ACV, mas é conveniente que a ACV seja aplicada conforme estabelecido na norma vigente, com base na aplicação específica e nos requisitos de cada caso e usuário.

Uma ACV deve incluir as seguintes fases (NBR/ISO 14040, 2001):

1. Definição do objetivo e escopo
2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (*Life Cycle Inventory Analysis - LCI*)
3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (*Life Cycle Impact Assessment - LCIA*)
4. Interpretação

A Figura 2 apresenta um esquema da estrutura da avaliação do ciclo de vida.

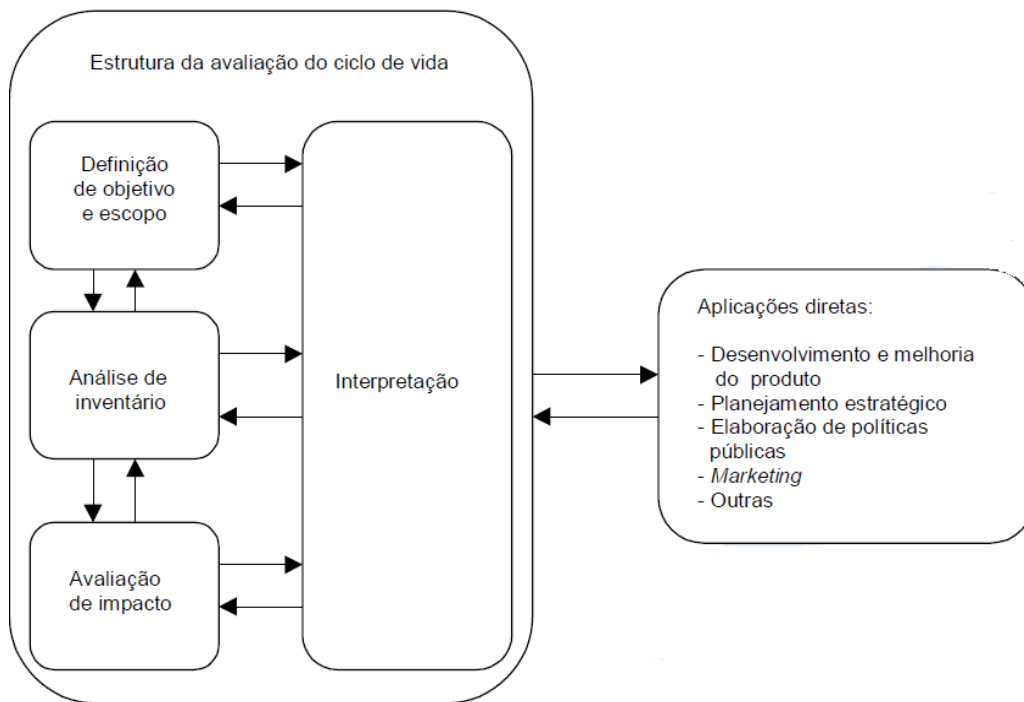


Figura 2 – Estrutura da ACV
Fonte: NBR/ISO 14040 (2001)

Os estudos de inventário do ciclo de vida precisam incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário e interpretação de resultados.

2.1.2 Definição do Objetivo e Escopo

O objetivo deve incluir a aplicação pretendida, a motivação do estudo e o público para o qual serão comunicados os seus resultados. Para que objetivo estabelecido na ACV seja alcançado é importante que o escopo do estudo seja bem detalhado. Assim, garantirá que a extensão, a profundidade e o grau de detalhe sejam compatíveis com o objetivo pretendido.

Nesta fase devem ser definidos os seguintes itens (NBR/ISO 14040, 2001): o tipo de ACV que será realizado, o sistema do produto a ser estudado, as suas funções e

as suas fronteiras, a unidade funcional que será utilizada, os procedimentos que serão utilizados para alocação, os tipos de impacto envolvidos e a metodologia de avaliação e interpretação desses impactos, os requisitos de dados e suposições, as limitações da análise, requisitos da qualidade dos dados iniciais, tipo de análise crítica (se aplicável) e o tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

A unidade funcional é utilizada como uma unidade de referência para as entradas e saídas do sistema, permitindo que os resultados obtidos para diferentes sistemas sejam comparados em uma mesma base.

As fronteiras do sistema são determinadas por diferentes fatores e determinam quais as unidades de processo da ACV serão incluídas no estudo. O sistema deve ser modelado de forma que as entradas e as saídas pelas fronteiras do sistema sejam fluxos elementares. As fronteiras podem ser determinadas pelo tipo de aplicação do estudo, as hipóteses consideradas no estudo, os critérios de corte, acesso a dados, restrições de custo do projeto e o público que se procura atingir (NBR/ISO 14040, 2001).

Uma unidade de processo é o menor elemento considerado para o qual entradas e saídas são quantificadas. Na prática, operações unitárias em unidades de produção e até plantas inteiras podem ser considerados unidades de processo.²³

2.1.3 Inventário do ciclo de vida (*Life Cycle Inventory - LCI*)

O resultado da etapa de inventário (*Life Cycle Inventory – LCI*) é basicamente uma compilação dos dados de entrada e saída do produto durante o seu ciclo de vida em relação à unidade funcional.

A etapa de LCI pode ser uma das mais intensivas em trabalho e tempo durante a ACV devido à grande quantidade de dados necessária. Ainda pode se tornar mais difícil devido à falta de dados adequados específicos para o sistema do produto em estudo (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

A etapa de inventário lida com o processamento dos dados, com as fronteiras do sistema, com problemas de *cut-off* e de alocação (HEIJUNGS, 2003).²⁴

²³ Quando operações unitárias em unidades de produção ou plantas inteiras são consideradas unidades de processo estes são tratados como um único processo chamado de “caixa preta” (*black box process*). Por exemplo, este recurso foi utilizado neste estudo para o caso da UTE.

²⁴ Um dos problemas do método de ACV é como lidar com processos com múltiplos *outputs*. A principal questão neste caso é como particionar os fluxos e distribuí-los entre os diferentes produtos fornecidos (REBITZER *et al.*, 2004).

Vale ressaltar que a análise do inventário, assim como todo o processo de ACV, são processos iterativos. À medida que aumenta o conhecimento sobre o sistema que está sendo estudado, como consequência do crescente número de dados coletados para a análise, novos requisitos ou limitações podem ser identificados. Pode surgir a necessidade de mudança nos procedimentos de coleta de dados para que os objetivos do estudo ainda sejam alcançados. Também podem ser identificadas questões que levem a revisões no objetivo ou no escopo do estudo (NBR/ISO 14040, 2001).

Segundo a NBR/ISO 14040 (2001) nesta fase devem ser aplicados os procedimentos de alocação, necessários quando o estudo inclui unidades de processos com múltiplos produtos. Neste caso, os fluxos de materiais, de energia e de saídas (*outputs*) para o ambiente devem ser alocados nos diferentes produtos da unidade de processo, de acordo com os procedimentos estabelecidos e definidos na etapa de objetivo e escopo.

Uma característica que limita a abordagem ACV é o fato de ela limitar-se exclusivamente aos impactos que são potencialmente causados por intervenções entre o sistema de análise e a ecossfera, e que são causados durante as condições de operação normais e anormais dos processos incluídos. No entanto, não inclui acidentes, vazamentos, etc. Se estes efeitos, que não fazem parte diretamente da ACV, forem analisados, estes devem ser inventariados, agregados e interpretados separadamente do inventário do ciclo de vida (ILCD, 2010a).

2.1.3.1 Métodos para a realização do inventário

A etapa de LCI pode ser uma das mais intensivas em trabalho e tempo durante a ACV devido à grande quantidade de dados necessária. Por esse motivo é etapa do inventário mais intensiva na manipulação de dados e a que mais se beneficia da utilização de *softwares* desenvolvidos para esta finalidade.

Com o objetivo de facilitar esta etapa e evitar duplicação de compilação de dados, diversas bases de dados foram criadas nas últimas décadas. Estas bases de dados, que geralmente são oferecidos em conjunto com determinados *softwares*²⁵ de ACV, incluem bancos de dados públicos nacionais ou regionais, da indústria e também de consultores. Além dos bancos de dados públicos diversas associações internacionais de

²⁵ Há uma série de *softwares* disponíveis comercialmente para ACV. Um registro das ferramentas de ACV e provedores de bancos de dados está disponível em <http://lca.jrc.ec.europa.eu/> (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

negócios possuem os seus próprios bancos de dados com propósito de suprir a demanda por dados de suas indústrias (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

A maioria das bases de dados é baseada em dados médios, que representam a média das condições de produção e suprimento de produtos e serviços. A qualidade e a consistência dos dados utilizados são questões fundamentais relacionadas à etapa de inventário (FINNVEDEN *et al.*, 2009).²⁶

Existem diferentes métodos disponíveis para realização da etapa de inventário. A escolha do método apropriado para cada caso específico estudado pode evitar resultados com diferenças significativas. Na escolha é fundamental que as vantagens e limitações de cada um deles sejam consideradas.

O estudo SUH; HUPPES (2005) compara detalhadamente os métodos de inventário, seguindo critérios como exigência de dados, incerteza dos dados de origem, limite do sistema geográfico, limites do sistema tecnológico, fronteiras do sistema a montante, intensidade de mão de obra e tempo utilizado no trabalho, simplicidade de aplicação, ferramentas computacionais necessárias e *softwares* disponíveis. Os métodos foram divididos em três grandes grupos:

1. Método baseado na análise de processo
2. Método baseados na análise Insumo-Produto (*Input-Output* - IO)
3. Método híbrido

2.1.3.1.1 Método baseado na análise de processo

O método baseado na análise de processo pode ser dividido em dois tipos, segundo o tipo de representação do sistema: representação em diagramas de fluxo e representação matricial.

2.1.3.1.1.1 Representação em diagramas de fluxo

A metodologia baseada em processo utiliza diagramas de fluxo para representar a interconexão dos processos de um sistema de produto. Esses diagramas são representados por caixas e setas que representam os processos e os fluxos de

²⁶ Enquanto que em bancos de dados específicos, estes são assegurados, em certa medida, em bases de dados podem existir diferenças significativas. Isso inclui a documentação dos dados (por exemplo, a utilização de diferentes formatos) a abordagem utilizada (por exemplo, a consideração de bens de capital) e a nomenclatura dos fluxos e intercâmbios ambientais. Identificar e eliminar essas diferenças são desafios para a metodologia de ACV (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

produtos, respectivamente. Cada um dos processos é representado como uma razão entre um número de entradas e saídas (*input-output ratio*). A quantidade de produtos que satisfazem certa unidade funcional é obtida, e multiplicando-se o montante das intervenções ambientais gerados para produzi-los, o inventário do sistema de produto é obtido (SUH; HUPPES, 2005).

O uso da metodologia baseada em processo pode apresentar problemas de alocação para sistemas com certa complexidade: em sistemas onde um processo fornece mais de um produto ou apresenta mais de um fluxo de energia; onde o processo de tratamento de resíduos recebe mais de um tipo de resíduo; onde o sistema estudado fornece entradas (*inputs*) para, ou recebe saídas (*outputs*) de outro sistema; e onde existem *loops* nos fluxos de materiais ou energia. Por exemplo, em casos de reciclagem de circuito aberto (*open-loop recycling*), quando o material relacionado ao ciclo de vida de um produto é reciclado de um ciclo de vida de outro produto. Estes problemas estão relacionados ao problema de multifuncionalidade. Neste caso, o problema é decidir que partes dos encargos ambientais da atividade devem ser atribuídas ao produto investigado, ou seja, incluídos no inventário do produto investigado (EKVALL; FINNVEDEN, 2001).

2.1.3.1.1.2 Representação Matricial

A representação matricial do sistema de produto utiliza um sistema de equações lineares para resolver o problema do inventário. No entanto, a representação matricial é apenas um artifício matemático para representar a etapa de inventário com base em processos.

As metodologias baseadas no fluxo de processo, sempre apresentam problemas de truncamento em determinado grau. Isso ocorre porque em tese todos os processos de uma economia estão diretamente ou indiretamente conectados entre si e é praticamente impossível coletar dados específicos de processo de toda a economia. Esse problema tem levado a utilização da análise Insumo-Produto (SUH; HUPPES, 2005).

2.1.3.1.2 Métodos baseados na análise Insumo-Produto

Uma ACV geralmente possui erros relacionados a medidas não confiáveis, a estimativas e suposições realizadas no estudo, a tendências em dados de origem, a falta

de correlação temporal, geográfica e tecnológica, e a falta de conhecimento sobre o sistema (HEIJUNGS, 2003; LENZEN, 2001).

A utilização da metodologia Insumo-Produto também apresenta erros causados pela agregação dos dados disponíveis ou relacionados a aspectos metodológicos como suposições de linearidade e da proporcionalidade. No entanto, o erro intrínseco a etapa Insumo-Produto de uma análise híbrida (ver item 2.1.3.1.3) é com frequência significativamente menor que o erro causado pelo truncamento realizado na metodologia baseada na análise de processo (LENZEN, 2001).

A análise Insumo-Produto é um campo da economia que analisa as conexões entre os setores industrial e doméstico de uma economia nacional, na forma de oferta e demanda de bens e serviços, formação de capital e a troca de renda e trabalho (FINNVEDEN *et al.*, 2009). A matriz Insumo-Produto (MIP) é uma ferramenta econômica que utiliza dados de transações monetárias setoriais para explicar interdependências entre as indústrias em economias modernas (LENZEN, 2001).

As matrizes de Insumo-Produto (MIP),²⁷ que começaram a ser declaradas pelas autoridades estatísticas nacionais e a fazer parte das contas nacionais na década de 1950, são publicadas regularmente pela maioria das nações industrializadas. Estas matrizes declaram em termos médios monetários, para cada setor da economia, o quanto este setor compra de outros setores, para cada unidade produzida neste setor (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

A MIP é definida geralmente como uma matriz de coeficientes técnicos diretos que apresenta o valor que determinada atividade econômica precisa receber como insumo das demais atividades consideradas para que possa produzir uma unidade monetária adicional. O modelo de Leontief, que possibilita calcular a produção de cada atividade a partir de uma demanda final exógena, é desenvolvido com base nesta matriz (IBGE, 1997).²⁸

Com informações sobre o valor monetário apenas para cortes dos fluxos e com maior disponibilidade de dados ambientais para uma MIP estendida, preferencialmente

²⁷ A análise Insumo-Produto (*Input-Output Analysis - IOA*) foi desenvolvida pelo economista Wassily Leontief. Ele construiu tabelas detalhadas da economia americana, com base em informações reportadas pela indústria para autoridades do Governo Federal americano (WEIDEMA *et al.*, 2009).

²⁸ Essa é a definição normalmente utilizada para a MIP. No entanto, por ser uma definição simplificada, privilegia o modelo de Leontief, mas desconsidera trabalhos e decisões anteriores, que se iniciam na definição dos conceitos adotados para as variáveis de sua base de dados, até as hipóteses sobre a tecnologia que devem ser adotadas para que os coeficientes técnicos possam ser obtidos. Assim, para se obter uma MIP são necessárias diversas tabelas básicas e matrizes obtidas dessas tabelas (IBGE, 1997).

regionalizada, as necessidades de dados adicionais e a complexidade podem tornar-se bastante limitadas. Por este motivo a utilização deste método parece ser a melhor escolha. No entanto, pode aumentar o custo do processo completo de ACV, devido ao maior tempo despendido na fase de inventário (SUH; HUPPES, 2005).

As estatísticas nacionais e internacionais sobre energia utilizam uma simplificação da rede complexa dos fluxos energéticos existentes em uma sociedade em uma série de trajetórias e depois escolhem dentro dessas trajetórias, aquelas de maior interesse (SPRENG, 1988).

O primeiro passo é a coleta de dados, quando detalhes podem ser perdidos e algumas suposições precisam ser feitas. Diversas pessoas são envolvidas nesse trabalho e ao final o significado preciso dos dados originais pode estar distorcido. Por exemplo, a maioria das estatísticas só registra os fluxos anuais de energia que resulta na perda das variações sazonais (SPRENG, 1988).

A estatística sobre a energia final é relativamente simples, no entanto, em geral, estas estatísticas não incluem todos os fluxos energéticos que são utilizados pelos consumidores finais. Estes dados refletem somente a energia na sua forma comercial e usualmente apenas a energia que está envolvida em alguma transação comercial antes do seu uso final. Não incluem formas de energia sem valor comercial e em geral também não incluem a energia utilizada na sua geração, seja na etapa do seu desenvolvimento ou no seu transporte até o consumidor (SPRENG, 1988).

É raro o caso onde é utilizada exclusivamente a metodologia Insumo-Produto, porque esta trata de setores agregados da indústria e, por isso, não é aplicada a produtos ou processos específicos (LENZEN, 2001).

Os cálculos são baseados em dados relativos aos setores industriais, assim fornecem resultados para um produto médio do setor. Estes dados são utilizados como aproximações para produtos específicos ou grupos de produtos do setor. A precisão dessa aproximação pode ser pobre e depende de como típico ou atípicos o produto ou grupo de produtos estudados é em relação aos outros produtos do setor. Pode-se concluir que quanto mais atípico o produto em questão for, menos adequada pode ser a aproximação (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

Os processos convencionais de ACV podem perder parte significativa das intervenções ambientais na sua etapa de inventário, particularmente para os produtos em que as emissões ambientais estão concentradas em processos a montante (LENZEN, 2001). Isso ocorre porque a metodologia de processo não pode incluir todos os

processos envolvidos. Idealmente, os processos que são excluídos da análise devem ter uma contribuição insignificante para os resultados, mas isso pode não ocorrer.

No entanto, o método Insumo-Produto não é visto como uma alternativa atraente por alguns utilizadores de ACV, quando utilizado para análises mais detalhadas do produto. Isso ocorre porque a resolução do setor é muito grosseira para as principais aplicações da ACV como, por exemplo, seleção de matérias-primas e na alteração de processos (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

Análises considerando aspectos ambientais podem ser realizadas com essa metodologia. Uma matriz Insumo-Produto é uma excelente ferramenta, quando informações sobre o uso médio de recursos e emissões ambientais de cada setor são adicionadas. Ela pode ser utilizada para estimar intervenções ambientais geradas por meio da cadeia de suprimento a montante para fornecer determinada quantidade de bens e serviços (FINNVEDEN *et al.*, 2009). Neste caso, assume-se que o impacto ambiental relacionado à determinada indústria é proporcional a dois parâmetros: a quantidade de produto da indústria e a característica do impacto ambiental. Sendo que a relação entre estes dois parâmetros é fixa (SUH; HUPPES, 2005).

Segundo LENZEN; TRELOAR (2003) a análise Insumo-Produto é uma técnica que utiliza matrizes com transações monetárias que escrevem interdependências complexas entre indústrias visando traçar as necessidades de insumos e a liberação de poluentes na economia como um todo.

Considerando que todas as atividades da economia de um país estão, em princípio, contidas na MIP desse país, alega-se muitas vezes que os limites da ACV baseada em uma matriz Insumo-Produto é geralmente mais compreensivo do que a baseada em análise do processo. No entanto, estes argumentos exigem algumas considerações (SUH; HUPPES, 2005):

- Deve ser observado que o método baseado na MIP pode fornecer um inventário apenas para estágios pré-consumo do ciclo de vida do produto, enquanto o restante dos estágios do ciclo de vida do produto estão fora do limite do sistema.
- A quantidade de produtos importados pelo sistema de produto em estudo deve ser insignificante. Caso contrário, devido a erros de truncamento ou má especificação das importações, os erros podem ser bem mais significativos do que os causados pelo truncamento nas metodologias baseadas em processo.

- Os dados disponíveis na MIP são normalmente mais antigos que os dados disponíveis para uma análise baseada em processo, uma vez que leva um longo período, de um a cinco anos, para publicação das matrizes insumo-produto baseadas nas transações da indústria.

Segundo LENZEN; DEY (2000), essa metodologia possui incertezas em relação à fonte básica de dados devido a erros de amostragem, erros de apresentação (*reporting errors*) e erros de entrada (*inputation errors*), além de incertezas resultantes dos seguintes pontos:

- A hipótese de que modelos Insumo-Produto específicos de uma determinada região ou indústrias estrangeiras produzindo e fornecendo produtos importados concorrentes possuem os mesmos fatores das indústrias nacionais
- A hipótese de que as indústrias estrangeiras são homogêneas
- A estimativa de tabelas de fluxo para bens de capital produzidos internamente e importados
- A hipótese de proporcionalidade entre fluxos monetários e físicos
- Agregação dos dados da MIP com diferentes produtos fornecidos por uma indústria
- A análise Insumo-Produto considera somente o período chamado de “berço ao portão” (*cradle-to-gate*). Não considera a etapa *downstream* do ciclo de vida completo. Assim, gera um erro de truncamento excluindo a etapa chamada de “portão ao túmulo” (*gate-to-grave*).

Outra limitação dessa metodologia é gerada pelo nível de agregação das indústrias e produtos descritos nas tabelas Insumo-Produto. Diferentes produtos são agregados por categorias impedindo uma diferenciação entre eles. Geralmente as tabelas Insumo-Produto apresentam não mais que 100 diferentes tipos de categorias (SUH; HUPPES, 2005).

O maior obstáculo para a utilização dessa metodologia pode ser a falta de dados ambientais setoriais em muitos países. Apesar de estarem disponíveis alguns inventários de emissões isolados, alguns fatores tornam difícil a compilação equilibrada de dados ambientais em diversos países, por exemplo: diferenças no detalhamento dos dados, diferenças no ano base e a classificação da indústria (SUH; HUPPES, 2005).

A metodologia pode fornecer informações sobre os aspectos ambientais de um produto com base em um limite do sistema razoavelmente completo utilizando menos recursos e menos tempo. No entanto, para um produto com um sistema de produção que dependa fortemente de importações e tecnologias recentemente desenvolvidas, a aplicação da metodologia torna-se limitada (SUH; HUPPES, 2005).

Visando reduzir as desvantagens e combinar as vantagens encontradas na análise de processo e na análise insumo-produto, surgiu a técnica híbrida. No entanto, ela só passou a ser adotada e reconhecida no final da década de 1990.²⁹

2.1.3.2 Metodologias baseadas em metodologias híbridas

As metodologias híbridas procuram combinar as vantagens dos dois tipos anteriores, o método baseado na análise de processo e o método baseado na análise Insumo-Produto (LENZEN, 2001).

A análise híbrida vem sendo adotada na compilação da etapa de inventário de diferentes formas. Segundo SUH; HUPPES (2005) as metodologias híbridas podem ser subdivididas em três categorias:

- Híbrida em camadas ou Híbrida hierárquica (*Tiered Hybrid Analysis*)
- Híbrida baseada na matriz Insumo-Produto (*IO Based Hybrid Analysis*)
- Híbrida integrada (*Integrated Hybrid Analysis*)

O termo híbrido significa essencialmente a combinação de duas abordagens distintas. No entanto, este termo é utilizado em diferentes contextos sem o cuidado necessário. No contexto da ACV e análise Insumo-Produto, o termo híbrido possui no mínimo dois significados: unidades híbridas, que são a combinação de unidades físicas e monetárias de diferentes colunas e linhas na mesma tabela; e dados híbridos, que são a combinação de dados de processos e dados de entrada e saída da indústria, no mesmo banco de dados (WEIDEMA *et al.*, 2009).

²⁹ Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) foi desenvolvida a partir da análise de engenharia de requisitos cumulativos de energia na década de 1960 e início dos anos 1970, no entanto somente a partir do início de 1990 que o termo LCA obteve o seu significado atual. Devido ao relativo isolamento das disciplinas econômicas e de engenharia, a *Input Output Analysis* (IOA) e a ACV se desenvolveram em paralelo, sem muita interação até o final de 1990 (WEIDEMA *et al.*, 2009).

2.1.3.2.1 Híbrida em camadas

Na análise híbrida em camadas combinou-se a MIP à análise de processos, utilizando a análise de processo para analisar os principais processos em detalhe e a análise Insumo-Produto para estimar os fluxos a montante remotamente ligados aos principais processos (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

A análise em camadas pode ser realizada simplesmente pela adição dos resultados de um inventário baseado na análise Insumo-Produto com os resultados de um inventário baseado em processo. A análise em camadas utiliza a análise baseada em processos para a fase de utilização e de disposição, assim como para diversos processos *upstream* importantes. Os requisitos de entrada restantes são importados de um inventário baseado em uma MIP (SUH; HUPPES, 2005).

A análise híbrida em camadas é a adição de uma tabela Insumo-Produto para fornecer insumos a montante a uma tabela de dados de processo (Figura 3). Nesta abordagem, alguma duplicação de atividades ocorre, uma vez que as atividades representadas na tabela de processos também estão incluídas nos dados da MIP (WEIDEMA *et al.*, 2009).

Figura 3 - Representação da abordagem híbrida em camadas

Análise em camadas	Produtos Utilizados	Produtos Utilizados
Produtos Fornecidos	Tabela de requisitos diretos dos processos	
Produtos Fornecidos	▲ L.....	MIP

Fonte: Adaptado de WEIDEMA *et al.* (2009).

Nota: A MIP fornece entradas para a parte com base na análise de processos, mas a análise de processo não fornece dados para matriz insumo-produto.

A escolha da fronteira entre o sistema baseado na análise de fluxo de processo e o sistema baseado na análise insumo-produto deve ser cuidadosamente selecionada. Essa escolha pode evitar que erros significativos sejam introduzidos quando importantes processos são modelados utilizando-se informações agregadas derivadas da análise Insumo-Produto (SUH; HUPPES, 2005).

Geralmente a localização e a uniformidade entre a fronteira do processo e a análise Insumo-Produto depende da disponibilidade de dados, requisitos para detalhamento e precisão, e restrições relacionadas ao custo, trabalho e tempo disponíveis (LENZEN, 2001).

Também existem problemas de dupla contagem, porque, em princípio, os fluxos de produtos do sistema baseado no fluxo de processo já estão incluídos na MIP. Assim, devem-se descontar esses valores da análise Insumo-Produto (SUH; HUPPES, 2005).

A análise em camadas possibilita a realização de um inventário razoavelmente completo e rápido, no entanto, por operar separadamente os dois processos envolvidos a interação deles não pode ser realizada de forma sistemática. Por exemplo, os efeitos das diferentes opções no final do ciclo de vida do produto, que podem mudar a interdependência na indústria mediante o fornecimento de materiais ou energia para sistema baseado na análise insumo-produto, não podem ser adequadamente modelados (SUH; HUPPES, 2005). A eq.1 mostra a representação matemática desse método.

$$M_{TH} = \tilde{B}\tilde{A}^{-1}\tilde{k} + B(I - A)^{-1}k \quad \text{eq.1}$$

Onde,

\tilde{B} é a matriz ambiental da parte baseada na análise de processo

\tilde{A} é a matriz tecnológica da parte baseada na análise de processo

\tilde{k} é o vetor demanda da parte baseada na análise de processo

B é a matriz ambiental da parte baseada na análise Insumo-Produto

A é a matriz tecnológica da parte baseada na análise Insumo-Produto

k é o vetor demanda da parte baseada na análise Insumo-Produto

2.1.3.2.2 Híbrida baseada na matriz Insumo-Produto

A análise híbrida com abordagem baseada na MIP é realizada desagregando-se os setores da indústria na tabela Insumo-Produto.

Então a matriz Insumo-Produto desagregada pode ser construída como colunas, a_{ja} e a_{jb} devem ser estimadas utilizando informações sobre as exigências a montante do processo, e as linhas a_{ia} e a_{ib} devem ser estimados utilizando informações de insumos (SUH; HUPPES, 2005).

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j_a} & a_{1j_b} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i_a1} & \dots & a_{i_a j_a} & a_{i_a j_b} & \dots & a_{i_a n} \\ a_{i_b1} & \dots & a_{i_b j_a} & a_{i_b j_b} & \dots & a_{i_b n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nj_a} & a_{nj_b} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

A matriz de intervenção ambiental também deve ser desagregada e deve utilizar informações detalhadas dos processos desagregados. Este procedimento, que é a parte essencial desse método, pode ser realizado de forma iterativa, de modo que a MIP desagregada se torne suficientemente precisa para realizar uma análise abrangente. (SUH; HUPPES, 2005). A eq. 2 apresenta a representação matemática deste método.

$$M_{IOH} = \tilde{B}\tilde{A}^{-1}\tilde{k} + B'(I - A')^{-1}k' \quad \text{eq. 2}$$

Onde,

\tilde{B} é a matriz ambiental da parte baseada na análise de processo

\tilde{A} é a matriz tecnológica da parte baseada na análise de processo

\tilde{k} é o vetor demanda da parte baseada na análise de processo

B' é a matriz ambiental expandida

A' é a matriz tecnológica desagregada da análise Insumo-Produto

k' é o vetor demanda da parte baseada na análise Insumo-Produto

Os resultados dos estágios remanescentes do inventário do ciclo de vida do produto, incluindo uso e disposição final, devem ser adicionados e calculados manualmente seguindo a metodologia da análise híbrida em camadas (item 2.1.3.2.1). Assim, a interação entre as duas fases presentes no modelo, pré-consumo e o resto do ciclo de vida do produto, se torna difícil de ser modelada (SUH; HUPPES, 2005).

2.1.3.2.3 Híbrida integrada

A análise híbrida integrada utiliza a abordagem matricial e a abordagem insumo produto em um quadro único de análise. Assim, a MIP está interligada com a

representação matricial do sistema permitindo realizar interações entre os processos individuais e as indústrias em uma estrutura consistente (SUH; HUPPES, 2005).

A análise híbrida integrada utiliza um banco de dados onde aos dados relativos ao processo são incorporados os dados da matriz Insumo-Produto, deixando apenas o residual de cada atividade da MIP após a subtração dos dados de nível de processo incorporados (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Os dados de nível de processo e os dados residuais Insumo-Produto são totalmente integrados, permitindo entradas para os dois lados, e o banco de dados resultante é um representante de toda a economia como a tabela de Insumo-Produto original, apenas com um maior nível de detalhes (WEIDEMA *et al.*, 2009).

Figura 4- Representação da abordagem híbrida integrada

Análise híbrida integrada	Produtos Utilizados	Produtos Utilizados
Produtos Fornecidos	Tabela de requisitos diretos dos processos	----- ▼
Produtos Fornecidos	▲ L-----	MIP residual

Fonte: Adaptado de WEIDEMA *et al.*, (2009)

A eq. 3, a eq. 4 e a eq. 5 representam respectivamente, o método híbrido em camadas ou hierárquico (*TH*), o método híbrido baseado em matriz Insumo-Produto (*IOH*) e o método híbrido integrado (*IH*).

$$M_{TH} = \begin{bmatrix} \tilde{B} & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & 0 \\ 0 & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{k} \\ k \end{bmatrix} \quad \text{eq.3}$$

$$M_{IOH} = \begin{bmatrix} \tilde{B} & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & 0 \\ 0 & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{k} \\ k \end{bmatrix} \quad \text{eq. 4}$$

$$M_{IH} = \begin{bmatrix} \tilde{B} & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & Y \\ X & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{k} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{eq. 5}$$

Onde,

\tilde{B} é a matriz ambiental da parte baseada na análise de processo

\tilde{A} é a matriz tecnológica da parte baseada na análise de processo

\tilde{k} é o vetor demanda da parte baseada na análise de processo

B é a matriz ambiental da parte baseada na análise IO

A é a matriz tecnológica da parte baseada na análise IO

k é o vetor demanda da parte baseada na análise IO

B^* é a matriz ambiental expandida

k^* é o vetor demanda expandido

Pode-se perceber que substituindo X e Y por 0, que as equações da análise em camadas (eq.3) e a baseada e em matriz Insumo-Produto (eq.4) são casos especiais do caso mais geral, que é representado pelo método híbrido integrado (eq. 5).

A ausência das matrizes X e Y mostra a ausência de links formais entre o sistema baseado em análise de processo e o sistema Insumo-Produto para o método em camadas e no método baseado na matriz Insumo-Produto (SUH; HUPPES, 2005).

A Tabela 1 resume o resultado da comparação do estudo Suh and Huppess (2005) de entre as metodologias consideradas para a etapa de inventário.

Tabela 1 – Comparação entre as metodologias utilizadas para a etapa de LCI

	LCI baseada na análise de processos		LCI baseada na análise Insumo-Produto	LCI baseada na análise híbrida		
	Diagrama de fluxo de processos	Representação matricial		Híbrida em camadas	Híbrida baseada em Insumo-Produto	Híbrida Integrada
Requerimentos de dados	Fluxos de commodities e fluxos ambientais por processo	Fluxos de commodities e fluxos ambientais por processo	Fluxos de commodities e fluxos ambientais por setor	Fluxos de commodities e fluxos ambientais por processo e por setor	Fluxos de commodities e fluxos ambientais por setor e LCI baseada em fluxo de processos	Fluxos de commodities e fluxos ambientais por processo e por setor
Incerteza da fonte de dados	Baixa	Baixa	Média a alta	Depende ⁽¹⁾	Depende ⁽¹⁾	Baixa
Fronteira do sistema a montante	Média a pobre	Média a pobre	Completa	Completa	Completa	Completa
Fronteira do sistema tecnológico	Completa	Completa	Média a pobre	Depende ⁽¹⁾	Depende ⁽¹⁾	Completa
Fronteira do sistema geográfico	Não é limitado	Não é limitado	Somente atividades domésticas	Depende ⁽¹⁾	Somente atividades domésticas	Não é limitado
Ferramentas analíticas aplicáveis	Raro	Abundante	Raro	Raro	Abundante	Abundante
Intensidade de tempo e trabalho	Alta	Alta	Baixa, se os dados ambientais estiverem disponíveis	Depende ⁽¹⁾	Depende ⁽¹⁾	Alta
Simplicidade de aplicação	Simple	Simple	Simple	Simple	Complexo	Complexo
Ferramentas computacionais necessárias	MS Excel; ou similar (não é necessária a inversão de matriz)	MatLab; Matemática; ou similares (inversão de matriz)	MS Excel; ou similar	MS Excel; ou similar	MatLab; Matemática; ou similares (inversão de matriz)	MatLab; Matemática; ou similares (inversão de matriz)
Ferramentas disponíveis (softwares)	A maioria dos softwares de ACV	CMLCA	MIET; EIOLCA	MIET + software de ACV	-	CMLCA

Fonte: Adaptado de SUH; HUPPES (2005)

Notas: ⁽¹⁾ Depende da divisão entre a parte baseada na análise de processo e da parte baseada na matriz Insumo-Produto.

2.1.3.3 A seleção do método de ACV para o estudo de caso

As metodologias apresentadas possuem pontos fortes e fracos e a escolha pela mais adequada deve tomar como base o caso que está sendo analisado.

A metodologia baseada na análise de processos apresenta erros causados por problemas de truncamento, que ocorrem nos estágios de produção em diferentes ordens. A ordem do erro depende da disponibilidade dos dados e de sua representatividade /

significância. Além disso, entradas como serviços financeiros podem ser omitidos mesmo nas primeiras ordens da análise. Assim, a análise convencional, baseada em análise de processos,³⁰ está geralmente limitada horizontalmente e verticalmente (LENZEN, 2001).

Ainda no caso da metodologia baseada na análise de processos, a utilização método de diagrama de fluxo é a mais indicada para sistemas mais simplificados, enquanto que a representação matricial de sistemas de produtos é claramente superior para sistemas mais complexos (SUH; HUPPES, 2005).

O método Insumo-Produto pode ser na melhor das hipóteses utilizado como uma primeira aproximação do estudo. Assumindo que MIP esteja disponível, este método é o que apresenta uma menor necessidade de esforço para o levantamento de dados (SUH; HUPPES, 2005).

Dentro das opções de análise híbrida, a análise híbrida em camadas apresenta a vantagem da facilidade de extensão para as ACV baseadas em processos com o objetivo de preenchimento de lacunas. No entanto, a ligação entre os dois subsistemas de inventário precisa ser feito externamente. Os *links* parciais entre os sistemas continuam a ser uma fonte de erro que é difícil de avaliar (SUH; HUPPES, 2005).

A metodologia híbrida baseada em Insumo-Produto é conceitualmente a mais madura. Embora os processos de uso e de pós-uso não estejam incorporados na parte Insumo-Produto, e as ligações entre os sistemas permanecerem externas, a análise híbrida Insumo-Produto apresenta maior resolução para o sistema baseado na matriz Insumo-Produto e não apresenta problemas de sobreposição (SUH; HUPPES, 2005).

A metodologia de análise integrada apresenta uma maior qualidade do resultado, especialmente em termos de completude do sistema, quando comparada com a análise de processo (SUH; HUPPES, 2005).

Segundo SUH; HUPPES (2005), com tempo e recursos financeiros disponíveis, a melhor escolha será a análise híbrida integrada. Se este não for o caso do projeto em questão, uma opção pode ser considerar uma estratégia passo a passo, onde a abordagem híbrida em camadas/hierárquica é executada inicialmente, especificando *cut-offs* a jusante (k ou X). O passo seguinte, com recursos adicionais e tempo disponível, seria a especificação de *cut-offs* a montante (Y) e em seguida a desagregação da matriz

³⁰ O estudo de LENZEN (2001) conclui, por meio de uma comparação de diversos resultados de estudos que utilizam a análise de processo, que em geral a utilização da análise de processo não atinge resultados razoáveis de completude do sistema devido ao alto número de importantes entradas (*inputs*).

(A'). A abordagem passo a passo pode começar com alguns processos importantes trabalhados em detalhe, o que apresenta um custo e tempo reduzidos. Em seguida, com base nos processos onde as principais contribuições e incertezas forem obtidas, um aumento gradual da resolução pode ser obtido até que a qualidade seja suficiente para o resultado que se deseja obter. Nessa sequência de desenvolvimento sugerida, sempre há uma definição completa e consistente do sistema, com melhoria da resolução conforme for necessário.

O sistema estudado nesta tese é referente a uma UTE específica, com localização e condições operacionais próprias. Neste caso, optou-se pela metodologia baseada em processos, com representação matricial. Essa decisão foi tomada porque a utilização da metodologia híbrida envolveria a atualização da matriz Insumo-Produto e aumentaria significativamente o tempo necessário para a análise.³¹

A escolha pela representação matricial também influenciou a escolha do *software* a ser utilizado na etapa de inventário da ACV (ver item 2.2).

2.1.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A etapa de avaliação do impacto do ciclo de vida (*Life Cycle Impact Assessment* – LCIA) utiliza os resultados obtidos na etapa de inventário para compreender e avaliar a magnitude e importância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto. Esta avaliação envolve a correlação dos dados obtidos na etapa de inventário com impactos ambientais específicos. A escolha dos impactos e as metodologias que serão utilizadas na análise são baseadas no objetivo e no escopo do estudo. Nesta etapa, também pode ser adotado um processo iterativo de análise crítica do objetivo e do escopo definido inicialmente (NBR/ISO 14040, 2001).

Esta etapa serve, portanto, para agregar os dados obtidos na etapa de inventário e viabilizar a etapa de interpretação (ILCD, 2010a).³²

A avaliação do impacto do ciclo de vida pode ser dividida em quatro etapas, sendo que nem todas são obrigatórias (NBR/ISO 14040, 2001):

³¹ Em relação à complexidade de cálculo, a metodologia baseada em Insumo-Produto e a híbrida são consideradas mais complexas, uma vez que estas duas abordagens exigem algum conhecimento sobre matriz Insumo-Produto e envolvem a atualização e a manipulação dos dados da MIP. A representação matricial foi escolhida prevendo-se a aplicação da análise híbrida futuramente, tanto ao caso escolhido para o estudo de caso desta tese, quanto para outros sistemas de produto.

³² O *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* é uma série de documentos de orientação técnica para ACV visando fornecer uma base para uma maior consistência e qualidade de dados de ciclo de vida, métodos e estudos (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

1. Seleção das categorias de impactos e classificação
2. Caracterização
3. Normalização
4. Ponderação

Vale ressaltar que a etapa de avaliação de impacto ainda está em constante desenvolvimento. Existem modelos de categorias de impacto em diferentes estágios de desenvolvimento, mas não existe uma metodologia aceita de forma geral para a associação consistente e acurada de dados com impactos ambientais específicos.

Visando diminuir os efeitos da subjetividade envolvida nesta etapa da ACV, a transparência das decisões utilizadas deve ser máxima, assegurando que as suposições feitas sejam claramente descritas e relatadas (NBR/ISO 14040, 2001).

As categorias de impacto que serão consideradas nesta etapa assim como os métodos que serão utilizados, a normalização e a ponderação, quando incluídas, deverão ser determinadas preferencialmente antes da análise inicial de inventário, sempre que possível. Isso garantirá que as escolhas não serão influenciadas pelos primeiros resultados obtidos na etapa de inventário. Além de garantir que os dados pertinentes e compatíveis do inventário serão coletados para os processos do sistema (ILCD, 2010a).

A seleção das categorias de impacto e fatores utilizados para a normalização e ponderação deve ser consistente com o objetivo do estudo. Uma análise baseada somente na etapa de inventário pode ser justificada dependendo do objetivo do estudo, mas deve ser ressaltado que esse procedimento pode limitar a validade da interpretação e comparações dos resultados. Afirmações comparativas com base nos resultados da etapa de inventário por si só não são permitidos pela norma ISO 14044 (ILCD, 2010a).

A seleção das categorias de impacto deve ser abrangente no sentido de que eles cobrem todas as questões ambientais relevantes relacionados ao sistema. A exclusão inicial de impactos relevantes deve ser claramente documentada e considerada na interpretação dos resultados, potencialmente limitando as conclusões e recomendações do estudo (ILCD, 2010a).

Assim, o propósito desta etapa é interpretar os dados das emissões do ciclo de vida e consumo de recursos em termos de indicadores para as entidades que se quer proteger como: saúde humana, ambiente natural e recursos naturais. Essas entidades a serem protegidas são chamadas de Áreas de Proteção (*Areas of protection – AoP*) (ILCD, 2010b).

Segundo a Norma ISO 14040 para que um indicador seja utilizado em uma determinada categoria de impacto, este pode ser escolhido em qualquer etapa da cadeia, que liga os dados de inventário aos impactos na área de proteção, referente ao impacto (ILCD, 2010b).

Desde o início da década de 1990, diversas metodologias de LCIA têm sido desenvolvidas, o que tem criado uma confusão desnecessária, em parte devido a resultados diferentes obtido com diferentes metodologias (ILCD, 2010b).³³

Existem basicamente dois métodos para a etapa de LCA. O primeiro método é orientado para o problema (*problem-oriented method* ou *mid point method*), enquanto que o segundo método é orientado para os danos finais (*damage-oriented method* ou *end point method*). Os dois métodos apresentam vantagens e desvantagens.

No primeiro método, orientado para o problema, a caracterização no nível médio modela um impacto usando um indicador localizado/relacionado em algum lugar durante o mecanismo, mas antes da etapa final (ILCD, 2010b). Neste caso os fluxos são classificados em temas ambientais para os quais contribuem. A maioria dos estudos de ACV aborda as seguintes categorias: efeito estufa, recursos naturais, depleção do ozônio estratosférico, acidificação, criação fotoquímica de ozônio, eutrofização, toxicidade humana e toxicidade aquática. As metodologias que utilizam estes métodos visam simplificar a complexidade de centenas de fluxos em algumas áreas de interesse ambiental (SIB, 2011).³⁴

O método orientado para os danos finais também classifica inicialmente os fluxos de um sistema em temas ambientais. No entanto, neste caso é realizada uma modelagem dos danos ambientais para cada um dos temas ambientais (SIB, 2011).³⁵ A Figura 5 apresenta um esquema da etapa de LCA.

³³ Para uma comparação detalhada das principais metodologias disponíveis consultar o *ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment* (ILCD, 2010c).

³⁴ As categorias de nível médio são definidas no local onde existe um mecanismo comum para uma variedade de substâncias dentro dessa categoria de impacto específico. Por exemplo, os impactos do aquecimento global envolvem uma série de etapas, começando com o lançamento de gases de efeito estufa (GEE), e terminando com impactos sobre os seres humanos e ecossistemas. Há um ponto onde os GEE têm um efeito sobre o forçamento radiativo. As emissões de diferentes GEE têm caminhos diferentes antes desse ponto, mas idênticos depois desse ponto. Assim, o forçamento radiativo fornece um indicador adequado para a categoria de impacto no ponto médio do Aquecimento Global (ILCD, 2010b).

³⁵ Por exemplo, a acidificação, que está relacionada à chuva ácida, pode causar danos não somente aos ecossistemas, mas também a prédios e monumentos. O método Ecoindicator 99 é um exemplo (SIB, 2011).

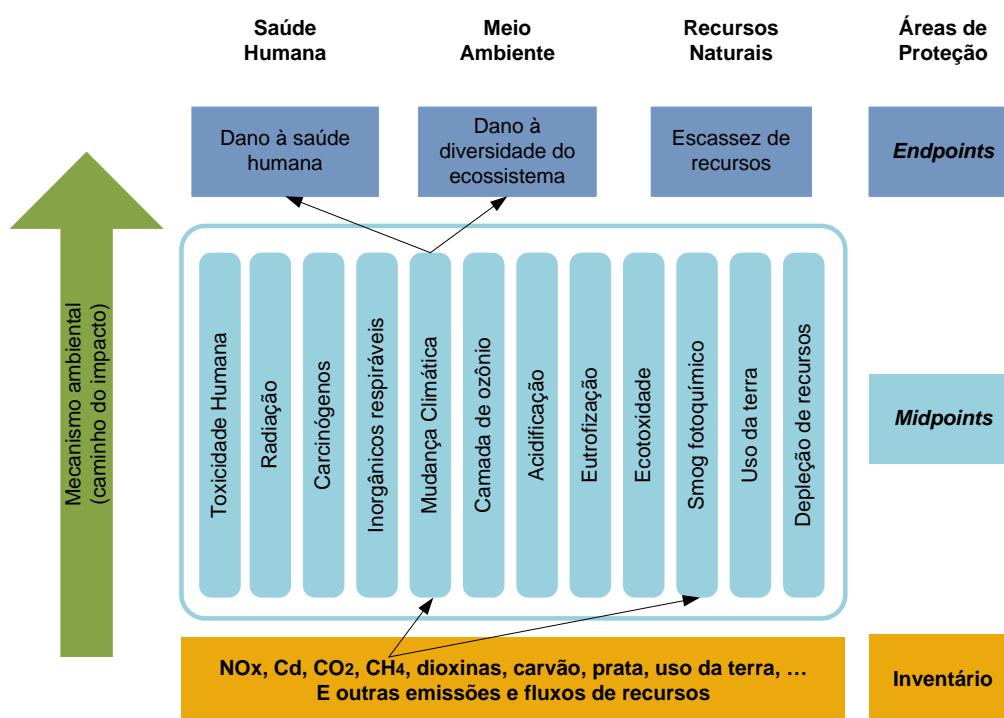


Figura 5 - Esquema da etapa de LCA desde o inventário até as categorias *endpoints*.

Nota: a normalização e a ponderação não são mostradas, mas podem ser aplicadas a partir de *midpoints* ou *endpoints*.

Fonte: Adaptado de ILCD (2010a)

Assim, a caracterização nos modelos orientados para os danos finais é realizada durante todo o caminho da cadeia do impacto sobre as entidades descritas pelas áreas de proteção. Isso permite a comparação cruzada de categorias de impacto dentro de diferentes áreas de proteção em uma base das ciências naturais ou sociais, e sempre que possível tendo em conta todas as diferenças específicas de uma substância (ILCD, 2010b).

A maioria das categorias de impacto são heterogênea e não possuem ponto médio real. Assim, o ponto médio aplicado é de fato o mais próximo possível da área de proteção. A modelagem para os danos finais, em seguida, consiste em caracterizar a severidade e as consequências. Na prática o resultado atingido é um *trade-off* entre as duas categorias - *midpoint* e *endpoint*. Isso é o resultado das incertezas associadas à modelagem incompleta com a utilização de indicadores *midpoint* e com as incertezas associadas à extrapolação da modelagem até o ponto final (ILCD, 2010b).

Uma prática habitual é considerar as categorias de impacto de ponto médio e as áreas de proteção abaixo para relevância do estudo (ILCD, 2010a):

- **Categorias de Impacto:** mudança climática, depleção da camada de ozônio (estratosférica), toxicidade humana, inorgânicos respiráveis, radiação ionizante, formação de ozônio fotoquímico, acidificação (solo e água), eutrofização (solo e água), ecotoxicidade, uso do solo, depleção de recursos (minerais, energia fóssil e renovável, água)
- **Áreas de Proteção** - saúde humana, meio ambiente, recursos naturais.

2.1.4.1 Seleção das categorias de impactos e classificação

Na seleção de categorias de impactos e classificação, que é uma etapa obrigatória, os impactos ambientais relevantes para o estudo são definidos. Os fluxos elementares do inventário do ciclo de vida (por exemplo, consumo de recursos, emissões para a atmosfera, etc) são atribuídos às categorias de impacto de acordo com a capacidade destes em contribuir para diferentes problemas ambientais. A Figura 6 apresenta as categorias de impacto ambiental (ILCD, 2010b).

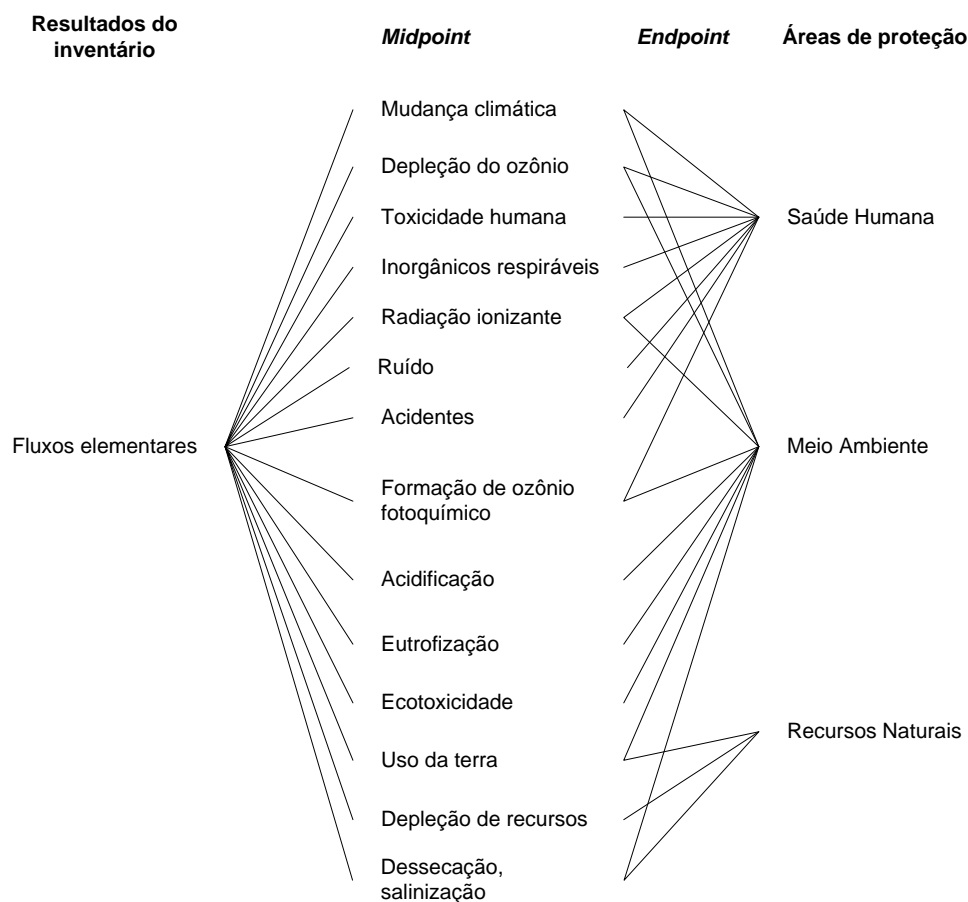


Figura 6 – Esquemas categorias de impacto e caracterização para os níveis de *midpoint* e *endpoint* (áreas de proteção).

Fonte: Adaptado de ILCD (2010b)

2.1.4.2 Caracterização

A etapa de caracterização é obrigatória e é nesta etapa que o impacto de cada emissão ou consumo de recursos é modelado quantitativamente, de acordo com o mecanismo ambiental. O resultado é expresso como uma pontuação de impacto em uma unidade comum a todas as contribuições dentro da categoria de impacto. Para isso, aplicam-se os “fatores de caracterização” (ILCD, 2010b).

2.1.4.3 Normalização

Na etapa de normalização, que não é obrigatória, as pontuações de impacto (item 2.1.5.1) são relativizadas a uma referência comum. Por exemplo, os impactos causados por uma pessoa durante um ano em um determinado contexto geográfico. Isso facilita as comparações entre categorias de impacto e/ou Áreas de Proteção (ILCD, 2010b).

Na etapa de normalização, os resultados dos indicadores para as diferentes categorias de nível de impacto (*midpoint*) ou danos (*endpoint*) são expressos em relação a uma referência comum, dividindo-se os resultados dos indicadores pelos respectivos valores de referência (ILCD, 2010a).

Os valores de referência são tipicamente os resultados de impacto ou danos do total anual de fluxos elementares em um país, região ou continente, ou globalmente.

Estes resultados de referência de impacto ou danos são chamados de “base de normalização”. Uma base de normalização é calculada a partir do inventário para cada uma das categorias de impacto ou danos, da mesma forma como os indicadores de impacto ou danos do sistema analisado (produto, por exemplo) são calculados a partir do seu inventário de ciclo de vida. Para resultados de ponto médio (*midpoint*) a base de normalização é o impacto global potencial, calculado a partir do inventário anual dos fluxos elementares. Para resultados de nível de danos (*endpoint*) a base de normalização é o dano global para as áreas de proteção (ILCD, 2010a).

2.1.4.4 Ponderação

A ponderação não é obrigatória e tem como objetivo ordenar as diferentes categorias de impacto e/ou Áreas de Proteção de acordo com as suas importâncias relativas.

A ponderação pode ser necessária quando situações de *trade-off* ocorrem em análises que estão comparando produtos alternativos (ILCD, 2010b).

Na etapa de ponderação, os resultados tipicamente normalizados dos indicadores para as diferentes categorias de impacto ou danos são multiplicados por um fator de ponderação específico.³⁶ Este fator de ponderação tem como objetivo refletir a importância relativa das categorias de impacto. As decisões podem refletir, portanto, não só o conhecimento científico, mas também considerações políticas e de valor (ILCD, 2010a).

Assim, deve ser ressaltado que fatores de ponderação são intrinsecamente normativos/subjetivos e refletem suposições baseadas em valores.

2.1.5 Interpretação

A etapa de interpretação é a etapa na qual os resultados da etapa de inventário (LCI) e da etapa de avaliação (LCIA) são sumarizados e discutidos servindo como base para conclusões, recomendações e decisões, de acordo com a primeira etapa de objetivo e escopo (GUINÉE *et al.*, 2002; SAUR, 1997).

Segundo a NBR/ISO 14040 (2001) a etapa de interpretação é uma técnica sistemática que permite identificar, qualificar, verificar e avaliar as informações a partir dos resultados obtidos na etapa de inventário.

Este é um processo iterativo que pode levar a uma revisão do escopo da ACV, da natureza e da qualidade dos dados que foram utilizados de uma forma consistente com o objetivo definido anteriormente (NBR/ISO 14040, 2001). As conclusões e recomendações do estudo são obtidas nesta fase.

A fase de interpretação possui dois objetivos principais que podem diferir entre si (ILCD, 2010a):

- Durante as etapas iterativas da ACV, a fase de interpretação serve para orientar os trabalhos visando à melhoria do modelo do inventário do ciclo de vida para atender às necessidades do objetivo do estudo.
- Se as etapas iterativas da ACV resultarem em um modelo final de LCI e resultados, e especialmente em estudos de ACV para fins comparativos (em

³⁶ Os fatores de ponderação podem ser desenvolvidos por diferentes mecanismos, por exemplo, por formuladores de políticas públicas, pela indústria, pelas partes interessadas, por peritos, etc.

parte, também aplicável a outros tipos de estudos), a fase de interpretação servirá para a obtenção de conclusões robustas e até recomendações.

O processo de interpretação pode ser dividido em três atividades. Nos casos em que o estudo envolve comparações de dois ou mais sistemas, considerações adicionais devem ser incluídas na interpretação (ILCD, 2010a):

1. As questões significativas, isto é, os processos-chave, os parâmetros, as premissas e os fluxos elementares são identificados.
2. Essas questões são avaliadas em relação à sua sensibilidade ou influência sobre os resultados da ACV. Isto inclui a avaliação da completude e consistência com que as questões importantes foram tratadas no estudo LCI/LCA.
3. Os resultados da avaliação são utilizados na formulação de conclusões e recomendações.

A interpretação pode ser realizada por processos numéricos e processos baseados em julgamentos (subjetivos).

A avaliação no contexto da fase de interpretação significa aplicar juízo de valor (individuais ou políticos, ou até mesmo socialmente dirigidos) na identificação das principais causas, intervenções individuais, processos ou estágios do ciclo de vida. Estas responsabilidades são identificadas em uma base individual (valores, preferências), incluindo, entre outras coisas, o conhecimento sobre lacunas de dados e a qualidade dos dados, o conhecimento de decisões tomadas na etapa de inventário (critérios de *cut-off*, alocação, etc.) e a avaliação de impacto (qualidade e precisão dos modelos de caracterização, seleção de categorias de impacto, etc), bem como o conhecimento sobre os resultados da análise de contribuição. Assim, esta avaliação vai muito além dos limites de um procedimento técnico. A avaliação permite uma maior concentração dos dados e volume de informações, servindo de base para a tomada de decisões (SAUR, 1997).

Existem diversas possibilidades para a interpretação. Por exemplo, no estudo HEIJUNGS; KLEIJN (2001) são apresentadas, de forma detalhada, cinco tipos de

interpretação baseadas em processos numéricos. As cinco abordagens são: ³⁷ Análise de Contribuição (*Contribution Analysis*); Análise de Perturbação (*Perturbation Analysis*); Análise de Incerteza (*Uncertainty Analysis*); Análise Comparativa (*Comparative Analysis*); e Análise de Discernibilidade (*Discernibility Analysis*).

A ideia da análise da contribuição é decompor os resultados agregados obtidos no inventário, na caracterização, na normalização ou na ponderação em um número de elementos constitutivos/essenciais. Os resultados de uma análise de contribuição são as contribuições que os processos de uma determinada unidade (ou estágios do ciclo de vida), os fluxos elementares e/ou categorias de impacto sobre os resultados agregados de uma ACV. Estes resultados podem ser expressos em percentuais (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

A aplicação da análise de contribuição pode ter vários propósitos, por exemplo, conhecer a contribuição de parte de um determinado processo ou fase do ciclo de vida para uma determinada emissão ou categoria de impacto. Isso pode apresentar oportunidades para o redesenho de produtos ou processos, ou para estratégias de prevenção em um nível mais geral. No entanto, deve ser ressaltado que "falsos negativos" resultantes de fluxos subestimados ou fluxos ignorados (*missing flows*) não podem ser identificados apenas com uma análise da contribuição. A análise de contribuição pode ser aplicada no nível da análise de inventário, caracterização, normalização e ponderação (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

A análise de perturbação utiliza a hipótese de que pequenas perturbações, ou perturbações marginais, nos parâmetros de entrada se propagam como desvios menores ou maiores nos parâmetros de saída. O conhecimento dos parâmetros que levam a grandes desvios e os que levam a pequenos desvios pode ser útil (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

Há dois objetivos principais para a realização da análise de perturbação. A primeira é que ela fornece uma lista dos parâmetros de entrada sobre os quais uma pequena imprecisão resultará em mudanças significativas nos resultados. Isso permite o conhecimento mais preciso do sistema e enumera itens que não merecem prioridade em uma ACV mais detalhada, uma vez que grandes incertezas sobre os seus valores não resultam em grandes variações nos parâmetros de saída (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

³⁷ O software CMLCA permite a utilização dessas cinco abordagens de interpretação. No entanto, este estudo utilizará apenas as abordagens de contribuição e perturbação para analisar os resultados obtidos.

O segundo propósito da análise de perturbação é uma aplicação orientada. O conhecimento dos itens de dados sensíveis pode sugerir ideias para produtos e melhoria de processos (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).³⁸

Vale ressaltar que a análise de perturbação não exige que as incertezas dos parâmetros estejam especificadas.³⁹ Esta abordagem faz uma análise da sensibilidade inerente dos resultados para cada parâmetro de entrada, sem considerar a incerteza real desses parâmetros. A análise de perturbação pode, portanto, ser realizada sempre que os resultados da ACV são produzidos, sem a necessidade de dados adicionais (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

A análise de incerteza é a abordagem na qual o estudo sistemático da propagação das incertezas dos valores de entrada em incertezas dos valores de saída será realizado. Uma análise de incerteza supõe que os parâmetros de incerteza estão disponíveis para todos os parâmetros de entrada, como processo de unidade dados, os fatores de caracterização, os fatores de normalização, ponderação, detalhes de alocação, e assim por diante (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

Todos os dados de entrada podem incluir informações sobre incertezas. Esta afirmação aplica-se para dados do processo da unidade, fatores de caracterização, fatores de normalização e fatores de ponderação. Todos os dados de entrada podem ser especificados na forma de uma função de densidade de probabilidade (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).⁴⁰

A análise comparativa pode ser descrita de forma resumida como a localização sistemática dos resultados de ACV para diferentes alternativas de produtos, simultaneamente. É uma análise simples, o que pode facilmente induzir a realização de alegações sem uma análise adequada da robustez desses créditos, com respeito à influência de incertezas envolvidas (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

³⁸ A extensão com que a perturbação de um parâmetro de entrada se propaga no resultado de um determinado parâmetro de saída pode ser interpretado como um multiplicador. Por exemplo, se for identificado que uma mudança de 1% do uso da eletricidade do processo de produção leva a 4% menos emissões de CO₂, uma consideração cuidadosa da eficiência elétrica parece natural. Inversamente, se uma variação de 1% do valor do transporte do produto leva ao uso de recursos apenas 0,001% a menos, parece ser melhor concentrar o processo de melhoria de itens diferentes do que os detalhes de logística (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

³⁹ Quando estimativas de incerteza de parâmetros de entrada estão disponíveis, estas estimativas são ignoradas na análise de perturbação, e seu uso é discutido nas seções sobre análise de incerteza e análise de discernibilidade.

⁴⁰ Na prática as duas distribuições mais utilizadas são a distribuição normal com média especificada e desvio padrão e a distribuição uniforme com menor e os maior valores especificados.

A ideia da análise de discernibilidade busca combinar a análise comparativa e a análise de incerteza. Esta abordagem só é aplicável quando as estimativas de incerteza estão disponíveis.

A Tabela 2 resume a aplicação das cinco abordagens numéricas apresentadas para a interpretação do ciclo de vida em relação à sua aplicabilidade ao longo das dimensões de um produto ou vários produtos e em relação à disponibilidade ou não das estimativas de incerteza.

Tabela 2 - Aplicação das cinco abordagens numéricas para a interpretação do ciclo de vida

	Apenas uma alternativa de produto	Mais de uma alternativa de produto
Estimativas de incerteza indisponíveis	Análise de contribuição Análise de perturbação	Análise comparativa
Estimativas de incerteza disponíveis	Análise de incerteza	Análise de discernibilidade

Fonte: HEIJUNGS; KLEIJN (2001)

Com base nesta análise das abordagens numéricas aplicadas a fase de interpretação, esta tese utilizará as análises de contribuição e perturbação. As análises de incerteza e de discernibilidade não foram realizadas porque necessitam dos parâmetros de incerteza, não disponíveis, para os parâmetros de entrada. A análise comparativa não foi realizada por se tratar de uma análise simples, o que pode facilmente induzir a realização de alegações sem uma análise adequada da robustez desses créditos, com respeito à influência de incertezas envolvidas.

2.2 O software CMLCA

A análise de ciclo de vida deste estudo foi realizada utilizando-se o *software* CMLCA (*Chain Management by Life Cycle Assessment*), desenvolvido por Reinout Heijungs, professor no Instituto de Ciências Ambientais (*Institute of Environmental Sciences - CML*) da Faculdade de Ciências da Universidade de Leiden. O CMLCA é um software que se destina a apoiar as etapas técnicas do processo de avaliação do ciclo de vida (ACV). O CMLCA foi criado com o objetivo de dar suporte a aulas e estudos de ACV e é periodicamente atualizado em relação aos detalhes metodológicos de uma ACV.

O CMLCA permite a realização de diferentes tipos de análises: ACV híbrida; análise de custo de ciclo de vida (*life cycle costing - LCC*) e *eco-efficiency analysis* (E/E); análise *input-output* (IOA), incluindo análise *input-output* ambiental

(*environmental input-output analysis* - EIOA); avaliação do ciclo de vida (*life cycle assessment* - LCA) e análise de sustentabilidade do ciclo de vida (*life cycle sustainability assessment* - LCSA). Ele não suporta os aspectos processuais, como revisão por pares, o envolvimento das partes interessadas, garantia de qualidade e utilidade da LCA para a decisão em jogo (LEIDEN UNIVERSITY, 2011).

O CMLCA utiliza a abordagem de álgebra matricial, o que representa uma grande vantagem em relação a fluxos de processo que apresentam estruturas recursivas, eliminando problemas computacionais e resolvendo o problema de forma exata. A Figura 7 apresenta a tela principal do software CMLCA, que é estruturada de forma a seguir as quatro etapas básicas de uma ACV.

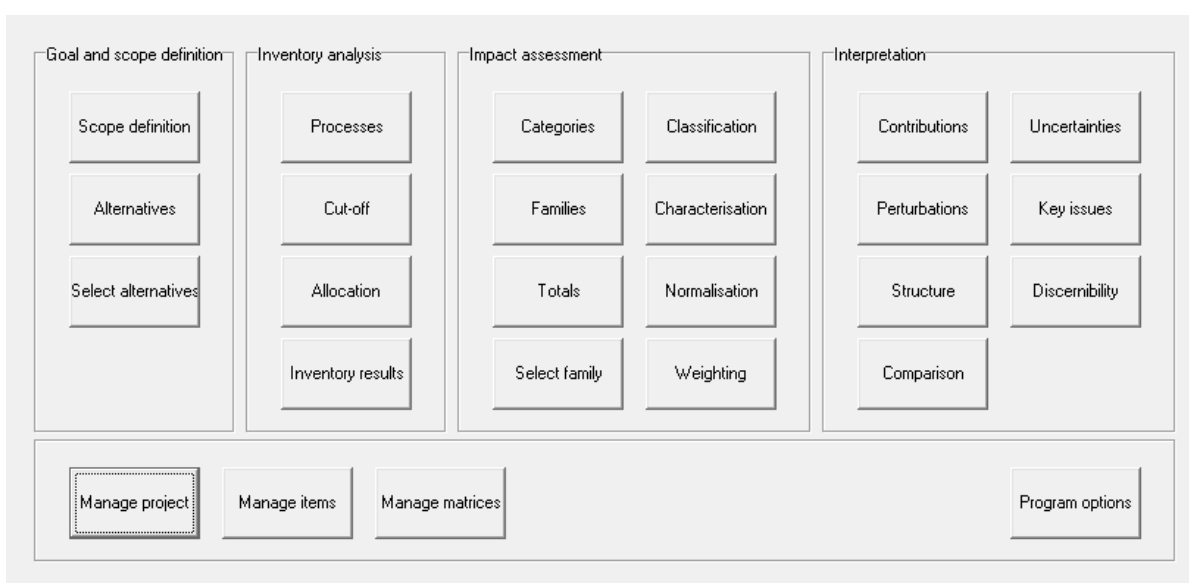


Figura 7 – Estrutura da tela principal do software CMLCA
 Fonte: Adaptado de HEIJUNGS (2011)

O programa é flexível para lidar com a alocação de processos múltiplos. Em contraste com outros *softwares*, os processos múltiplos não precisam ser atribuídos antes da sua entrada na base de dados, e o método utilizado para a alocação pode ser definido de forma individual, para cada unidade de processo. O programa também suporta inventários totalmente híbridos, compostos por fluxos de processos e matriz Insumo-Produto (LEIDEN UNIVERSITY, 2011).

Essas características foram decisivas na escolha do CMLCA para o estudo de caso desta tese, porque o autor pretende dar continuidade a este estudo, aplicando a análise híbrida.⁴¹

⁴¹ O autor da tese também participa de um curso sobre ACV e sobre as aplicações do software CMLCA. O curso, intitulado *Advanced Course on LCA*, é ministrado pelo próprio prof. Reinout Heijungs,

O software é gratuito e é disponibilizado sem nenhum dado.⁴² No entanto, é possível importar diversos formatos de dados e diferentes bancos de dados, por exemplo: o formato *EcoSpold*, que é utilizado pelos bancos de dados *Ecoinvent* e *NREL's U.S. Life-Cycle Inventory Database*; o formato *ELCD*, que é utilizado pela *European Platform on LCA*; o banco de dados *EXIOBASE*, que é utilizado pela projeto *EXIOPOL*; e o banco de dados CML-IA (HEIJUNGS, 2011).

O CML-IA *Characterisation Factors* é um banco de dados, disponibilizado de forma gratuita, que contém fatores de caracterização para a etapa da avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Impact Assessment - LCIA*) (LEIDEN UNIVERSITY, 2011).⁴³

2.3 O software IECM

As simulações dos processos da UTE a carvão sem CCS e da UTE a carvão com CCS (item 4.2.5) foram realizadas com o auxílio do *software Integrated Environmental Control Model - IECM*, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia e Meio Ambiente (*Center for Energy and Environmental Studies*) da *Technology Carnegie Mellon University* para o *US Department of Energy's National Energy Technology Laboratory* (CMU, 2011).

O IECM é um programa de modelagem computacional que realiza uma análise sistemática de custos e desempenho dos equipamentos de controle de emissões em plantas a carvão. O IECM permite a configuração da planta a ser modelada a partir de uma variedade de tecnologias, incluindo tecnologias de controle de poluentes e de captura de carbono.

Além das emissões evitadas o modelo também leva em consideração as emissões de poluentes, recursos utilizados na planta, custos de capital, operação e manutenção e a eficiência da planta. As incertezas e riscos tecnológicos também podem ser caracterizados.

O *software IECM* utiliza equações de balanço de massa e energia, juntamente com dados empíricos, para quantificar o desempenho global da planta, os insumos necessários e as emissões.

desenvolvedor do *software*, e é uma das disciplinas do programa de mestrado em Ecologia Industrial da Universidade de Leiden (*MSc Industrial Ecology, Leiden University and Delft University of Technology*).

⁴² O software está disponível em <http://www.cmlca.eu/>

⁴³ A base de dados CML-IA está disponível em <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

Os modelos de custo e desempenho disponíveis no IECM estão ligados a um conjunto de modelos de engenharia econômica e financeira que calculam o custo de capital e o custo de operação e manutenção (O&M) dos componentes individuais da planta. Estes modelos de desempenho e custo foram construídos com base em diversos estudos detalhados de engenharia econômica, resultando em um modelo geral cujos resultados são consistentes com outros estudos detalhados utilizando o mesmo conjunto de dados de entrada (BROEK, VAN DEN *et al.*, 2009; RIAHI *et al.*, 2005; RIAHI *et al.*, 2004; RUBIN, E. S. *et al.*, 2007).

Inicialmente, deve-se optar por uma das três tecnologias de geração: combustão em caldeira, GTCC e IGCC. Dentro de cada uma das opções, o modelo permite a configuração dos componentes básicos da planta, como controle de emissões de NO_x, SO_x e mercúrio. Em seguida, são determinados os parâmetros de operação de cada componente como, por exemplo: tipo e propriedade do combustível, a potência da UTE, a condição do vapor gerado, quantidade de excesso de ar na caldeira, etc. As limitações dos parâmetros de entrada também são indicadas pelo modelo, e geralmente é apresentado um valor de referência.

O modelo apresenta não só os resultados globais da planta (ex: entrada de combustível, emissões e consumo de utilidades), mas também os resultados por componente (ex: a vazão de exausto, o consumo de água, as condições de temperatura e pressão). Esta característica é importante, pois permite verificar os resultados acerca do desempenho, do custo e das condições financeiras de cada componente.

O software vem sendo utilizado em diversos artigos e estudos que verificam a influência da captura de CO₂ no desempenho das termoeletricas e com isso vem ganhando importância na literatura (BROEK *et al.*, 2009; RUBIN *et al.*, 2007).

Segundo ROCHEDO (2011), alguns estudos podem cometer equívocos em relação ao *retrofitting* da captura porque o IECM apresenta dados relativos a usinas novas, isto é, que ainda serão construídas. Isso vale para as plantas sem captura e para as plantas com captura. Ou seja, quando a captura é adicionada a uma UTE em um determinado caso base, o modelo reajusta os parâmetros e recalcula os equipamentos da UTE. Neste caso, o *retrofitting* de uma UTE para um caso real, que não irá adaptar a maior parte de seus equipamentos, provavelmente causa impactos maiores do que aqueles descritos pelo modelo. Assim, os efeitos resultantes da planta de captura (por exemplo, penalidade energética ou aumento de consumo de água e outras utilidades) devem ser analisados com cautela.

3 Estudo de Caso - Tecnologias da UTE e da Planta de Captura de CO₂

Segundo ILCD (2010a), especialmente para os processos do sistema de primeiro plano, uma descrição inicial deve ser realizada. Assim, nesta seção serão descritos brevemente os principais processos de uma UTE que foram utilizados nas simulações no IECM.

A escolha das tecnologias utilizadas na simulação procurou seguir alguns dados compatíveis com os dados de uma UTE real. No entanto, isso não implica em que todos os valores e/ou as escolhas tecnológicas representem exatamente os valores ou equipamentos adotados na UTE considerada. Os valores aqui simulados serão sempre compatíveis, porém, em busca do valor mais aproximado da planta real. Também serão descritos os componentes da planta de captura de carbono.

3.1 UTE a carvão sem captura de CO₂

Existem duas tecnologias nas quais praticamente toda geração elétrica mundial a carvão está baseada: a combustão convencional de carvão pulverizado (*Pulverized Coal* - PC), que é a tecnologia da planta considerada no estudo de caso, e a combustão em leito fluidizado circulante.

A tecnologia que utiliza a combustão de carvão pulverizado com condição subcrítica do ciclo de vapor é representativa para o caso brasileiro. Mesmo para países como os EUA, onde um grande número de plantas supercríticas foram construídas, nas décadas de 1970 e 1980, a maioria da frota existente ainda é composta por plantas subcríticas a carvão pulverizado (MIT, 2007).

Existem outras tecnologias de geração elétrica que são consideradas para a utilização da captura de CO₂. No entanto, o objetivo aqui é descrever a tecnologia que será considerada no estudo de caso.

A simulação procurou seguir dados compatíveis com os dados da UTE Itaquí, com o objetivo de simular uma planta semelhante à planta real. No entanto, isso não implica em que todos os valores e/ou as escolhas tecnológicas representem exatamente os valores ou equipamentos adotados na UTE. Os valores aqui simulados serão sempre compatíveis, porém, em busca do valor mais aproximado da planta real.

A UTE Porto de Itaquí, com capacidade instalada de 360 MW, está localizada em São Luís, Estado do Maranhão, ocupando uma área de aproximadamente 50 ha, localizada a 5 km do Porto de Itaquí e será acessível pela Rodovia Federal BR-135 no

Módulo G do DISAL.⁴⁴ A sua finalidade é fornecer energia elétrica ao Sistema Interligado Nacional - SIN (Região Norte/Nordeste).⁴⁵

A sua unidade de geração é composta por uma caldeira do tipo carvão pulverizado e pressão subcrítica que será fornecida pela empresa DOOSAN, com tecnologia da BABCOCK, com capacidade de 1.125 t/h e 90% de eficiência térmica (IBAMA, 2008). A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros de operação da caldeira na condição de operação máxima (MCR).

Tabela 3 - Parâmetros de operação da caldeira na condição de operação máxima (MCR)

Caldeira DOOSAN - PC	Unidade	Operação MCR
Capacidade de vapor	t/h	1.125
Pressão do vapor	MPa	17,5
Temperatura do vapor principal	°C	541
Capacidade de reaquecimento do vapor	t/h	938
Pressão de entrada do reaquecedor	MPa	3,75
Temperatura de entrada do reaquecedor	°C	327
Pressão de saída do reaquecedor	MPa	3,56
Temperatura de saída do reaquecedor	°C	541
Temperatura da água de alimentação	°C	277
Eficiência da caldeira	%	90

Fonte: IBAMA (2008)

3.1.1 Ciclo a Vapor

Em uma térmica a carvão pulverizado (PC) o carvão é queimado com o ar em uma caldeira para produzir vapor, que é utilizado em uma turbina para gerar eletricidade. Para ser pulverizado, o carvão passa por unidades onde é britado e moído até obter a consistência de um pó fino. O pó do carvão segue, então, para a caldeira por transporte pneumático, com uma corrente de ar pré-aquecida. O gás de exaustão da caldeira possui pressão próxima à pressão atmosférica e é constituído, principalmente, por N₂, H₂O e CO₂ (MIT, 2007). Usualmente o CO₂ apresenta uma concentração de 10% a 15 % v/v (LIU; GALLAGHER, 2010).

As condições de operação do ciclo a vapor influenciam a eficiência da planta. Aplicando-se condições mais severas de temperatura e pressão ao ciclo a vapor, é

⁴⁴ DISAL - Distrito Industrial de São Luís.

⁴⁵ Do total instalado, foram comercializados 315 MW médios no leilão A-5, em outubro de 2007. Esta negociação garantirá uma receita fixa durante 15 anos, a partir de 2012, de aproximadamente R\$ 252 milhões (base de setembro de 2009), indexada ao índice de inflação IPCA. Os custos de combustível, incluindo o impacto da variação cambial, serão repassados integralmente para o preço da energia, conforme prevê o PPA (Plano Plurianual). A UTE Itaqui tem contrato EPC (*Engineering, Procurement and Construction*) assinado com a MABE Construção e Administração de Projetos Ltda., uma sociedade entre as empresas Tecnimont e EFACEC. As turbinas serão supridas pela Siemens e as caldeiras pela Doosan Babcock (MPX, 2011a).

possível que sejam obtidos aumentos significativos de eficiência em relação ao ciclo convencional.

As termoeletricas podem ser classificadas em três configurações segundo as condições do vapor do ciclo: ciclo a vapor subcrítico, supercrítico e ultra supercrítico.

Termoeletricas com ciclo subcrítico são consideradas convencionais e o seu ciclo a vapor opera com pressões de vapor abaixo de 22 MPa e as temperaturas podem atingir aproximadamente 550° C. A eficiência de geração de unidades subcríticas se encontra numa faixa de 33% a 37% (PCS)⁴⁶ (MIT, 2007).

Termoeletricas que utilizam temperatura e pressões maiores no ciclo de vapor, ou seja, as termoeletricas que operam em condições supercríticas obtém uma maior eficiência de geração. Esse aumento é o resultado da variação de entalpia na turbina e consequentemente a geração de trabalho. As eficiências em plantas supercríticas operam com pressões de aproximadamente 24 MPa e 565 °C no ciclo de vapor (MIT, 2007).

As denominações de ciclo subcrítico e ciclo supercrítico derivam da definição do estado do vapor no ciclo a vapor. Abaixo do ponto crítico da água (374,12 °C / 221,2 bar), temperatura e pressão determinam se a água se encontra em fase líquida ou gasosa (Figura 8). Quando passa do ponto crítico, a fase de vapor e a fase de água são indistinguíveis, ou seja, a adição de pressão ou calor não leva a uma mudança de fase (SPLUNG, 2010).

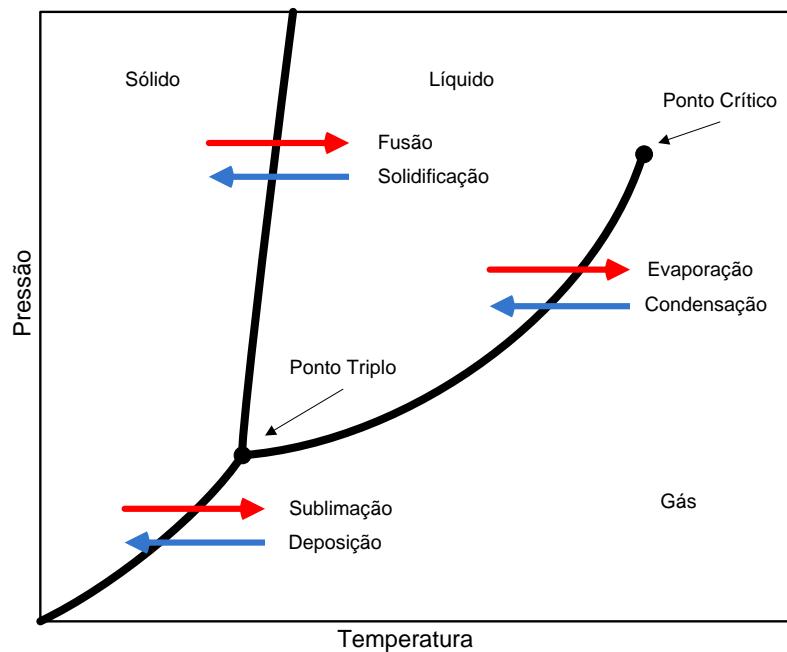


Figura 8 - Diagrama de fases da água
Fonte: Adaptado de (SPLUNG, 2010)

⁴⁶ Poder calorífico superior

Quando a UTE opera em condições subcríticas, o fluido de trabalho do ciclo a vapor se apresenta ou em fase líquida (água) ou em fase gasosa (vapor). Para sair da fase líquida e ir para a fase gasosa, a água precisa passar pelo processo de evaporação, o que exige a adição de calor. Esse calor é chamado de calor latente. O calor latente não resulta no aumento da temperatura do vapor, é utilizado apenas para promover a mudança de fase, ou seja, evaporar o líquido (Figura 9). Em condições supercríticas não há mudança de fase, resultando em um aumento considerável na eficiência da planta (STAUDINGER, 2010).

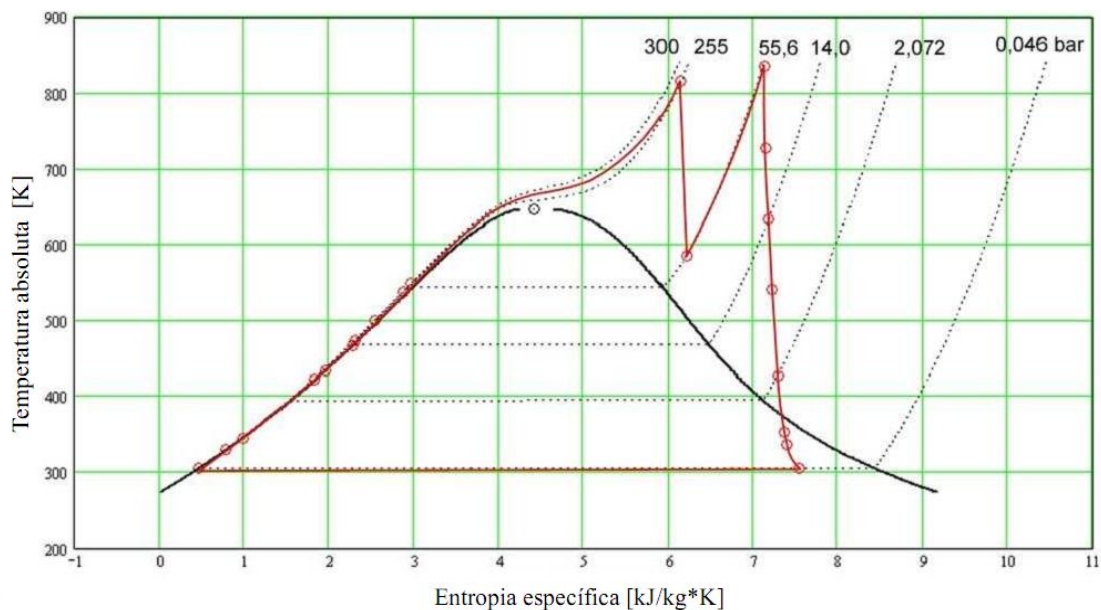


Figura 9 - Diagrama T-S do ciclo Rankine supercrítico
Fonte: STAUDINGER (2010)

Utiliza-se a expressão ultra supercrítico no contexto de plantas que operam em condições supercríticas. No entanto, do ponto de vista termodinâmico esse termo não faz sentido. Ele é utilizado apenas para diferenciar plantas supercríticas que operam em condições ainda mais severas que as primeiras plantas supercríticas.

Para realizar um ciclo a vapor supercrítico ou ultra supercrítico, as componentes do ciclo a vapor têm que resistir a pressões e temperaturas maiores. O desenvolvimento de novos materiais permite o aumento das faixas de pressão e temperatura de operação. No entanto, esses novos materiais geram um custo de capital maior, o que apresenta a principal barreira da tecnologia. Condições acima de 565 °C são referidas na literatura como ultra supercríticas. Diversas plantas ultra supercríticas, que operam com pressões de até 32 MPa e temperaturas até 600/610°C, foram

instaladas recentemente na Europa e no Japão. Nesta configuração, a eficiência pode alcançar a faixa de 44 a 46% (PCS)⁴⁷ (MIT, 2007).

3.1.2 Água de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento utilizado nas simulações será do tipo fechado com torre úmida.

Existem basicamente dois tipos de sistemas de arrefecimento chamado de ciclo aberto (*once-through*) e ciclo fechado (ou recirculação). Nos sistemas ciclo aberto a água é retirada de uma fonte (por exemplo, mar ou rio) e, após ser tratada e utilizada no arrefecimento da planta, a água retorna para a fonte. Estes sistemas exigem uma grande quantidade de água. Contudo, esta água não é consumida e retorna ao corpo hídrico do qual foi retirada (FEELEY III *et al.*, 2008).

Existem três configurações para o sistemas fechados ou de recirculação (FEELEY III *et al.*, 2008): torre úmida (recirculação úmida), *cooling ponds* (recirculação úmida) e *air cooled* (recirculação seca).

Este é um sistema representativo. Por exemplo, aproximadamente 42,7% das plantas americanas utilizam o sistema aberto (*once-through*), 41,9% o sistema fechado com torre úmida, 14,5% o sistema fechado de *cooling ponds* e apenas 0,9% utiliza o sistema fechado com recirculação seca (FEELEY III *et al.*, 2008).

Um sistema com torre de arrefecimento úmida, ainda precisa de pequenas quantidades de água, devido à evaporação. Uma pequena parte evapora levando ao resfriamento da água. Também ocorre o arrefecimento através da convecção com ar, que entra na torre pela parte inferior e tem o seu movimento forçado pelo seu aquecimento ao longo da torre. Como uma parte da água do ciclo a vapor evapora durante o processo, é preciso a contínua reposição da água. O consumo de água se encontra geralmente na ordem de grandeza de 2% (FEELEY III *et al.*, 2008).

Sistemas de arrefecimento com recirculação seca se aplicam em locais onde não há disponibilidade de água. Devido ao seu alto custo, este sistema é até hoje pouco utilizado em UTEs. Trata-se de torres nas quais a água do ciclo a vapor cede calor em trocadores de calor através da convecção com ar. Para forçar a convecção e aumentar a capacidade da instalação são instalados ventiladores, o que resulta em um maior consumo de energia. A penalidade energética, além do consumo elétrico dos

⁴⁷ Poder calorífico superior

ventiladores, também é resultado do fato de que o vapor não é esgotado até o mesmo ponto na turbina. O fluxo de vapor da turbina segue através dos tubos do condensador, que são resfriados pela transferência de calor com o ar que é soprado pelos ventiladores na superfície externa do condensador. Nesse caso, não é necessário o uso de água (FEELEY III *et al.*, 2008).

3.1.3 Redução e remoção de contaminantes

Além do N_2 , H_2O e CO_2 que são os principais componentes do gás de exaustão da caldeira, que se encontra em pressão ambiental, estão presentes vários contaminantes no gás de exaustão. Estes contaminantes podem ter efeitos negativos para o meio ambiente e precisam, portanto, ser removidos antes da emissão do exausto para a atmosfera. Trata-se em primeiro lugar dos compostos SO_x , NO_x , e material particulado. As taxas de emissão desses poluentes são função principalmente das características químicas dos combustíveis, das tecnologias de combustão utilizadas e da eficiência do ciclo térmico (HOFFMANN, 2010; ROCHEDO, 2011).

Para a redução de contaminantes no exausto existem diversas tecnologias, algumas são aplicadas durante o processo de combustão e outras após a combustão. Nas seções subsequentes, as soluções mais aplicadas são brevemente descritas, na sequência em que são geralmente arranjadas na UTE (HOFFMANN, 2010; ROCHEDO, 2011).

3.1.3.1 Controle de NO_x

A principal origem de NO_x no gás de exaustão de uma UTE é oxigênio e o nitrogênio do ar de combustão. Esse NO_x é chamado de NO_x térmico, dado que ele se forma somente a temperaturas muito elevadas, a partir de aproximadamente $1.250\text{ }^\circ\text{C}$ (IEA, 2010b).

A taxa de formação de NO_x aumenta de forma exponencial com a temperatura de combustão. A quantidade de O_2 disponível no processo de combustão e o tempo de retenção também têm um efeito sobre a formação de NO_x térmico. Além do NO_x térmico existem outros mecanismos de formação de NO_x , especialmente a partir de compostos de nitrogênio contido no combustível. No entanto, essas quantidades são geralmente pequenas em relação ao NO_x térmico (IEA, 2010b). Para a redução de emissões de NO_x são aplicadas tanto métodos de controle durante a combustão, quanto métodos de remoção pós-combustão.

As simulações foram realizadas considerando-se a remoção de NO_x durante a combustão (*in-furnace control*). Existem outros métodos de remoção de NO_x durante a combustão e pós-combustão, que podem ser utilizados separadamente ou em conjunto.

3.1.3.1.1 Controle durante a combustão

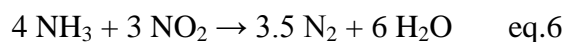
O controle durante a combustão é realizado através de tecnologias que se baseiam no controle de temperatura de queima, disponibilidade de oxigênio e tempo de retenção na fornalha. A medida mais aplicada é a instalação de combustores *low NO_x*, as vezes em combinação de estagiamento de ar (*air staging*) ou estagiamento de combustível (*fuel staging*), ou seja, a formação de diferentes áreas dentro da fornalha, que permitem que o NO_x seja reduzido no gás de exaustão (IEA, 2010b).

Combustores *low NO_x* são projetados para controlar a mistura de combustível e ar para gerar chamas maiores e mais ramificadas. Assim atinge-se uma redução da temperatura de pico da chama e uma redução de formação de NO_x. A otimização da estrutura da chama também reduz a quantidade de oxigênio disponível na parte quente da chama. Além disso, com a possibilidade de controle de ar, podem ser realizadas diferentes áreas na fornalha (*air-staging*). A configuração mais comum é a formação de dois estágios. No primeiro, o combustível é queimado numa atmosfera pobre em oxigênio, o que leva a uma combustão incompleta a baixa temperatura, e, portanto, com baixa taxa de formação de NO_x. No segundo estágio, ar é injetado na fornalha e a combustão é completada nessa área de chama adicional. Nesse segundo estágio, o nível de temperatura também permanece baixo. A realização da combustão completa depende da injeção e mistura do ar secundário. Experiências na prática mostraram que a aplicação de combustores *low NO_x* com outras medidas, como a aqui descrita, podem alcançar reduções de até 74 % (IEA, 2010b).

3.1.3.1.2 Controle Pós-Combustão

Além de métodos aplicados durante a queima existem dois métodos pós-queima que são utilizados em plantas de grande porte, chamados de redução seletiva não catalítica (*Selective Non-catalytic Reduction - SNCR*) e redução seletiva catalítica (*Selective Catalytic Reduction - SCR*) (IEA, 2010b).

No processo SNCR, um agente de redução, amônia⁴⁸, é injetado no gás de exaustão a temperaturas entre 800 e 1100°C . O NO_x é reduzido pela seguinte reação (eq. 6)



No processo SCR, o vapor de amônia é injetado na corrente de gás de exaustão, que logo em seguida passa por um catalisador. Esse catalisador pode ter diferentes composições, se baseando em óxido de titânio, zeólita óxido de ferro ou carvão ativado. Em UTEs usam-se principalmente catalisadores misturas de óxido de vanádio e óxido de titânio. A temperatura ótima desse processo se encontra entre 300 e 400 °C e a taxa de conversão entre 80 e 90 % (NETL, 2007).

A vantagem principal do processo SNCR, quando comparado com o processo SCR, encontra-se no fato de poder evitar a instalação de um catalisador, cujo custo de material é geralmente alto. Porém, esse método não atinge boas taxas de conversão (30 – 50%), e ainda apresenta problemas por provocar emissões de amônia (*amonia slip*) e a formação de N₂O, que representa um gás de efeito estufa (IEA, 2010b).

As duas tecnologias foram introduzidas já antes da década de 1990 para UTEs a carvão. Especialmente na Alemanha e no Japão existe ampla experiência com essas tecnologias (IEA, 2010b).

Um sistema típico de SCR consiste num tanque de estocagem de amônia ou ureia, o equipamento de injeção e controle, e a câmara do catalisador. Ademais é preciso um sistema de controle de temperatura do ar e um sistema de limpeza do catalisador (IEA, 2010b).

3.1.3.2 Remoção de material particulado

Durante a combustão do carvão, as impurezas inorgânicas são convertidas em cinzas. A parte formada por cinzas pesadas é retirada pelo fundo da caldeira e são chamadas de *bottom ash*. As partículas mais leves, que permanecem em suspensão no gás de combustão, são chamadas de cinzas volantes (*fly ash*). As cinzas volantes

⁴⁸ Existe também a possibilidade de utilizar ureia (H₂N-CO-NH₂) em vez de amônia (NH₃). A ureia, quando injetado na corrente de exaustão reage por hidrólise para NH₃ e CO₂. A vantagem da aplicação de uréia se encontra no fato que a estocagem e manobra de ureia são mais fáceis que a de amônia.

constituem material particulado primário, que segue para o dispositivo de controle de particulado (IEA, 2010b).⁴⁹

As tecnologias mais utilizadas para a remoção de material particulado são a remoção por filtros de manga e a remoção por precipitadores eletrostáticos. A escolha entre essas tecnologias depende geralmente do tipo de carvão, tipo de caldeira e do tamanho da planta. Os dois métodos são altamente eficientes e alcançam geralmente taxas de remoção maiores de 99,5% (EPA, 2010). Abaixo estão descritos estes dois métodos, filtros manga e precipitadores eletrostáticos.

3.1.3.2.1 Filtros Manga

Os filtros manga operam geralmente em temperaturas entre 120 e 180 °C e podem ser divididos entre três tipos, dependendo do método de regeneração do filtro. A regeneração consiste na remoção do material particulado que foi retido no filtro. A regeneração do filtro pode ocorrer pelo método *reverse gas*, que utiliza um gás limpo para percorrer o filtro na direção invertida do fluxo do exausto, retirando o material particulado; pelo método *shake and deflate*, que interrompe a corrente de gás para provocar a deflação do filtro e em seguida agita-o; ou pelo método *pulse jet*, que aplica jatos de gás pulsantes (EPA, 2010).

A principal desvantagem no uso de filtros manga é a queda de pressão provocada pelos mesmos. O Filtro de manga aumentou sua participação de mercado durante as últimas décadas, principalmente em aplicações industriais fora do setor elétrico (EPA, 2010).

3.1.3.2.2 Precipitadores eletrostáticos

Os precipitadores eletrostáticos (ESP) usam campos heterogêneos de alta voltagem para carregar partículas que se movem através do campo com cargas elétricas. As partículas carregadas se movem então para a parede de carga oposta, onde se acumulam. Existem três tipos principais para a precipitadores eletrostáticos: precipitadores secos, negativamente carregados, precipitadores de paredes úmidas

⁴⁹ O MP primário é gerado por uma variedade de processos químicos e físicos e é emitido para a atmosfera através da combustão, por processos industriais, emissões fugitivas e fontes naturais. O MP secundário é formado na atmosfera, por meio da condensação de gases é predominantemente encontrado na forma fina. O MP é em geral referido como MP, MP10, MP2.5 (MP com um diâmetro aerodinâmico equivalente a 10 microns ou menos e 2,5 microns ou menos, respectivamente).

negativamente carregados e precipitadores de dois estágios positivamente carregados (EPA, 2010; IEA, 2010b).

Os precipitadores secos negativamente carregados são os mais aplicados em UTEs a carvão. Entre esses existem os precipitadores quentes e os precipitadores frios. Precipitadores frios operam geralmente na mesma faixa de temperaturas que o filtro manga. Precipitadores quentes operam em faixas por volta de 300 a 450°C. Esses, porém, não são mais aplicados desde os anos 90 (EPA, 2010; IEA, 2010b).

O ESP é a tecnologia que mais é aplicada em UTEs a carvão. Espera-se a manutenção dessa tendência nas próximas décadas (EPA, 2010; IEA, 2010b).

O material particulado que é retirado nessa unidade, principalmente cinzas volantes, é transportado para o silo de cinzas volantes, ou para o recipiente de cinzas mistas. O transporte das cinzas ocorre geralmente através de um sistema pneumático (NETL, 2007).

3.1.3.3 Remoção de SO_x

Nas usinas termelétricas, os óxidos de enxofre são gerados durante a combustão devido à oxidação do enxofre presente no combustível.⁵⁰ Assim, o teor de SO_x no exausto é sempre diretamente proporcional ao conteúdo de enxofre do combustível. As emissões de SO_x dos sistemas convencionais se apresentam principalmente na forma de SO₂ (EPA, 2010).

Existem diferentes tecnologias para a remoção de compostos de enxofre (*Flue Gás desulfurization* - FGD). As tecnologias atualmente mais aplicadas são a dessulfurização úmida e a dessulfurização com um *spray dryer*, sendo que a dessulfurização úmida possui uma participação de mercado consideravelmente maior, aproximadamente 80% (IEA, 2010b). O sistema de dessulfurização escolhido é denominado SDA - *Spray Dryer Absorber*. As duas principais tecnologias estão descritas abaixo.

3.1.3.3.1 A dessulfurização úmida

Na dessulfurização úmida são utilizados solventes em base de um *slurry* de cálcio, sódio ou amônia. O solvente preferido para essa reação é a cal, seguido por

⁵⁰ Carvão contém enxofre em diferentes formas, na forma de sulfetos inorgânicos e como compostos orgânicos.

calcário. Esses são favorecidos por causa da sua disponibilidade e seu baixo custo. A seguinte reação química (eq. 7) ocorre com um solvente em base de calcário (IEA, 2010b):



O processo ocorre normalmente em uma coluna, onde o exausto entra no fundo e o *slurry* em diferentes níveis da torre. Ar é aspergido no *slurry*, que se acumula no fundo da coluna, para promover a oxidação de sulfito de cálcio para sulfato de cálcio (gesso). O teor dos sólidos do *slurry* é concentrado a 90 % por hidrociclones ou filtros. As águas residuais do processo precisam ser tratadas.

Lavadores úmidos podem atingir eficiências de remoção de até 99 %. Os *scrubbers* úmidos cal/calcário/gesso estão atualmente ultrapassando as outras tecnologias, especialmente por causa da sua característica de produzir gesso como coproduto, em vez de resíduos que precisam ser depositados. Dependendo do mercado regional, o gesso pode gerar um lucro adicional para a planta. Um lavador exige normalmente um revestimento de borracha, aço inox ou liga de níquel para controlar corrosão e abrasão.

3.1.3.3.2 A dessulfurização com Spray Dryer

Na dessulfurização com um *spray dryer absorber (SDA)*, o reagente típico é a cal (CaO). O *slurry* de cal, também chamado leite de cal, é atomizado dentro de um vaso onde a reação com o SO₂ do exausto ocorrerá. No primeiro passo, a água evapora através do calor do gás de exaustão. O tempo de retenção de cerca de 10 segundos é suficiente para que o SO₂ e SO₃, que se encontram no exausto, reajam com a cal e formem uma mistura de sulfato e sulfito de cálcio. Assim, o tratamento de águas residuais não é necessário em *spray dryers*, pois toda a água que entra no reator é evaporada. O coproduto ainda contém cal, que não reagiu, e que pode realimentar o processo. Os parâmetros que afetam a eficiência desse processo são a temperatura do gás de exaustão, a concentração do SO₂ no gás de exaustão e o grau de atomização do *slurry* no reator (IEA, 2010b).

O reator pode ser fabricado de aço comum, o que mantém o custo de material baixo, mas o consumo de cal relativamente alto provoca um alto custo de operação.

3.2 UTE a carvão com captura de CO₂

Existem três rotas de captura de CO₂, que são classificadas na literatura de acordo com o ponto no qual o CO₂ é capturado em uma UTE. Essas três rotas, que vêm sendo consideradas em diversos artigos, desenvolvimento e plantas de demonstração, para a captura são (KANNICHE *et al.*, 2010):

- Pós-combustão
- Pré-combustão
- Oxi-combustão

As condições do fluxo de gás que contém o CO₂ são distintas para cada um dos três métodos. Também pode haver variação nas condições entre plantas que utilizam a mesma rota em função, por exemplo, do tipo de carvão que é utilizado.

A rota utilizada neste estudo foi a rota de pós-combustão. A seleção da rota e da tecnologia de captura depende de diversos fatores como, por exemplo, a pressão parcial de CO₂ no gás de exausto, a taxa de captura a ser atingida, a regeneração do solvente, a sensibilidade às impurezas como gases ácidos, a presença de material particulado, a pureza requerida para o CO₂, os custos de capital e operação e manutenção, os custos dos aditivos necessários para superar o problema de *fouling* e corrosão e os impactos ambientais (KANNICHE *et al.*, 2010).

A comparação entre as características dos gases de exaustão de uma UTE a carvão pulverizado com as condições mais adequadas para as tecnologias de captura de CO₂ mostra que as tecnologias de captura mais promissoras para a configuração na pós-combustão são: a captura com absorção química, a captura com adsorção e a captura com membranas.⁵¹

A absorção química é o método que efetivamente pode ser utilizado atualmente para as plantas existentes, portanto pode ser considerado para o *retrofitting* (FERON, 2010).

⁵¹ Foge ao escopo desse trabalho realizar a comparação detalhada para a escolha da melhor tecnologia. A decisão pela configuração de captura na pós combustão com absorção química foi baseada em outros estudos: (FERON, 2010; FIGUEROA *et al.*, 2008; OLAJIRE, 2010a). A comparação entre as tecnologias de queima e de captura também foi realizada em uma das etapas do projeto " Estado-da-Arte da Captura e Armazenamento de Dióxido de Carbono proveniente de UTES a Carvão", do qual participei. O relatório foi elaborado pela COPPE em 2010 para a MPX e a equipe incluiu os pesquisadores: Pedro Rochedo, M.Sc., Paulo Roberto de Campos Merschmann; M.Sc, Rômulo Ely, M.Sc; e Susanne Hoffmann, M.Sc.

No período em que esta tese foi realizada, a configuração de pós-combustão utilizando a absorção química com MEA para a captura de CO₂ em uma UTE a carvão pulverizado (*Pulverized Coal – PC*) convencional existente era a mais madura e a mais indicada para o estudo de caso.

Apesar de ser a tecnologia mais madura para a separação de CO₂, e por este motivo ter sido escolhida para o estudo de caso, a utilização do solvente MEA é um processo difundido em diversas indústrias apenas em pequena escala.⁵² O aumento de escala e integração desses processos é muitas vezes acompanhado por questões operacionais e de aumento de custos (BLOMEN *et al.*, 2009).

A captura na pós-combustão pode ser vista como um processo *add-on* a planta de geração de energia e é similar a outros tratamentos de gás que podem já estar presentes na planta sem captura (FERON, 2010).

Essa característica faz com que a configuração de pós-combustão seja o mais fácil para ser implantado em usinas existentes, seja a rota com o maior potencial de aplicação à captura de CO₂ no curto prazo no mundo e também possa ser adaptada a vários níveis de captura (CIFERNO *et al.*, 2009).

Uma planta de geração de energia com captura de CO₂ na pós-combustão possui duas etapas principais: uma etapa de conversão de energia, onde será obtida a energia elétrica, seguida pela etapa de separação de CO₂, onde será obtida a corrente de CO₂ (FERON, 2010).

O CO₂ é removido de uma mistura composta basicamente de CO₂ e N₂, mas as impurezas presentes nos gases de combustão (SO_x, NO_x, particulados) também precisam ser levadas em consideração (FERON, 2010).

No método de pós-combustão o CO₂ está presente em baixas concentrações, aproximadamente de 13% a 15% v/v nas plantas a carvão,⁵³ e a baixa pressão, aproximadamente 1 bar, o que determina que um grande volume de gás seja tratado (BLOMEN *et al.*, 2009). A necessidade de tratamento de um volume maior de gases leva a utilização de equipamentos maiores e a um maior consumo de energia (OLAJIRE, 2010a).

⁵² Por exemplo, no processamento de gás natural ou em instalações de produção de amônia. O aumento de escala (*scaling-up*) necessário para a utilização em plantas de geração de energia está na ordem de 10 vezes. A maior unidade operacional tem uma capacidade de 800 toneladas de CO₂ por dia (IMC Global Inc. em Trona, Califórnia, EUA), enquanto que uma planta de 500 MWe de carvão pulverizado PC, produz cerca de 8.000 toneladas de CO₂/dia.

⁵³ Usualmente o CO₂ apresenta uma concentração de 10% a 15 % v/v (LIU; GALLAGHER, 2010). Ver item 3.1.1.

A confiabilidade operacional é uma condição que também deve ser considerada na escolha de uma tecnologia. As plantas a carvão possuem uma alta confiabilidade, o que é altamente valorizado na indústria de energia elétrica, tanto do ponto de vista do consumidor quanto do fornecedor. O ponto importante aqui não é fazer uma avaliação detalhada sobre a confiabilidade dos sistemas, mas sim destacar uma característica da rota utilizada, que pode representar uma vantagem do ponto de vista operacional. Por exemplo, sistemas de pós-captura, podem apresentar dificuldades na operação sem que afete a parte de geração de energia da planta. Ou seja, saber se a planta pode continuar operando enquanto o sistema de captura não está em operação.

Outro fator importante na escolha da tecnologia de captura é o seu *footprint*. Nem sempre uma planta dispõe de área suficiente para a instalação do sistema de CCS, que inclui a planta de captura e a compressão do CO₂.

O processo de absorção química utiliza grandes equipamentos, que influenciam o preço da planta de separação e aumentam o *footprint* da planta, como um todo, em aproximadamente 60% para as plantas que já possuem tratamento de enxofre. Portanto, o *footprint* da planta de captura representa uma desvantagem do método de pós-captura. Por exemplo, no estudo PARSONS *et al.* (2002) os valores de *footprint* de uma planta PC (*battery limits*) sem captura e com captura de CO₂ utilizados são, respectivamente, 60 m²/MW e 94 m²/MW.

3.2.1 Penalidade Energética

Uma desvantagem do método de pós-combustão é a penalidade energética causada pela energia utilizada no processo de absorção química e a energia necessária para a compressão do CO₂ capturado para que este seja transportado por dutos⁵⁴ para um local de armazenamento (RAO, 2002; ROCHEDO, 2011).

A penalidade energética é uma das maiores implicações do uso da tecnologia CCS nas plantas de geração elétrica. O significativo aumento da energia adicional necessária para o sistema CCS está relacionado a implicações no consumo de combustível total da planta, emissões de gases de efeito estufa, no tempo vida dos recursos (que são finitos) e no custo final da energia produzida (PAGE *et al.*, 2009).

A penalidade energética é a redução da energia disponível para a geração de energia elétrica devido ao consumo parasítico de energia da planta de captura. Alguns

⁵⁴ Existem outras formas de transporte, ver item 3.2.4.

estudos utilizam a penalidade de eficiência que mostra a redução em pontos percentuais da eficiência da planta.⁵⁵

A eq.8 apresenta a Penalidade Energética (PE), que é perda proporcional na potência de saída da planta em referência ao caso base sem a utilização do CCS.

$$PE = \frac{(\text{Potência de saída sem o CCS} - \text{Potência de saída com o CCS})}{\text{Potência de saída sem o CCS}} \times 100 \quad \text{eq.8}$$

A eq. 9 apresenta a Penalidade de Eficiência ($P_{ef.}$), que é a redução na eficiência da planta em pontos percentuais.

$$P_{ef.} = \text{Eficiência sem o CCS (\%)} - \text{Eficiência com o CCS (\%)} \quad \text{eq.9}$$

Por exemplo, valores de penalidade energética estimados para plantas PC com captura se encontram no intervalo entre 15 e 28%. As penalidades de eficiência são mais comumente simuladas na literatura e se encontram no intervalo de 8 a 16% (PAGE *et al.*, 2009).⁵⁶

O estudo de OLAJIRE (2010a) salienta que, embora a penalidade energética da captura pós-combustão esteja entre 25 e 35%, ela parece viável para aplicação de *retrofitting*, já que exige apenas pequenas alterações na parte de combustão da planta.

A redução na eficiência da planta resulta em um aumento proporcional no consumo de recursos por unidade de eletricidade gerada e aumentos ainda maiores no consumo de água de refrigeração por unidade de eletricidade (FERON, 2010; RAO, 2002). Assim, para a obtenção da mesma quantidade de energia líquida que a obtida na planta sem captura de CO₂, seria necessária a construção de uma planta de maior capacidade com captura de CO₂ (RAO, 2002).

A revisão de literatura realizada em PAGE *et al.* (2009) mostra que todos os resultados obtidos para a penalidade energética e penalidade de eficiência (Tabela 4) são derivados exclusivamente de simulações e estudos de custo e que a demanda de energia de processo é, em grande parte, citações de trabalhos anteriores ou derivados de

⁵⁵ Em ROCHEDO (2011) foi realizado um estudo detalhado sobre as fontes das penalidades na captura de CO₂.

⁵⁶ As diferenças reportadas na literatura são atribuídas ao tipo de planta, a eficiência da planta, a tecnologia de captura utilizada, ao estado final do CO₂ e o percentual do CO₂ capturado (PAGE *et al.*, 2009).

cálculos. Geralmente os dados utilizados não foram submetidos à literatura revisada (*peer-reviewed*) ou não são dados publicamente acessíveis.

Tabela 4 - Penalidades energéticas e de eficiência para a captura de carbono para plantas

Método de captura	Condição final do CO ₂	Penalidade Energética (%) ⁽¹⁾	Penalidade de eficiência (%) ⁽²⁾	Origem dos dados ⁽³⁾
Absorção (MEA)	Comprimido (2200 psi), bombeado (400 milhas) profund.de injeção (1500 ft)	34,5; 35,1	11,9; 12,0	Simulação/análise de custo
Absorção (MEA)	n.d	----	8 - 11	n.d.
Absorção (KS2)	n.d.	17,2	----	Simulação
Absorção (KS2)	Comprimido, 10 MPa	15; 25	10,3 ; 6,3	Citação
Absorção (MEA)	Comprimido, 11MPa	----	9,2	Simulação
Absorção (MEA)	Comprimido, 11MPa	24,8 – 27,7	11,3 – 12,6 ⁽⁴⁾	Análise de custo
Absorção (KS1)	Comprimido, 11MPa	----	8,4	Simulação
Absorção (KS2)	Comprimido, 11MPa	20,0 – 22,5	9,1 – 10,3 ⁽⁴⁾	Análise de custo
Absorção (KS2)	n.d.	----	Aprox. 9	Citação
Absorção (MEA)	Comprimido, 10MPa	---	9,2	Simulação
Absorção (MEA)	n.d.	----	Aprox. 9	Citação
Absorção (MEA) ⁽⁵⁾ plantas novas	Comprimido, 8,4 MPa	----	12,1; 12,3	Citação
	Comprimido, 13,7 MPa	----	9,6	Citação
	Comprimido, 11,0 MPa		9,2	Citação
	Comprimido, 13,9 MPa		9,8	Citação
	Comprimido, 10,3 MPa		11,0	Citação
	Comprimido, 13,9 MPa		10,7	Citação
	Comprimido, 13,9 MPa		11,6	Citação
Absorção (MEA) ⁽⁶⁾ <i>retrofitting</i>	Comprimido, 13,7 MPa		10,9	Citação
	Comprimido, 13,9 MPa		14,9	Citação
	Comprimido, 13,9 MPa		15,2	Citação
	Comprimido, 13,9 MPa		14,4	Citação
	Comprimido, 10,0 MPa	25	12,0	Citação
Absorção (MEA)	Comprimido, 13,7 MPa	----	9,4	Citação
n.d.	n.d.	24,0; 29,1	9,4; 10,9	Citação

Fonte: Adaptado de PAGE *et al.* (2009)

Notas: n.d. = não disponível; (1) Penalidade energética; (2) Penalidade de eficiência; (3) Citação – dados obtidos em outro(s) estudo(s); simulação = modelagem matemática sem verificação ou validação; (4) Calculado pelo estudo PAGE *et al.* (2009); (5) Estimado para plantas PC novas; (6) Estimado para plantas PC submetidas a *retrofitting*.

As simulações realizadas no estudo de PAGE *et al.* (2009) levaram a valores de penalidade energética e de penalidade de eficiência (Tabela 5) maiores que os valores encontrados na revisão da literatura por diversas razões. Primeiro as simulações assumiram a captura de 100% do CO₂, a sua compressão e liquefação. No entanto assumindo uma captura de 90% e uma compressão de 11 MPa do CO₂ capturado, os resultados obtidos para a penalidade de eficiência e energética foram de 37,2% e 11,7%, respectivamente. O principal fator que contribui para esta diferença é a eficiência da

planta sem o CCS. Na maioria dos estudos são consideradas plantas supercríticas ou ultra-supercríticas, com eficiência na ordem de 40%.⁵⁷

Tabela 5 - Penalidades energéticas de um caso prático

Processo	Energia (MJ/kg-CO ₂)	Penalidade Energética (%)	Penalidade de eficiência (%)
Separação			
Perda por uso do vapor	0,500	15,1	4,76
Consumo parasítico	0,470	14,2	4,48
Compressão 2 MPa	0,307	9,3	2,92
Compressão 10 MPa	0,464	14,0	4,42
Arrefecimento	0,330	10,0	3,14
Penalidade total (100% de captura)			
Liquefação	1,61	48,6	15,3
Alta pressão	1,44	43,5	13,7

Fonte: PAGE et al. (2009)

Outro fator para a diferença encontrada é o tipo de carvão utilizado. O estudo de PAGE *et al.* (2009) utilizou o carvão linhito com energia de 10,5 MJ/kg de CO₂ emitido, enquanto outros estudos utilizam tipos de carvão de melhor qualidade, sub-betuminoso ou betuminoso, que possuem um conteúdo energético maior por unidade de CO₂ emitido menor que o conteúdo energético dos tipos utilizados em cenários supercríticos ou ultra-supercríticos.

Vale ressaltar como os resultados das penalidades energéticas dependem da eficiência da planta, do percentual de CO₂ capturado e do tipo de carvão utilizado, que influencia a máxima eficiência da planta de geração de energia.

3.2.2 Princípios da captura pós-combustão com absorção química

A captura de carbono por absorção química apresenta um processo convencional de absorção em que o solvente reage, de forma reversível, com o soluto, no caso, o CO₂. O processo envolve duas etapas, uma etapa de absorção, na qual o CO₂ é transferido do gás de exaustão para o solvente, e em seguida uma etapa de dessorção (*stripping*), onde ocorre a regeneração do solvente e recuperação do CO₂, que retorna para a fase gasosa. Por ser um processo com alta seletividade, o processo químico pode ser utilizado para baixas concentrações de soluto, o que é o caso na aplicação de captura de carbono de gases de exaustão de UTEs convencionais. Então, a absorção química não intervém no processo da UTE, mas é um processo *end-of-pipe*, ou seja, um processo

⁵⁷ Vale lembrar que apenas uma pequena parcela, 155 GW, da capacidade global de geração de 1.142GW é obtida por plantas supercríticas ou ultra-supercríticas. Desse total, 970 GW de plantas subcríticas e 17GW de plantas utilizando leito fluidizado circulante.

que é adicionado no final dos processos já existentes (REDDY *et al.*, 2008). A Figura 10 mostra um esquema simplificado das etapas e equipamentos.

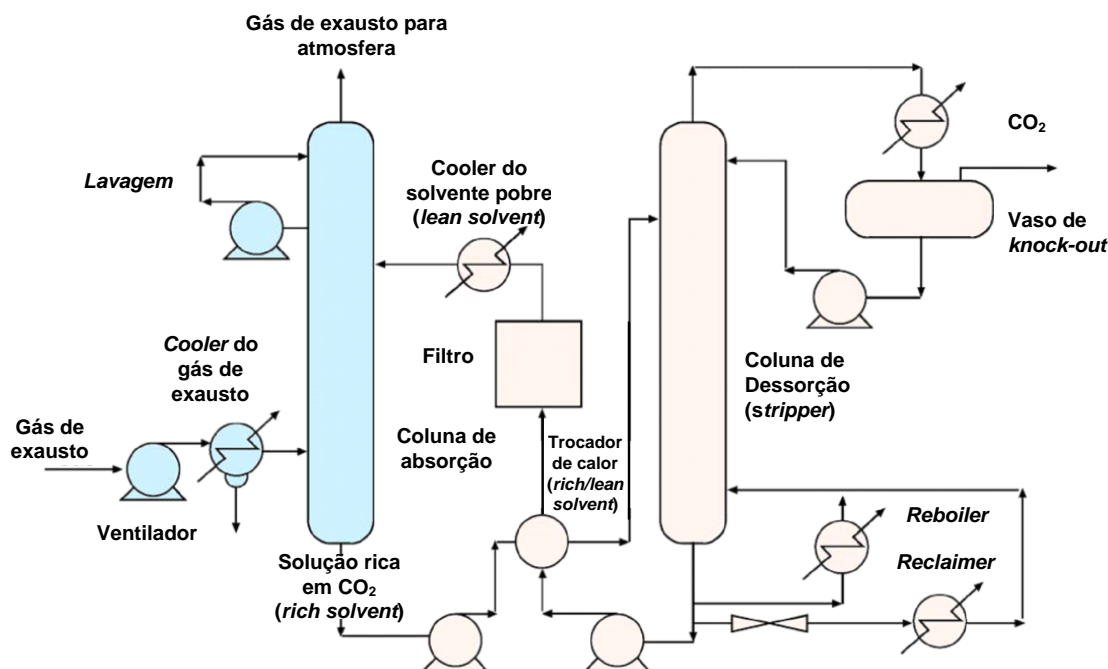


Figura 10 - Esquema típico de um sistema de absorção para a recuperação de CO₂ de gases de combustão
Fonte: FERON (2010)

Na etapa da absorção, os gases de exaustão da UTE seguem um fluxo ascendente na coluna de absorção, em contracorrente do solvente químico. O solvente reage quimicamente com o CO₂, presente no gás de exaustão, formando um composto com ligação fraca (carbamato). Os gases purificados (*scrubbed gases*), sem a presença de CO₂, são lavados e ventilados para a atmosfera (RAO, 2002).

A solução rica em CO₂ deixa a coluna de absorção e segue por um trocador de calor para que sua temperatura seja elevada e, em seguida, para a coluna de regeneração. Após a primeira passagem na coluna a solução passa pelo *reboiler* que fornece o calor necessário para a regeneração do solvente. O composto fracamente ligado, que foi formado durante a absorção, é quebrado pela aplicação de calor, e um fluxo concentrado de CO₂ é produzido (RAO, 2002). O solvente é resfriado num trocador de calor antes de ser enviado para a coluna de absorção. Para fins de transporte e armazenamento, o CO₂ é secado e comprimido.

Segundo HERZOG (2009), a escolha do solvente deve ser baseada em algumas características como:

- Uma alta capacidade de absorção permite uma maior eficiência na operação e pode reduzir o volume requerido de solvente e as dimensões dos equipamentos e, conseqüentemente, os custos necessários para o bombeamento.
- Uma baixa volatilidade evita que haja perdas relevantes de solvente por evaporação durante o processo de regeneração.
- Uma baixa viscosidade, para que a velocidade de absorção e a transferência de calor sejam elevadas e o consumo de energia para o bombeamento seja reduzido.
- Um baixo custo do solvente e de O&M dos equipamentos necessários.
- Maior estabilidade química. Os solventes com resistência a degradação reduzem os custos de reposição (*make-up*) e reduzem os custos de *clean-up* do gás nos estágios anteriores ao sistema de absorção.
- Uma baixa corrosividade evita a diminuição da vida útil dos equipamentos ou evita o uso de materiais mais caros na construção dos equipamentos.
- Baixo consumo de energia na regeneração

Para compensar a degradação das aminas é necessária a adição de uma etapa de destilação das aminas, visando à remoção de subprodutos da sua degradação, e a adição constante de nova carga de amina ao sistema. Esta reposição resulta em aumento de custo de material e de disposição de resíduos.

Existem diversas pesquisas em busca de melhores solventes. Por exemplo, a utilização das aminas estericamente impedidas resulta em menores fluxos de solvente, menores custos associados ao bombeamento e menor dimensão para os equipamentos (*absorbers* e *strippers*). O menor calor para a absorção representa um menor consumo de vapor e conseqüentemente uma menor penalidade energética (IIJIMA, 2006; OLAJIRE, 2010a). Todas estas características resultam em um menor custo de operação (OLAJIRE, 2010a).⁵⁸

O custo de reposição do MEA é alto por causa da degradação do solvente, mesmo depois que a maior parte do SO₂ é removida no FGD. O NO_x também precisa ser eventualmente removido do gás de combustão antes de ser lançado à atmosfera para atender aos limites de emissões ambientais (OLAJIRE, 2010a).

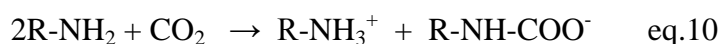
⁵⁸ Contudo, um menor delta de absorção pode levar a um maior calor de evaporação na torre e normalmente menor calor de absorção indicam cinética mais lenta (ROCHEDO; SZKLO, 2012).

Os solventes químicos mais aplicados para a separação de CO₂ são as aminas e as aminas estericamente impedidas. Várias pesquisas propõem solventes alternativos e avançados. Porém, atualmente somente as aminas alcançaram o estado da disponibilidade em escala comercial.

A monoetanolamina (MEA) é um composto químico orgânico e foi desenvolvido nos anos 1960 como um solvente não seletivo para a remoção de impurezas como os gases ácidos (H₂S e CO₂), de correntes de gás natural. O processo foi posteriormente adaptado para o tratamento de gases de exaustão (RAO, 2002).

Além da monoetanolamina (MEA), outras aminas como a dietanolamina (DEA), a metildietanolamina (MDEA), trietanolamina (TEA), ou a disopropanolamina (DIPA) também podem ser utilizadas (OLAJIRE, 2010b; STRAZISAR *et al.*, 2001).

As reações que ocorrem na absorção de CO₂ e na regeneração do MEA estão descritas pela eq. 10 e eq. 11, respectivamente:



Onde,



A aplicação de aminas requer geralmente um alto consumo de energia, dado que os processos de absorção e dessorção são controlados pela temperatura. Outro problema na aplicação industrial de aminas está relacionado à sua degradação por meio de reações irreversíveis ocasionando diversos problemas durante o processo de separação como: perda de solvente, corrosão dos equipamentos, aumento da viscosidade, *foaming* e incrustação (*fouling*). Especialmente a MEA, que é uma amina primária, é facilmente degradada na presença de SO₂ e O₂ pela formação de subprodutos irreversíveis, reduzindo a capacidade de absorção da amina e tornando difícil a sua recuperação (STRAZISAR *et al.*, 2001). A adição de um sistema de captura por aminas requer, portanto, um gás de entrada relativamente limpo e de baixa temperatura, o que pode levar a necessidade de instalações adicionais para condicionar o gás de exaustão.

O desenvolvimento de aminas alternativas visa à redução da energia necessária para a regeneração e a redução da corrosividade. Existem dois processos para a separação de CO₂ em estágio comercial baseados em aminas: o *Econamine FG PlusSM Process* (EFG) e o *ABB Lummus Crest MEA Process*.

A *Econamine FG PlusSM Process* é uma tecnologia com base em amina de propriedade da empresa Fluor. Os processos convencionais operam com o MEA a aproximadamente de 18% a 20% p/p. Neste processo o solvente tem como base a solução aquosa de MEA a 30% w/w e utiliza inibidor de O₂. O inibidor tem a função de reduzir a degradação do solvente e reduzir a corrosão do equipamento. A tecnologia EFG é a primeira e a mais difundida para a remoção de CO₂ de gases de combustão com alto teor de O₂ (até 15 % v/v).

O *ABB Lummus Crest MEA Process* utiliza uma solução aquosa de MEA com concentração de 15 a 20% p/p sem a utilização de inibidor. Essa tecnologia pode capturar mais de 96% do CO₂ nos gases de exaustão. A menor concentração de solvente em relação à *Econamine FG PlusSM Process* resulta em desvantagens: maior custo de capital por causa da necessidade de maiores equipamentos e maior consumo de energia por causa da maior quantidade de água dissolvida por unidade de solvente (NSAKALA *et al.*, 2001).

A utilização da amônia na captura de CO₂ pode ser atrativa economicamente, quando os produtos podem ser utilizados em substituição à produção convencional dos sais de amônia, que necessita de um grande aporte energético, de aproximadamente 32 GJ/t de sal produzido (PELLEGRINI *et al.*, 2010). Neste caso a penalidade energética da planta é reduzida, porque não é necessário o aporte de energia para a regeneração do solvente. Além disso, não é necessária a compressão do CO₂ para permitir o seu transporte. No entanto, neste caso há um aumento considerável da necessidade de água para a lavagem dos gases para a redução da liberação da amônia para a atmosfera (PELLEGRINI *et al.*, 2010)

A energia necessária para a compressão de CO₂ é semelhante para processo com MEA e o processo utilizando solução aquosa de amônia, mas o consumo parasítico de vapor é aproximadamente 67% menor para a utilização da solução aquosa de amônia (PELLEGRINI *et al.*, 2010).

3.2.3 Componentes da planta de captura na pós-combustão

A planta de captura de CO₂ consiste em unidades para o condicionamento do exausto, consistindo na remoção adicional de SO₂ e no arrefecimento, uma torre de absorção de CO₂, unidades de regeneração do solvente e um sistema de compressão e secagem de CO₂ para condições supercríticas. Os componentes podem ser instalados em diferentes configurações, que serão explicadas mais detalhadamente neste item.

Uma instalação de remoção de CO₂ opera geralmente em condições que apresentam uma taxa de remoção de 90%. Quando é exigida uma taxa menor de captura, a boa prática não é a diminuição da eficiência do equipamento de remoção, mas a instalação de um *bypass*, ou seja, a separação da corrente em duas partes, uma que passará pela unidade de remoção de CO₂ e outra que seguirá para a chaminé.

3.2.3.1 Componentes adicionais à planta base sem captura

O exausto sai do tratamento geralmente à pressão ambiental e temperaturas ente 50 e 60 °C e com uma concentração de SO_x acima de 2000 ppmv (NETL, 2007). Para poder adicionar uma planta CCS, o gás de exaustão precisa ser condicionado. Uma planta de absorção de CO₂ requer um gás a uma temperatura por volta de 45°C e com uma concentração de SO₂ não maior a 10 ppmv (NETL, 2007).

Por causa dos problemas de degradação da MEA o teor de enxofre deve ser limitado a 10 ppmv, o que resulta em alterações na unidade de dessulfurização (FGD), nos casos onde a legislação permite teor de enxofre maior que o necessário pela tecnologia (OLAJIRE, 2010a).

3.2.3.1.1 O dessulfurizador adicional

A MEA apresenta uma afinidade grande para reagir com o SO₂. Dessa reação se formam sais termicamente estáveis, que não podem ser regenerados e precisam ser retirados do sistema. O SO₂ causa, assim, uma perda de solvente e gera resíduos tóxicos. Para evitar a degradação da MEA, o teor de SO₂ no gás de exaustão precisa ser reduzido o máximo possível. Portanto, em UTEs com captura de carbono precisa-se acrescentar uma segunda etapa de remoção de SO₂, comumente chamada de *SO₂-polisher*.

Trata-se normalmente de um lavador que utiliza uma solução de soda cáustica a 20%. Este tipo de lavador é aplicado com sucesso em várias indústrias no mundo inteiro e atinge eficiências de remoção até 95 % (NETL, 2007).

O *polisher* pode ou ser instalado como compartimento da torre onde é realizada a dessulfurização principal, ou ser instalado como torre separada. Quando a adição de um sistema de captura já é incluída no planejamento de uma planta, a combinação do lavador convencional e do *polisher* em uma só torre pode trazer vantagem com relação ao custo de investimento. Em casos de *retrofitting* ou em casos em que somente uma parte do gás de síntese deve passar pelo sistema de captura (casos de baixa taxa de captura), a instalação de uma torre separada pode ser vantajosa.

3.2.3.1.2 O Cooler de Contato Direto (DCC)

A absorção química é um processo cujo equilíbrio é determinado pela temperatura, dado que a solubilidade de CO₂ no solvente aumenta com a redução da temperatura.⁵⁹ Portanto, o exausto deve ser arrefecido para as temperaturas convenientes para o processo de absorção. O gás é normalmente resfriado com um *cooler* de contato direto, que é uma coluna recheada onde o gás é resfriado através do contato intenso com uma corrente reciclada de água. O gás precisa ser resfriado abaixo da temperatura exigida no absorvedor para levar em conta o aquecimento do ar no ventilador, que é necessário para superar a queda de pressão no absorvedor de CO₂. Nessa configuração, o DCC pode também ser projetado para, ao mesmo tempo, cumprir a função do SO₂ *polisher* (REDDY *et al.*, 2008).

Em outra configuração, principalmente indicada pela *ABB Lummus Crest*, o DCC e a coluna de absorção podem ser combinados em uma só torre. Nessa combinação, o *cooler* é instalado no compartimento inferior da torre, da forma de que o topo do DCC é o fundo do absorvedor. A separação dos dois compartimentos é realizada com um prato chaminé, com uma série de chaminés que permitem a passagem direta do gás exausto do DCC para o absorvedor, sem que o solvente químico possa passar para o compartimento de baixo. O ventilador está localizado antes do arrefecimento, o que significa que a temperatura de saída, neste caso, deve ser a temperatura requerida no processo de absorção (NETL, 2007).

3.2.3.1.3 A torre de absorção

⁵⁹ De outro lado, o transporte das moléculas do gás para o solvente é facilitado com o aumento da temperatura. Ademais, quanto menor a temperatura na absorção, maior o consumo de energia na etapa da regeneração, em que o solvente precisa ser aquecido até a temperatura em que o CO₂ é transmitido novamente para a fase de gás. Existe, então, um ótimo de temperatura, que se determina pela solubilidade e por mecanismos de transporte e consumo de energia.

3.2.3.1.3.1 O compartimento de absorção

O exausto entra no fundo da torre de absorção, e a percorre de baixo para cima, em contracorrente com o solvente, que consiste numa solução aquosa de MEA de 20 a 30 % p/p. A solução entra no topo da torre e esquenta gradualmente com a quantidade de CO₂ absorvido. O absorvedor contém tipicamente dois leitos recheados para o processo.

Para manter o balanço de água na torre, a temperatura de entrada do solvente e a temperatura de entrada do exausto devem ser o mais próximas possível, de preferência dentro de uma faixa de 5,5°C (NETL, 2007). Se o gás entrar na torre com uma temperatura maior que o solvente, ele traria mais umidade para a torre que levaria na saída. Essa umidade excessiva condensaria no absorvedor, levaria à diluição do solvente e comprometeria, assim, o processo. De outro lado, se o gás entrar numa temperatura menor que o solvente, ele sairia numa temperatura maior e levaria assim a uma perda de água no sistema. Portanto, a diferença entre essas temperaturas deve ser controlada precisamente.

3.2.3.1.3.2 Trocadores de Calor

O solvente rico de CO₂ deixa a coluna no fundo, com temperatura de aproximadamente 50°C, e segue para um trocador de calor, onde é pré-aquecido para o processo de regeneração com temperatura de aproximadamente 95 °C. O fluido, com o qual o solvente rico troca calor, é o solvente regenerado, que sai da coluna de regeneração, e que, nessa unidade, é pré-arrefecido. O solvente regenerado segue então por um resfriador de água e volta ao processo no topo da coluna com uma temperatura por volta de 40°C (NETL, 2007).

3.2.3.1.3.3 O compartimento de lavagem

A lavagem na parte superior da coluna tem por objetivo a redução de perda de MEA e emissão de amônia⁶⁰, que são evaporadas ou mecanicamente arrastadas com o gás de exaustão. Através dessa lavagem, junto com um separador de névoa, instalado na divisão entre os compartimentos de absorção e lavagem, uma grande parte das moléculas arrastadas pode ser recuperada. A água de lavagem pode ser reciclada, porém, uma parte precisa permanentemente ser substituída para manter o teor de MEA

⁶⁰ A amônia pode ser formada a partir de MEA por oxidação com oxigênio presente no gás de exaustão. Ao percorrer da coluna, a amônia é transferida para o gás e sai com o exausto.

baixo, e, assim, não diminuir a solubilidade da MEA. Após passar pelo processo da lavagem, o gás de exaustão segue para a chaminé.

3.2.3.1.3.4 O princípio do arrefecimento intermediário (*Intercooling*)

A temperatura de operação do absorvedor possui um papel importante para o desempenho total do processo de absorção química. Temperaturas mais altas de operação aumentam, de um lado, a cinética da reação, mas, de outro lado, diminuem a capacidade do solvente de absorver CO₂. Portanto, existe um perfil de temperatura ótimo para o processo da absorção química (REDDY *et al.*, 2008).

Em uma planta convencional de absorção com aminas, a temperatura do processo é somente controlada através da manipulação da temperatura de entrada do gás de exaustão e a temperatura de entrada do solvente. O típico perfil de temperatura é indicado na Figura 11 para duas concentrações no gás de síntese, 3% v/v, que corresponde com um exausto de uma UTE a gás natural, e 13 % v/v, que corresponde com o exausto de uma UTE a carvão. O exausto é aquecido enquanto percorre a coluna, dado que a reação de absorção libera calor. No topo da coluna, o gás de exaustão é resfriado pelo solvente que entra na coluna. Isto resulta num perfil de temperaturas, que apresenta um máximo na parte superior da coluna (REDDY *et al.*, 2008).

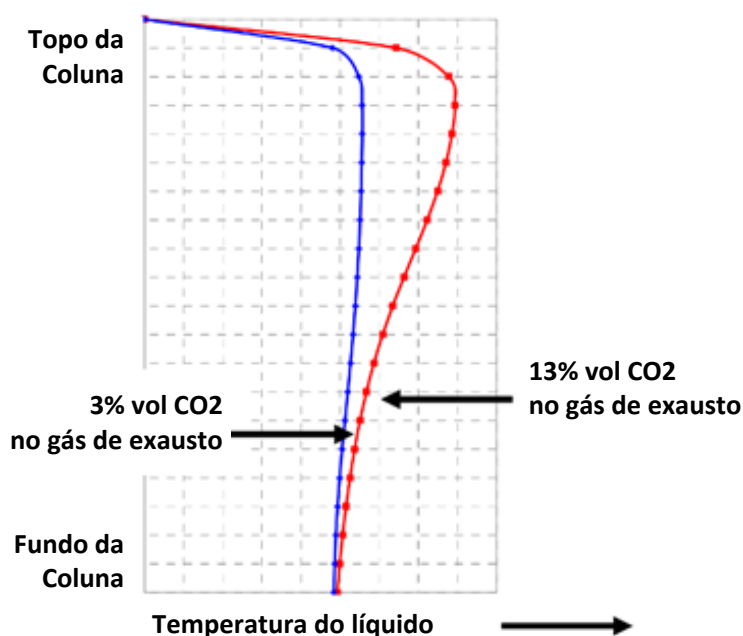


Figura 11 - Perfil de Temperatura no processo de absorção química
Fonte: REDDY *et al.* (2008)

Para as concentrações de CO₂ típicas em gases de exaustão de UTEs a carvão, o resfriamento intermediário da coluna pode trazer benefícios. O resfriamento intermediário pode ser realizado pela extração de solvente entre dois leitos de recheio, resfriá-lo e retorná-lo para a coluna, na altura da extração.

A redução da temperatura do solvente aumenta sua capacidade de absorção, o que, por sua vez, resulta numa redução da taxa de circulação necessária. Portanto, uma redução do custo de investimento e de operação da planta pode ser alcançada, dado que equipamento pode ser menor e consumo de energia para o bombeamento e a regeneração do solvente diminui. Além disso, a temperatura menor resulta num volume menor da corrente de gás, portanto, num diâmetro menor.

3.2.3.1.4 A regeneração do solvente

3.2.3.1.4.1 O Stripper e o Reboiler

O objetivo do *stripper* é a regeneração do solvente, ou seja, a separação do CO₂ do solvente. Trata-se de uma coluna de diferentes compartimentos de pratos e/ou de recheio. Na seção superior é instalado um sistema de lavagem, para minimizar o arrastamento de MEA para as partes após a coluna.

O solvente rico de CO₂ entra no *stripper*, após o pré-aquecimento acima mencionado, com aproximadamente 95°C (NETL, 2007). No *stripper*, o solvente percorre a coluna de cima para baixo, em contracorrente com uma corrente de vapor e CO₂, que foi evaporado no *reboiler*. O *reboiler* se encontra no fundo da coluna. Nessa unidade, devido à adição de calor, a maior parte das ligações de MEA e CO₂ é quebrada e o CO₂ deixa o solvente. O calor, que é adicionado ao *reboiler* é proveniente de vapor de baixa pressão, extraído do bloco de turbinas, ou gerado num combustor adicional a gás natural (NETL, 2007).

3.2.3.1.4.2 O Condensador

O vapor quente no topo do *stripper* contém principalmente CO₂ e vapor d'água, como uma pequena quantidade de vapor de MEA. Este vapor segue para o condensador, onde grande parte da água e MEA condensam. A corrente segue então para o tambor de refluxo do *stripper*, onde vapor e líquido são separados (NETL, 2007).

A corrente que não foi condensada consiste quase exclusivamente de CO₂, e segue para a unidade de secagem e compressão. A fração que foi condensada, contendo água, MEA e pequenas quantidades de CO₂, é redirecionada para o topo do *stripper*

como refluxo. Uma parte desse refluxo é desviada para a seção de lavagem do absorvedor para substituir água contaminada (NETL, 2007).

O solvente regenerado é retirado do fundo da coluna e segue para o trocador onde é arrefecido contra o solvente rico que sai do absorvedor. Uma pequena parte da corrente que sai do fundo do *stripper* é desviada para o *reclaimer*.

3.2.3.1.4.3 O Reclaimer

O objetivo do *reclaimer* é a recuperação de MEA degradada, ou seja, MEA que formou sais termicamente estáveis. Uma pequena corrente parcial do solvente pobre segue para o *reclaimer*, onde uma parte da MEA é recuperada através da reação com soda cáustica. A soda libera a MEA de ligações com óxidos de enxofre, devido ao seu forte caráter básico. O *reclaimer* é realizado como um trocador de calor onde vapor de baixa pressão, proveniente do bloco de turbinas, cede calor ao solvente. A MEA regenerada evapora então e volta ao circuito da absorção. O processo do *reclaimer* é essencial para a redução de corrosão e incrustação (*fouling*) no sistema do solvente. Os resíduos do *reclaimer* são imediatamente resfriados com água de resfriamento da UTE e descarregadas num tanque (NETL, 2007).

As aminas reagem tanto com o CO₂ quanto com o NO₂, O₂ e SO₂. Quando as aminas reagem com estes últimos formam sais termicamente estáveis (HSS – *Heat Stable Salts*) e gás amônia, que constituem a parte degradada da amina (STRAZISAR *et al.*, 2003).⁶¹

A degradação da amina resulta em custos para repô-la, na redução da capacidade de absorção de CO₂ e em problemas operacionais e ambientais associados à formação e à disposição dos produtos gerados. Isto justifica a instalação do dessulfurizador adicional antes do processo de captura para reduzir a concentração de SO₂ a 10 ppm. O NO₂ não é tão problemático porque ele representa apenas 5% do NO_x emitido pelas termelétricas (RAO; RUBIN, 2002; VELTMAN *et al.*, 2010).⁶²

3.2.3.1.4.4 Filtro do Solvente

⁶¹ Embora vários dos compostos que foram identificados como produtos de degradação monoetanolamina (MEA) tenham sido identificados em estudos laboratoriais, alguns produtos importantes não foram observados nas mesmas condições. Isto indica que algumas reações de degradação química ocorrem somente nas condições operacionais das plantas, mas não ocorrem em experimentos de laboratoriais (STRAZISAR *et al.*, 2003).

⁶² A adição de receptores de oxigênio à solução pode reduzir a formação de HSS. Exemplos são oxima, quinona, hidroxilamina, e suas misturas. Há também a possibilidade da adição de inibidores de corrosão (como o vanádio) e agentes anti-incrustantes (THITAKAMOL *et al.*, 2007).

O solvente precisa ser continuamente filtrado. Isto é realizado em um sistema de filtros, que consistem em folhas de filtração revestidas com pó de sílica, chamado de *filter aid*. O revestimento é retirado quando o filtro é limpo, portanto, é preciso de um sistema de revestimento *in-situ* para preparar os filtros para o próximo ciclo de operação. O sistema de filtração inclui recipientes de estocagem de *filter aid*, vasos para a preparação de misturas do *filter aid*, vasos de pressão com as folhas de filtração e vasos para descarregar os resíduos. Além da filtração, a MEA é comumente passada por um leito de carvão ativado para retirar hidrocarbonetos que podem provocar a formação de espuma.

3.2.3.1.5 Compressão e secagem e Liquefação de CO₂

A corrente de CO₂ sai do tambor de refluxo do *stripper* saturada com água, é comprimida. O compressor utiliza água da alimentação da caldeira, a uma temperatura por volta de 40°C para o resfriamento intermediário e final. A água aquecida retorna ao sistema de alimentação da caldeira. Essa integração de calor contribui para a otimização da eficiência da UTE com captura de carbono. Grande parte da água é condensada durante a compressão e removida entre os diferentes estágios.

Um secador de CO₂ está localizado após o terceiro estágio, para cumprir as especificações exigidas para o transporte. O objetivo do secador de CO₂ é a redução de umidade da corrente de CO₂ até um nível abaixo das especificações dos dutos de transporte de CO₂.

Para o transporte, o CO₂ liquefeito é comprimido a uma pressão de 150 bar (DNV, 2010; FERON, 2010; RAYNAL *et al.*, 2011).

3.2.3.1.6 Aquecimento do Reboiler e do Reclaimer

A maior parte da penalidade energética se deve ao consumo de energia térmica para a regeneração do solvente no *reboiler* e *reclaimer*. Essa energia é normalmente fornecida pela extração de vapor de baixa pressão do sistema de turbinas. No *reboiler*, a energia é consumida pelo aquecimento e pela evaporação parcial do solvente, durante o qual o CO₂ é liberado do solvente. No *reclaimer*, o solvente é completamente evaporado, para separar sais e outros contaminantes não voláteis do solvente. Porém, como a corrente, que passa pelo *reclaimer*, é muito menor que a carga que passa pelo *reboiler*, o *reboiler* apresenta um consumo mais relevante.

Para a integração eficiente do ciclo água/vapor existente, os pontos de extração de vapor para a alimentação do *reboiler* e *reclaimer* precisam ser encontrados.

3.2.3.1.7 Arrefecimento e integração de Calor

O sistema de água de arrefecimento auxiliar é um sistema fechado, que fornece água de arrefecimento para diferentes processos da UTE e das instalações da captura de carbono. Os processos da captura de carbono requerem uma quantidade substancial de água de arrefecimento, tanto na etapa de absorção, quanto na etapa da compressão. O consumo de água de resfriamento da planta de captura de carbono representa mais que o dobro da água de resfriamento consumida pela UTE. Essas etapas devem ser integradas com as etapas que necessitam de calor visando à otimização da eficiência da planta. De forma geral, o consumo de água de resfriamento irá aumentar após o *retrofitting* (ROCHEDO, 2011).

Água de arrefecimento é fornecida do sistema da UTE para o DCC, o trocador de calor do solvente químico regenerado, o resfriamento intermediário do absorvedor, o resfriamento dos condensadores de refluxo, o resfriamento do resíduo do *reclaimer*. A água aquecida volta para a UTE e pode ser utilizada para o pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira.

A integração do arrefecimento no processo da compressão se realiza com processos da absorção química.

3.2.4 O Armazenamento do CO₂

A última etapa do sistema estudado é o armazenamento do CO₂, que depois de capturado e comprimido deve ser transportado⁶³ até seu destino final, por exemplo, o armazenamento ou o seu uso como insumo em algum processo industrial. Para o primeiro caso podem ser citados diferentes tipos de armazenamento: geológico, em aquíferos salinos, em minas de carvão, em reservatórios de petróleo e gás deplecionados e maduros (para recuperação avançada de petróleo – EOR/EGR – *Enhanced Oil Recovery/Enhanced Gas Recovery*) e a injeção direta nos oceanos (ASPELUND; JORDAL, 2007).

⁶³ O transporte do CO₂ capturado pode ser realizado de quatro formas distintas: dutos, navios, caminhão e trem. Contudo, destas quatro formas, a mais comum é o duto. Todas demandam CO₂ em diferentes condições, exigindo unidades de liquefação, para o caso do transporte de navio ou compressão, para dutos (ASPELUND; JORDAL, 2007).

A etapa de armazenamento do CO₂ é o ponto mais polêmico em relação ao uso da tecnologia CSS. O fato de ainda não ser possível garantir que o CO₂ armazenado continuará nessa condição resulta em uma grande incerteza sobre a eficácia da tecnologia CCS.

Portanto, para ser eficaz e propiciar uma real redução de CO₂, esta tecnologia depende, em grande parte, do comportamento da etapa de armazenamento de CO₂, que ainda envolve muitas incertezas, especialmente no que diz respeito ao risco de vazamento para a atmosfera, tornando necessária a vigilância constante do depósito de CO₂ (SPRENG *et al.*, 2007).

4 Estudo de Caso – Simulação

Este capítulo tem como objetivo descrever o caso estudado, seguindo as etapas de uma análise e ciclo de vida. Serão descritos o objetivo e o escopo do estudo e os processos considerados no inventário do ciclo de vida: produção e transporte de carvão, mineração de calcário, e produção e transporte da cal, a UTE e a captura de CO₂, produção e transporte de solvente, transporte do solvente degradado, produção e transporte da soda cáustica e armazenamento de CO₂.

4.1 Objetivo e escopo

O objetivo deste trabalho é estimar a real contribuição da tecnologia de captura e armazenamento de carbono em uma UTE a carvão para a redução da emissão de gases de efeito estufa.

Neste estudo partiu-se da hipótese que a utilização dessa tecnologia leva a um consumo indireto significativo de energia, por meio de emissões em etapas fora das fronteiras da planta *per se*.⁶⁴ A contabilização dessas emissões levará, portanto, a uma redução do percentual do carbono evitado, em termos de redução de emissões de CO₂ equivalente, que é atribuído à planta de captura pós-combustão. O estudo procura, assim, estimar as emissões indiretas visando mensurar o benefício da tecnologia considerada.

Para viabilizar esta análise, serão modeladas as etapas de ciclo de vida de duas configurações de plantas térmicas a carvão. A primeira configuração (caso 1), que servirá como linha de base para a comparação, não utiliza a tecnologia de captura, enquanto que a segunda configuração (caso 2) utilizará uma planta de captura do tipo pós-combustão com aminas (item 3.2).

Assim, os dois casos propostos, que se referem às duas configurações de plantas utilizadas na comparação, são:

1. Caso 1 – UTE sem CCS
2. Caso 2 – UTE com CCS

⁶⁴ Nem todas as emissões do sistema estudado resultam da combustão de combustíveis fósseis. Como será visto na descrição dos processos, emissões devido ao vazamento de metano nas minas a carvão subterrâneas são significativas.

O estudo de caso foi estruturado com base em uma UTE real, que está localizada em Itaqui, no estado do Maranhão (para mais dados sobre a planta ver item 4.2.5). Os dados de processo dessa planta não estão disponíveis publicamente, por esta razão as simulações dos processos referentes serão realizadas com o auxílio do modelo IECM (item 2.2) e de dados obtidos na literatura científica.

A utilização da tecnologia CCS será tratada como um caso de *retrofitting*. A escolha da configuração pós-combustão para o *retrofitting* tomou como base os resultados obtidos em outros estudos sobre o tema (ver item 3.2).⁶⁵

Procurou-se reunir as principais etapas, diretas e indiretas, para as duas configurações propostas. No entanto, este estudo apresenta diversas limitações geradas pela necessidade de simplificações na descrição das etapas e na escolha dos processos. Essas limitações resultam de diversos aspectos, especialmente pela falta de dados específicos para o caso brasileiro.⁶⁶

Algumas simplificações foram realizadas com base na similaridade de diversas etapas presentes nos dois casos estudados. O objetivo final é verificar a diferença entre as emissões de CO₂ equivalente entre o caso 1 e o caso 2, neste caso, processos iguais presentes nos dois casos podem ser cancelados sem o comprometimento da análise. Por exemplo, o uso da terra, comissionamento e descomissionamento relativos à implantação das minas de carvão e calcário e da UTE não serão considerados. Parte-se do pressuposto que algumas partes do processo já existem, por exemplo, a mina de carvão e a UTE, e a mudança entre o caso 1 e o caso 2 é relativa à instalação da planta de captura. A Figura 12 e a Figura 13 representam os processos incluídos nos dois casos estudados.

⁶⁵ Em ROCHEDO (2011) foi realizada uma análise econômica detalhada sob a incerteza da captura de carbono em termelétricas a carvão.

⁶⁶ Vale ressaltar que este estudo é uma tese de doutorado e tem caráter estritamente acadêmico, portanto, não tem como objetivo atender a uma demanda da empresa proprietária da planta ou de terceiros. Por este motivo, foram contemplados apenas os requisitos para atender a sua finalidade, não tendo sido revisado por um comitê, nem tendo a participação de pessoas especialistas para cada um dos processos descritos.

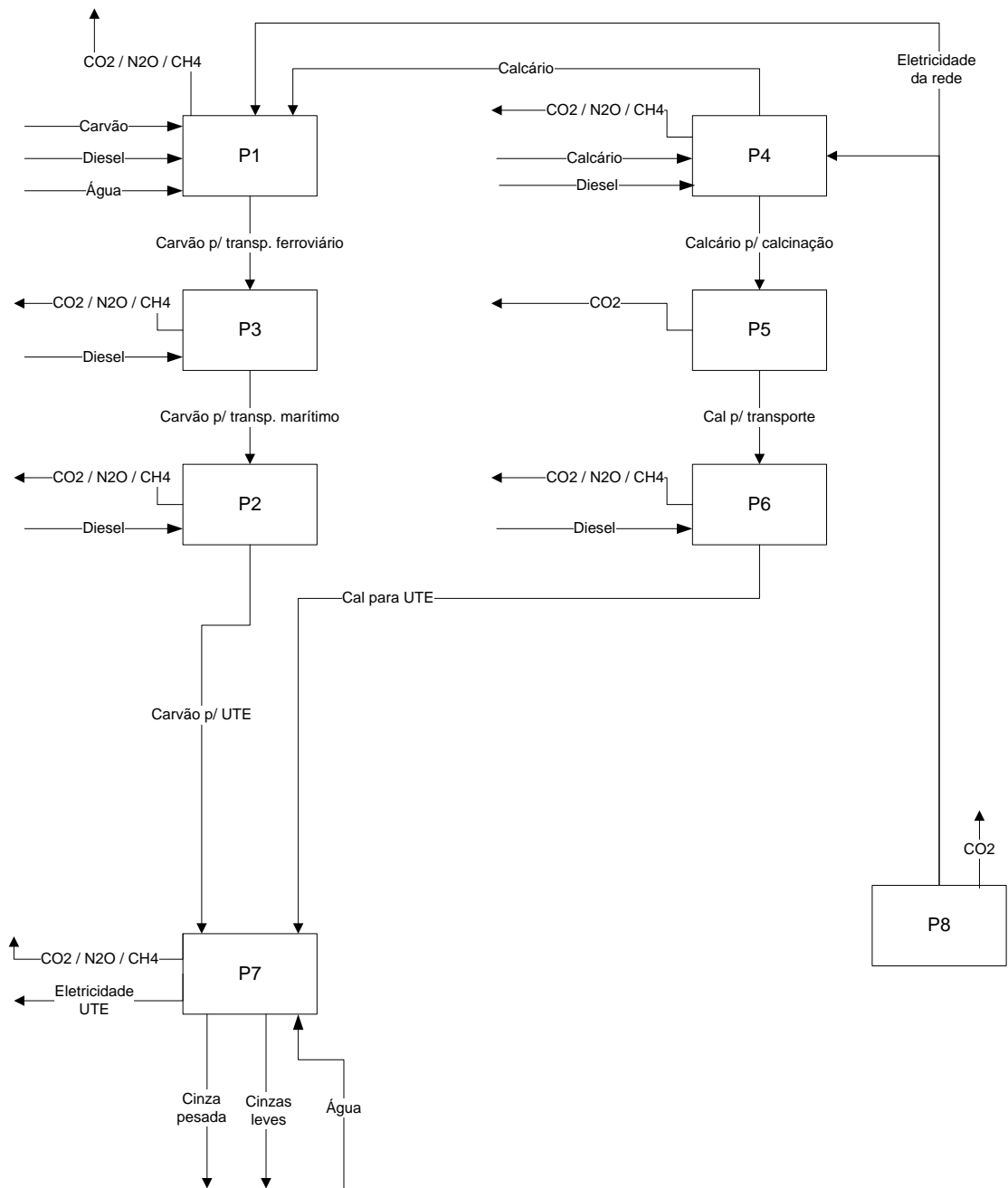


Figura 12 - Fluxograma do sistema para o Caso 1
 Nota: Os processos da figura (Caso 1) estão descritos na Tabela 6

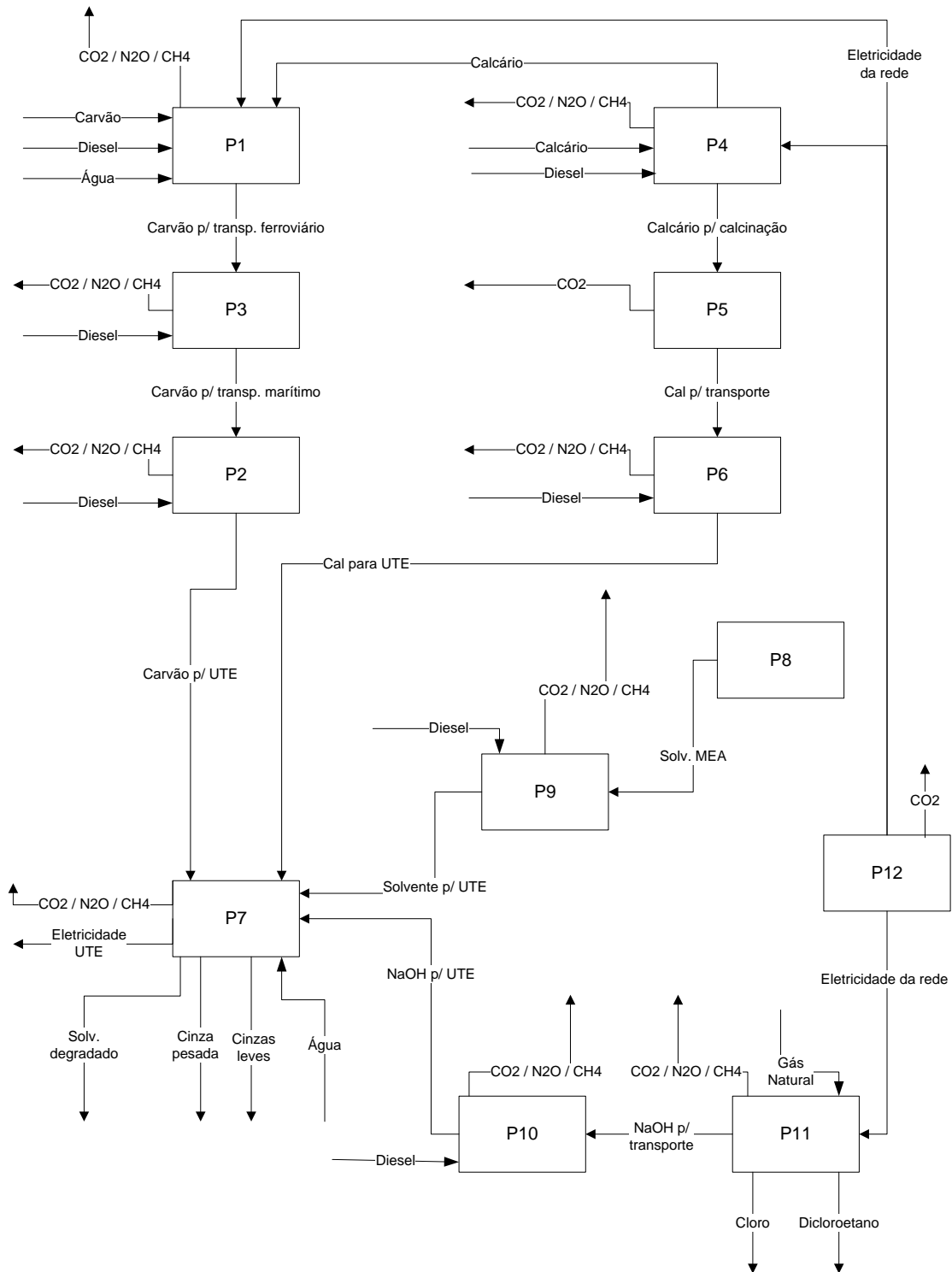


Figura 13 – Fluxograma do sistema para o Caso 2
 Nota: Os processos da figura (Caso 2) estão descritos na Tabela 7

As plantas a carvão convencionais (PC) utilizam tecnologias consideradas maduras, portanto, considerou-se que para as plantas existentes não são esperados grandes avanços tecnológicos durante o seu tempo de vida.

Em relação às plantas de captura de carbono, são esperados ganhos de aprendizado ⁶⁷ significativos para esta tecnologia, durante o tempo de vida da planta. No entanto, além de se tratar uma avaliação complexa e que envolve diversas incertezas, a configuração da UTE estudada já estava definida antes mesmo do início deste estudo de caso. Trata-se, portanto, de um caso de *retrofitting* e a opção fica limitada à tecnologia de captura por aminas.

O gás de efeito estufa mais importante para o aquecimento global é o vapor de água, mas a sua concentração na atmosfera não é influenciada significativamente pelas emissões diretas provenientes de atividades humanas. Segundo (IPCC, 2011), os principais gases de efeito estufa relacionados com as atividades humanas são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e os halocarbonos (um grupo de gases que contém cloro, flúor e bromo).⁶⁸ No entanto, apesar de possuírem um GWP alto, os halocarbonos estão presentes em baixas concentrações na atmosfera (IRENE, 1993). Assim, a etapa de inventário considerou os três principais gases de efeito estufa: o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O).⁶⁹

Utilizou-se neste estudo o software CMLCA - *Chain Management by Life Cycle Assessment* (ver item 2.2) para a realização da ACV. A Tabela 6 e a Tabela 7 resumem as unidades de processo consideradas no estudo e as ordena de acordo com a entrada no software CMLCA.

⁶⁷ Em ROCHEDO (2011) foi realizada uma análise detalhada sobre ganhos de aprendizado para plantas de captura.

⁶⁸ O vapor de água é o gás de efeito de estufa mais abundante e importante na atmosfera. Apesar de as atividades humanas terem apenas uma pequena influência direta sobre a quantidade de vapor de água atmosférico, estas atividades podem, indiretamente por meio da alteração do clima, afetar substancialmente o vapor de água. As atividades humanas também influenciar a quantidade de vapor de água na atmosfera por meio das emissões de CH₄, porque o CH₄ sofre destruição química na estratosfera levando a produção de uma pequena quantidade de vapor de água (IPCC, 2011).

⁶⁹ Nesta tese foram considerados apenas os três principais gases de efeito estufa. Em uma primeira versão, foram incluídos outros gases como o monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxido de nitrogênio (NO_x), componentes voláteis (COV), material particulado (MP), além do mercúrio (Hg) e da amônia (NH₃). No entanto, tomou-se a decisão de retirá-los da análise porque o objetivo principal do estudo é comparar o CO₂ capturado com o CO₂ equivalente evitado. Os gases excluídos causam impactos de natureza distinta ao meio ambiente. Enquanto os GEE estão associados aos impactos de natureza global, os poluentes regulados estão associados aos impactos de ordem local. A relevância dos poluentes controlados está associada com as características do local onde a emissão ocorre, ou seja, ao nível de saturação de determinada região a cada tipo de emissão atmosférica. Geralmente estes poluentes possuem limites de emissão estabelecidos na legislação local. Seria interessante incluir novos poluentes em estudos futuros, mas a falta de dados para todos os processos poderia gerar “falsos positivos” durante a análise de contribuição. Ou seja, poderia ser creditado a um determinado processo uma contribuição para as emissões de um determinado poluente, pelo simples fato do desconhecimento das emissões desse poluente pelos outros processos.

Tabela 6 – Processos e parâmetros utilizados no software CMLCA para o Caso 1

Processo	Descrição
P1	Produção de carvão
P2	Transporte marítimo de carvão
P3	Transporte ferroviário de carvão
P4	Mineração de calcário
P5	Produção da cal
P6	Transporte da cal
P7	UTE sem CCS
P8	Produção de eletricidade

Tabela 7 – Processos e parâmetros utilizados no software CMLCA para o Caso 2

Processo	Descrição
P1	Produção de carvão
P2	Transporte marítimo de carvão
P3	Transporte ferroviário de carvão
P4	Mineração de calcário
P5	Produção da cal
P6	Transporte da cal
P7	UTE com CCS
P8	Produção do solvente
P9	Transporte do solvente
P10	Transporte de NaOH
P11	Produção de NaOH
P12	Produção de eletricidade

A unidade funcional descreve a função primária do sistema estudado na ACV e será utilizada como referência para a seleção de sistemas adicionais para o fornecimento da mesma função. Neste estudo, o que se busca com a utilização da UTE é a transformação de parte da energia primária, na forma de carvão, em energia final, na forma de energia elétrica (kWh). A energia final será transformada, em etapas posteriores não contempladas neste estudo, em energia útil para o consumidor final.⁷⁰

Os dados utilizados neste estudo são públicos e foram obtidos da literatura científica. Sempre que possível, optou-se pela utilização de dados de processos similares brasileiros. No entanto, na maioria dos casos, os dados foram obtidos de outros estudos de ACV ou de literatura científica com análises de processos similares.

⁷⁰A análise do fluxo de energia nestes sistemas é baseada na análise de Primeira Lei da Termodinâmica, ou seja, o valor apresentado tem como base o total de energia contida nos vários materiais que fluem pelo sistema. Neste caso, a energia líquida não representa a quantidade de energia disponível, ou exergia, que é apresentada na análise de Segunda Lei da Termodinâmica. O conceito de energia disponível é uma representação da energia dos vários materiais no sistema, padronizada para a quantidade de trabalho útil que pode ser derivada a partir deles. Por exemplo, um joule de energia na forma de carvão não pode realizar o mesmo trabalho que um joule de energia na forma de eletricidade. Vale ressaltar que embora a análise de Segunda Lei coloque todas as formas de energia em uma base comum, as análises de Primeira Lei são bem aceitas (SPATH *et al.*, 1999).

4.2 Inventário do Ciclo de Vida (LCI)

Este tópico tem com objetivo descrever as premissas adotadas, os estágios e os processos considerados para a obtenção dos dados utilizados na etapa de LCI.

Um processo, que pode ser chamado, alternativamente, de unidade de processo ou processo econômico é o elemento central da análise de inventário na maioria dos estudos de ACV (GUINÉE *et al.*, 2002). A Figura 14 representa uma unidade de processo (ou sistema) e seus fluxos de entrada e saída.

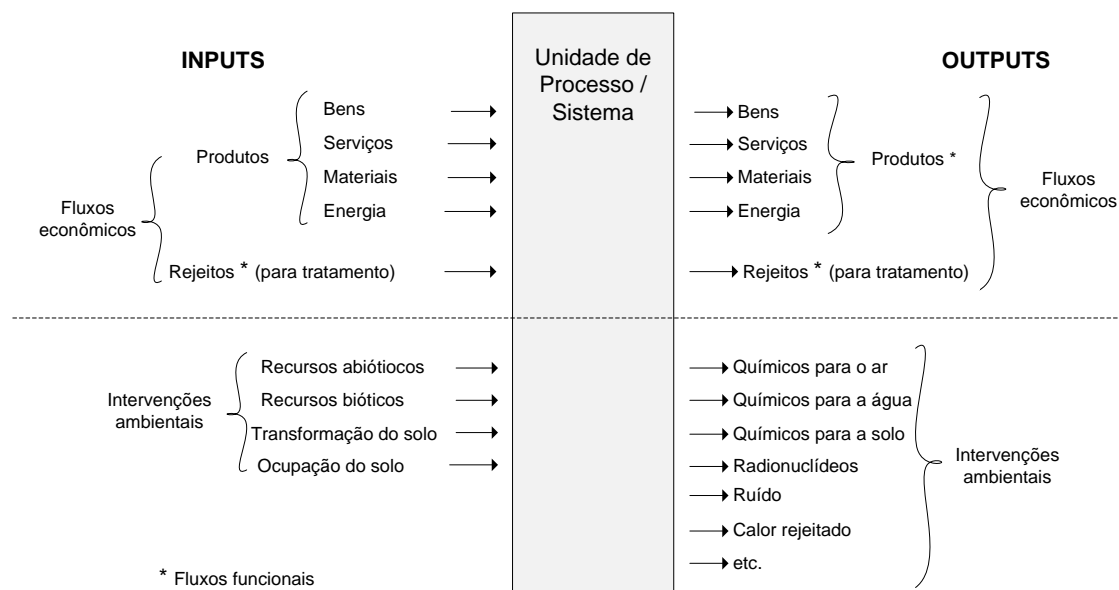


Figura 14 – Estrutura de uma unidade de processo
Fonte: Adaptado de GUINÉE *et al.* (2002)

4.2.1 Produção de carvão

A etapa de produção de carvão contabiliza a energia e as emissões associadas com a produção de carvão durante as operações da mina, incluindo a extração e o beneficiamento. Os dados de entrada no software CMLCA foram baseados no fluxo de referência de 1 kg de carvão pronto para o transporte ferroviário.

Nesta etapa foram contabilizadas a eletricidade e o consumo de diesel para os equipamentos da mina, as emissões de metano (CH₄) e o calcário utilizado no processo de *rockdusting*.

A empresa proprietária da UTE de Itaquí possui direitos para a atividade de mineração na região produtora de *La Guajira*, localizada na Colômbia. Esta região é reconhecida pela excelente qualidade do carvão, poder calorífico em torno de 6.000

kcal/kg e pelos baixos teores de cinzas e enxofre.⁷¹ As minas de carvão da Colômbia serão integradas às plantas de geração da empresa, que atualmente estão em construção, mas já possuem as suas produções de eletricidade contratadas (MPX, 2011a).⁷²

A prospecção geológica realizada na Colômbia identificou diversas áreas com a presença de carvão e com potencial para mineração a céu aberto nas seguintes concessões de *La Guajira: Cañaverales, Papayal e San Benito* (MPX, 2010).

O porto da empresa será implantado a 150 km de suas concessões em *La Guajira*, na costa atlântica colombiana. A empresa prevê o uso de módulos rodoviários e, a partir de 2016, ferroviários, com o objetivo de garantir o transporte de carvão das minas até o porto (MPX, 2011a).⁷³

Os carvões apresentam características físico-químicas que variam de acordo com sua história genética, com eventos ocorridos durante a acumulação vegetal na turfeira e durante história diagenética (em condições mais rigorosas de temperatura e pressão) posterior. Cada jazimento tem suas peculiaridades e variações relativas, refletindo na caracterização do carvão *in situ*, nos produtos beneficiados e em seus rejeitos (CRPM, 2003). As características do carvão colombiano que será utilizado na termoelétrica de Itaquí estão resumidas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características do carvão importado utilizado nas simulações

	Unidades	Valor
PCS	MJ/kg	26,4
C	% em massa	64,3
H	% em massa	4,4
O	% em massa	9,4
Cl	% em massa	0,03
S	% em massa	0,7
N	% em massa	1,2
Cinzas	% em massa	0,8
Umidade	% em massa	12,00

Fonte: IBAMA (2008)

Nota: O percentual é dado em massa em base úmida

A projeção da MPX colombiana é de que a produção nas minas a céu aberto será iniciada no final de 2012 e deverá atingir 5 milhões de toneladas de carvão por ano em 2015 (Fase I). Em 2015 (Fase II) será iniciada a produção em minas subterrâneas e

⁷¹ A Colômbia é o país com maior produção de carvão na América do Sul e os seus carvões são em grande parte do período Cretáceo ao Terciário, com baixo teor de cinzas, enxofre e poluentes potencialmente perigosos emitidos para o ar (KARLSEN *et al.*, 2006).

⁷² As plantas são: Energia Pecém, MPX Pecém II e MPX Itaquí. Além destas também serão integradas: MPX Açú, no Rio de Janeiro, e o projeto MPX Castilla, no Chile (MPX, 2011a).

⁷³ O porto terá capacidade de até 20 milhões de toneladas/ano e calado de 20 metros, podendo operar com navios do tipo *capesize*.

em 2020, a produção de carvão deverá atingir uma escala de 35 milhões de toneladas por ano. Com base nas projeções de produção de carvão da empresa (Figura 15) decidiu-se por considerar no inventário que o carvão consumido na UTE Itaquí será todo obtido em minas subterrâneas.⁷⁴

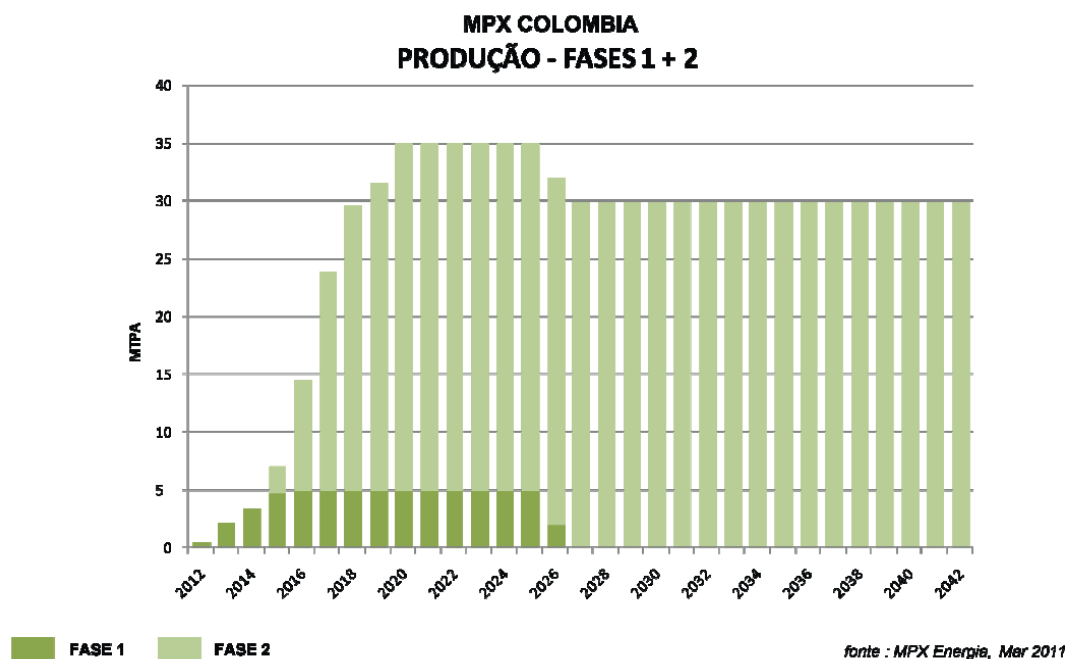


Figura 15 - Projeção da produção de carvão da MPX na Colômbia
Fonte: MPX (2011b)

A empresa considera que a utilização da tecnologia de *longwall*⁷⁵ viabilizará custos competitivos na mineração subterrânea, com base na alta produtividade que pode ser obtida com o emprego dessa tecnologia (MPX, 2011b).⁷⁶

Em resumo, pelas características do empreendimento, assumiu-se para as simulações deste estudo que a mineração do carvão será realizada em grande escala, em minas subterrâneas, localizadas na Colômbia e produzindo carvão de boa qualidade.

⁷⁴ Consideram-se aqui as dimensões do mercado de energia elétrica no Brasil e a necessidade de alternativas de geração de porte para o suprimento das demandas regionais. Adicionalmente as diretrizes do Plano Decenal 2007-2016 (MME/EPE) indicam que além da demanda crescente de geração termelétrica para o país, a região nordeste apresenta potencial para uso do carvão importado, tendo em vista a existência de portos estrategicamente localizados, a exemplo do Porto de Itaquí, no estado do Maranhão.

⁷⁵ Existem basicamente duas técnicas para a mineração subterrânea: *longwall* e câmaras e pilares (*room-and-pillar*). De uma maneira simplificada, no método câmara e pilares, câmaras são escavadas na mina e pilares são mantidos para suportar o teto da mina. No processo *longwall* são retirados longos blocos retangulares de carvão, permitindo o colapso do teto da mina após a extração. Para mais informações sobre mineração consultar (BLM, 2009).

⁷⁶ Os dados de dezembro de 2010 produzidos pela consultoria AME Group mostram um custo médio de mineração para o tipo *longwall* de US\$25/t de carvão. Nesta estimativa não foram considerados na amostra os custos verificados na China, que chegam a US\$10 por tonelada (MPX, 2011b).

Como citado anteriormente, por se tratar de um estudo que visa comparar dois casos (caso 1 – UTE sem CCS e caso 2 – UTE com CCS), todas as etapas comuns serão descartadas visando simplificar a aquisição de dados. Neste caso, o trabalho preliminar de preparação da mina de carvão e o trabalho preliminar da mina de calcário não serão considerados.⁷⁷

Segundo (SPATH *et al.*, 1999) as principais operações no estágio de obtenção do carvão são: a operação dos equipamentos, neste caso, os equipamentos de *longwall*; movimentação de carvão e materiais e beneficiamento do carvão, que inclui limpeza e redução do tamanho. Com isso a maior parte da energia consumida está relacionada à operação dos equipamentos elétricos e ao consumo de diesel para a movimentação de material. O consumo de eletricidade utilizado foi estimado no estudo (SPATH *et al.*, 1999) em 12.755 kWh por ano por milhões de toneladas de carvão minerado.

Além das emissões diretas provenientes da queima de combustível fóssil, em geral o diesel, em motores a combustão interna, também precisam ser contabilizadas as emissões de material particulado (MP), metano (CH₄) e mercúrio (Hg) relacionadas com a mineração propriamente dita.⁷⁸ No entanto, neste estudo não serão contabilizadas as emissões de MP e Hg relacionadas à mineração.

Visando ajudar a prevenir explosões de pó de carvão durante o processo de mineração é utilizado um processo chamado de *rockdusting*, que consiste, simplificada, em espalhar pó de calcário sobre a superfície da mina. A quantidade de calcário é em média 16.263 toneladas por ano por milhões de toneladas de carvão minerado (SPATH *et al.*, 1999).

Uma parte significativa⁷⁹ das emissões da etapa de mineração de carvão está relacionada com a emissão do metano (CH₄), que fica aprisionado no leito de carvão e é liberado durante a sua mineração. O volume de metano (CH₄) liberado depende de uma série de fatores, sendo os mais importantes a qualidade de carvão (*coal rank*), profundidade da camada (*coal seam depth*) e o método de mineração empregado (IPCC, 1996).

⁷⁷ Aqui podem ser citados: a energia consumida na fabricação de maquinário, a energia relacionada ao material utilizado e a realização de obras civis; o comissionamento, que incluiria a energia e as emissões durante o preparo do terreno; e o descomissionamento, que contabilizaria a energia e emissões associadas à desativação da mina e a reconstrução do terreno, não serão considerados neste estudo.

⁷⁸ Para mais informações sobre emissões na mineração ver site do *World Coal Association* (WCA, 2011).

⁷⁹ Por exemplo, a atividade de mineração é responsável por aproximadamente 30% das emissões de CH₄ nos Estados Unidos, sendo as minas subterrâneas responsáveis pela maior parcela (EPA, 2006).

O CH₄ é formado durante o processo hulheização (*coalification*) que é o processo de digestão anaeróbia de material vegetal durante o processo de formação do carvão e é posteriormente armazenado em camadas de carvão e os estratos rochosos ao redor (IPCC, 1996; SPATH *et al.*, 1999).

A qualidade e quantidade de gás criada e retida é uma função da composição orgânica da matéria original e das condições em que se encontra. Geralmente, a quantidade de metano que é formado durante o processo de hulheização é maior que a quantidade que pode ser armazenado dentro da camada de carvão em si, assim o excesso migra para os estratos circundantes. O metano é mantido pelas camadas de carvão e pelas camadas de solo adjacentes. Enquanto o metano for mantido sob pressão e assumindo que nenhum processo geológico tenha violado as camadas que retém o metano, a mineração libera essa pressão permitindo a liberação do metano. No entanto, quando a mineração é realizada na superfície a emissão de metano é geralmente significativamente menor que a mineração subterrânea. Isso ocorre porque não houve condições propícias para o metano permanecer retido (IPCC, 1996).

As emissões de metano também ocorrem durante o manuseio do carvão, durante o seu processamento e transporte. O CH₄ é liberado de pilhas de carvão e resíduos de minas abandonadas. Emissões provenientes dessas fontes são relativamente baixas (IPCC, 1996).

Em minas do tipo *longwall* a zona de perturbação pode ser grande, dependendo de uma variedade fatores, incluindo o tamanho do *longwall*, a profundidade de mineração e a espessura da camada do carvão extraído (KIRCHGESSNER *et al.*, 2000).

Depois de deixar a mina, o carvão é submetido a uma série de operações, que são chamadas de beneficiamento do carvão (*coal handling*). Isso pode incluir a trituração, separação de impurezas, a classificação do tamanho, secagem, transporte e armazenamento. Diferentes tipos de carvões podem reter CH₄ em taxas diferentes, mas desde que o carvão é retirado de uma mina, em questão de horas ou dias após a mineração, parte do metano só é liberado durante operações de beneficiamento (KIRCHGESSNER *et al.*, 2000).

Pela dificuldade de se realizar medições para a quantidade de metano que é liberada durante o beneficiamento do carvão, os valores obtidos na literatura científica são baseados em estimativas da quantidade de metano que permanece no carvão após a mineração.

O IPCC fornece duas abordagens gerais para estimar as emissões de CH₄ das minas de carvão.⁸⁰ A primeira abordagem, descrita no Tier 1 e a metodologia do Tier 2 utilizam a seguinte equação básica (eq. 12):

$$\text{Emissões de CH}_4 \text{ (Gg)} = \text{Fator de emissão (CH}_4 \text{ m}^3\text{/t)} \times \text{Carvão produzido(t)} \times \text{Fator de conversão (Gg/10}^6\text{m}^3\text{)} \quad \text{eq. 12}$$

Os valores recomendados no método Tier 1 (*Tier 1 Global Average Method*) estão resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de emissão do CH₄

Emissões de CH₄	Unidade	Baixo	Alto
Mineração subterrânea	kg/kg carvão	0,00670	0,01675
Mineração de superfície	kg/kg carvão	0,00020	0,00134
Post-mining (subterrânea)	kg/kg carvão	0,00027	0,00268
Post-mining (superfície)	kg/kg carvão	0,00000	0,00013

Fonte: Adaptado de IPCC (2006a)

Nota: Para o Tier 1 são escolhidos fatores entre 10 - 25 m³/t. A metodologia Tier 2 deve considerar as variáveis específicas de cada país, tais como a profundidade de grandes jazidas de carvão. O conteúdo de gás CH₄ geralmente aumenta com a profundidade. Assim, o limite inferior do intervalo deve ser escolhido para profundidades médias de mineração menores que 200 m, e para profundidades maiores que 400 m o maior valor é apropriado. Para profundidades intermediárias, valores intermediários podem ser escolhidos.

Por exemplo, os dados oficiais dos GEE liberados na indústria de carvão mineral brasileira, fornecidos pelos órgãos nacionais, utilizam em sua avaliação as equações do manual de referência do IPCC (SNIEC, 2006).

A título de comparação, a Tabela 10 resume os fatores de emissão de metano adotados para a etapa de pós-mineração em minas subterrâneas localizadas na região sul do Brasil.

⁸⁰ A combustão do carvão, a combustão e oxidação de resíduos do carvão e outros materiais carbonáceos (CO₂) são reconhecidos pelo IPCC como fontes de emissões de CO₂. No entanto, o IPCC não fornece métodos para estimar essas quantidades de CO₂, que podem ser significativas, pela dificuldade inerente a estimativa (IPCC, 2006a).

Tabela 10 - Fatores de emissão de CH₄ para pós-mineração em minas subterrâneas na região sul do Brasil

UF	Empresa	Nome da Mina	Fator de Emissão m ³ CH ₄ /t de carvão	Emissão kg CH ₄ /kg de carvão
RS	CRM	Leão I	1,00	0,00067
	COPELMI	Charqueadas	1,00	0,00067
SC	PRÓSPERA	Mina A	1,20	0,00080
		Mina B	1,20	0,00080
	METROPOLITANA	Esperança	1,40	0,00094
		Fontanella	1,40	0,00094
	CRICIÚMA	Verdinho	1,20	0,00080
	CCU	Santa Augusta	1,30	0,00087
		São Geraldo	1,20	0,00080
		Santana	1,30	0,00087
	TREVISO	Possenti	1,40	0,00094
		Rossi	1,40	0,00094
	BARRO BRANCO	Mina 3G	1,40	0,00094
		Mina 3E/F	1,40	0,00094
	IBRAMIL	Lageado	1,30	0,00087
		Figueira	1,30	0,00087
	CBCA	Verdinho	1,20	0,00080
		São Simão	1,30	0,00087
		São Pedro	1,30	0,00087
	RIO DESERTO	Rio Deserto	1,30	0,00087
	BELLUNO	Vila Irapuá	1,30	0,00087
		Malha II SS	1,30	0,00087
CCC	Rio Mainá	1,30	0,00087	
	Catarinense	1,30	0,00087	
PR	CAMBUÍ	Armando Simões	1,50	0,00101
		Mina 115	1,50	0,00101
		Mina 830	1,50	0,00101
		Frente 20	1,50	0,00101
	KLABIN	Mina 2	1,50	0,00101

Nota: Densidade do metano: 0,67 Gg CH₄/10⁶ m³ CH₄

Fonte: Adaptado de SNIIEC (2006)

Durante o beneficiamento, parte do carvão é rejeitada. A quantidade típica de resíduos é de 20% da massa do carvão minerado que passa pelo beneficiamento. Esse percentual pode variar muito dependendo da operação, consequentemente de país para país. Onde os dados de atividade são obtidos na forma de carvão pronto para a venda (equivalente ao carvão pronto para transporte ferroviário neste estudo), a parte da produção que é perdida durante a lavagem deve ser considerada na estimativa do carvão minerado (IPCC, 2006a).

As emissões referentes ao consumo de diesel pelos equipamentos da mineração foram estimadas (eq.13) com base na metodologia do IPCC (IPCC, 2006a).⁸¹ A

⁸¹ Existem três opções metodológicas para estimar as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O das fontes de combustão *off-road*: Tier 1, Tier 2 e Tier 3. O método mais indicado para a determinação das emissões de CO₂ se baseia na utilização do consumo para cada tipo de combustível com dados específicos do país

metodologia do IPCC apresenta três valores, *default*, *lower* e *upper*. Em todos os casos foram utilizados os valores *default*.

$$EM = \sum_j(\text{combustível } j \times FE_j) \quad \text{eq.13}$$

Onde:

EM = emissões, em kg

Combustível j = tipo de combustível j consumido, em TJ

FE j = fator de emissão para o tipo de combustível j , em kg/TJ

j = tipo de combustível

Para o Tier 1, as emissões são estimadas usando-se os fatores de emissão listados na Tabela 11, considerando-se que para cada tipo de combustível, o total é consumido por uma categoria única de fonte *off-road*.

Tabela 11 – Fatores de emissão para fontes *off-road* e maquinário

Fator de emissão convertido	kg CO ₂ /kg de carvão	kg CH ₄ /kg de carvão	kg N ₂ O/kg de carvão
<i>Default</i>	0,0008305958	0,0000000465	0,0000003206
<i>Lower</i>	0,0008137806	0,0000000187	0,0000001603
<i>Upper</i>	0,0008384406	0,0000001166	0,0000009617

Fonte: Adaptado de IPCC (2006a)

Nota: Os valores apresentados na tabela foram convertidos de kg/TJ, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de carvão.

A Tabela 12 resume os dados utilizados para a etapa de mineração de carvão.

Tabela 12 – Dados da etapa de mineração de carvão utilizados no modelo CMLCA

Entrada - CML	Unidade por ano	Valor	Referências
Calcário - <i>rockdusting</i>	kg calcário/kg carvão	0,016263	Spath et al., 1999
Eletricidade	kWh/ kg carvão	0,012755	James et al., 2010
Diesel	kg/kg carvão	0,00026245	James et al., 2010
Saída - CML			
CH ₄ mineração	kg CH ₄ /kg carvão	0,011725	IPCC - tier 1
CH ₄ <i>post mining</i>	kg CH ₄ /kg carvão	0,001474	IPCC - tier 1
CH ₄ maquinário	kg CH ₄ /kg carvão	0,0000000465	IPCC - tier 1
Total CH ₄	kg CH ₄ /kg carvão	0,01320	IPCC - tier 1
CO ₂ maquinário	kg CO ₂ /kg carvão	0,0008305958	IPCC - tier 1
N ₂ O maquinário	kg N ₂ O/kg carvão	0,0000003206	IPCC - tier 1
Perda de carvão na mineração	%	20	IPCC, 2006a

considerado. No entanto, a obtenção de dados pode ser difícil devido ao número e diversidade de tipos de equipamentos, localização e padrões de uso associados a veículos *off-road* e maquinário. Além disso, dados estatísticos sobre consumo de combustível em veículos *off-road* não são muitas vezes coletados e/ou publicados. Neste caso, os métodos Tier mais completos serão necessários para o CO₂ e outros gases porque estes são mais dependentes da tecnologia e condições de funcionamento (IPCC, 2006a).

4.2.2 Transporte de carvão

No estágio de transporte da matéria-prima assumiu-se que o carvão será transportado em duas etapas principais⁸² e distintas. A primeira etapa será o transporte ferroviário da mina até o porto da empresa, localizado na Colômbia, com distância estimada em aproximadamente 150 km. A segunda etapa será o transporte marítimo, partindo do porto localizado na Colômbia até porto de Itaqui, com distância estimada em 4.000 km. Os fluxos de referência para estas etapas são 1 kg de “carvão para transporte ferroviário” e 1 kg de “carvão para transporte marítimo”, respectivamente.

4.2.2.1 Transporte ferroviário

A empresa prevê a construção de um ramal ferroviário para as suas minas de carvão ao seu porto, ambos localizados no Distrito de La Guajira, Colômbia.

A empresa optou por desenvolver uma solução logística própria integrada de acordo com o cronograma previsto em seu Plano de Negócios.⁸³ A meta é iniciar a operação do transporte no modal ferroviário em 2016, quando o volume transportado aumentará por causa da produção subterrânea de carvão na mina San Juan. O sistema integrado de transporte irá transportar um fluxo anual de até 20 milhões de toneladas de carvão para atender as necessidades das suas plantas termelétricas, no Brasil e no Chile (MPX, 2011c).

O plano de negócios da empresa mostra que o desenvolvimento da mina envolverá duas fases (Tabela 13). No entanto, neste estudo considerou-se que todo o carvão utilizado na UTE de Itaqui será transportado em sua primeira etapa pelo modal ferroviário e que a linha férrea já existirá independentemente do projeto de captura.

⁸² Estas duas etapas foram consideradas as principais e mais significativas. Em uma primeira avaliação do sistema foi incluída uma terceira etapa de transporte do carvão, que considerava uma esteira tubular fechada de 5 km de comprimento, do porto de Itaqui até o pátio de armazenagem de carvão da UTE.

⁸³ O sistema integrado inclui a construção de um porto próprio, melhoria de vias rodoviárias existentes, novos acessos rodoviários e, a partir de 2016, com o aumento da produção de carvão, uma ferrovia própria.

Tabela 13 - Características do porto do Departamento de La Guajira

Características	FASE I (até 10 Mtpa)	FASE II (até 20 Mtpa)
Recebimento do carvão	Caminhões e ferrovia	Caminhões e ferrovia
Pátio de armazenagem	Capacidade de 400 kt	Capacidade de 800 kt
Profundidade	15 m (natural)	20 m (dragagem)
Tipo de navio	Até <i>Panamax</i>	Até <i>Capesize</i>

Fonte: MPX (2010)

Em seu plano de negócios, a empresa considerou para o transporte de carvão um trem composto por 3 locomotivas de 2.000 hp (1.491 kW) com 60 vagões de 75 toneladas de carga útil cada. O ciclo previsto para o transporte ferroviário, considerando a ida e a volta, foi de aproximadamente 10 horas.⁸⁴

Com base nestas premissas e considerando a estimativa da produção inicial e final, iguais a 10 e 20 milhões de toneladas anuais, respectivamente, a empresa estimou o número de vagões e locomotivas necessários ao longo dos anos (Tabela 14). Estas estimativas consideraram uma taxa de disponibilidade para vagões de 90%, 321 dias de operação no ano e recursos adicionais (locomotivas) para auxílio nos pontos de carga e descarga.

Tabela 14 - Frota ferroviária necessária para as operações da empresa

Volume (t)	Vagões/dia	Quantidade de trens/dia (com 60 vagões cada)	Frota necessária	
			Locomotivas	Vagões
10.000.000	415	7	21	231
20.000.000	831	17	36	462

Fonte: MPX (2011c)

A principal fonte de emissão direta de GEE nesta etapa é a queima de diesel nos motores a combustão interna das locomotivas, sendo o CO₂ o principal GEE emitido.

A estimativa das emissões para a etapa de transporte ferroviário foi realizada com base no manual do IPCC (IPCC, 2006a). Existem três opções metodológicas (Tier 1, Tier 2 e Tier 3) para a estimativa do CO₂, CH₄ e N₂O. A segunda opção e a terceira opção são na verdade variações da primeira que usa como base a eq.14.

$$EM = \sum_j (\text{combustível } j \times FE_j) \quad \text{eq.14}$$

⁸⁴ Este tempo foi estimado pela própria empresa em 12 horas, incluindo os tempos de carregamento nas minas e descarga no porto. Para o estudo o tempo foi estimado em 10 horas, considerando-se uma velocidade média de 29 km/h para a composição. Esta velocidade foi baseada em (ANTF, 2011) e representa um valor médio para o transporte ferroviário brasileiro. Vale ressaltar que essa média de velocidade é um dos problemas para o caso brasileiro, sendo inferior a de diversos países com malha ferroviária mais desenvolvida. Por exemplo, na China a média é de 80 km/h.

Onde:

EM = emissões, em kg

Combustível j = tipo de combustível i consumido, em TJ

FE j = fator de emissão para o tipo de combustível j , em kg/TJ

j = tipo de combustível

Para o Tier 1, as emissões são estimadas utilizando-se os fatores de emissão específicos (Tabela 15), considerando que para cada tipo de combustível o combustível total é consumido por um único tipo de locomotiva. Para CO₂, o Tier 2 utiliza a eq.14 novamente com dados específicos de cada país sobre o teor de carbono do combustível (IPCC, 2006a).

Tabela 15 – Fatores de emissões para transporte ferroviário

Fator de Emissão	kg CO ₂ /kg de carvão	kg CH ₄ /kg de carvão	kg N ₂ O/kg de carvão
<i>Default</i>	0,0088949889	0,0000004982	0,0000034332
<i>Lower</i>	0,0087149284	0,0000001985	0,0000016996
<i>Upper</i>	0,0089790171	0,0000012361	0,0000101975

Fonte: Adaptado de IPCC (2006a)

Nota: Os valores apresentados na tabela foram convertidos de kg/TJ, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de carvão.

Com relação ao Tier 2, as emissões de CH₄ e N₂O são estimadas usando-se os fatores de emissão específicos de cada país e para cada combustível (eq.15). Se disponíveis os fatores de emissão devem ser específicos para o tipo de locomotiva. No caso estudado, a etapa do transporte ferroviário ocorrerá na Colômbia e os fatores de emissão específicos para este caso não estão disponíveis. Por esta razão foi utilizado o Tier 3 para o cálculo das emissões de CH₄ e N₂O.

$$EM = \sum_i (\text{combustível } i \times FE \text{ } i) \quad \text{eq. 15}$$

Onde:

EM = emissões em kg

Combustível i = tipo de combustível ij consumido em TJ

FE i = fator de emissão para o tipo de combustível i em kg/TJ

i = tipo de locomotiva

A eq. 16 representa a metodologia mais detalhada (Tier 3).

$$EM = \sum_i (N_i \times H_i \times P_i \times LFi \times FE_i) \quad \text{eq. 16}$$

Onde:

EM = emissões de CH₄ ou N₂O, em kg

N_i = número de locomotivas do tipo i

H_i = horas de uso da locomotiva por ano

P_i = média de potência da locomotiva i, em kW

LF_i = fator de carga típico da locomotiva (entre 0 e 1)

FE_i = fator médio de emissões para a locomotiva i, em kg/kWh

i = tipo de locomotiva e tipo de jornada

A Tabela 16 resume os dados utilizados na simulação das emissões com a metodologia Tier 3.

Tabela 16 – Dados para simulação das emissões do transporte ferroviário

Dados	Unidade	Valor
Capacidade por vagão	toneladas	75
Número de vagões por trem	unidades	60
Número de locomotivas por trem	unidades	3
Potência da locomotiva	kW	1.491
Capacidade bruta do trem	Toneladas de carvão	4.500
Velocidade média do trem	km/h	29
Número de viagens - caso 1	viagens / ano	178
Número de viagens - caso 2	viagens / ano	215
Distância - ida e volta	km	300
Tempo de viagem (ida e volta)	horas	10
Horas de uso - caso 1	horas /ano	1.842
Horas de uso - caso 2	horas /ano	2.226
Consumo de combustível	kg/kWh	0,246
Fator de capacidade ¹	%	90
Consumo do trem	kWh/kg de carvão	0,011425287
Consumo de diesel / kg de carvão	kg diesel/kg de carvão	0,002810621

Nota: ¹ Consumo estimado com base na média dos consumos fornecidos pelo manual do IPCC para locomotivas com potência maiores que 3.000 kW.

Aqui vale ressaltar que na estimativa das emissões utilizou-se a metodologia Tier 3, que é a mais completa sugerida pelo IPCC.⁸⁵ No entanto, não estão disponíveis

⁸⁵ Segundo o manual do IPCC, há pouca ou nenhuma vantagem em ir além Tier 2 para estimar as emissões de CO₂.

os fatores para o país estudado e nem o tipo exato do motor da locomotiva. Neste caso, utilizou-se uma média dos fatores de emissão para CO₂ disponíveis como exemplo, no próprio manual do IPCC.

Algumas simplificações foram realizadas na estimativa das emissões. Por exemplo, os cálculos assumem que as locomotivas de um trem, possuem a mesma intensidade energética e perfil de emissões, operando na frente ou no final da composição (*backhaul* e *fronthaul*). Optou-se pela metodologia do IPCC porque para os dados de emissões obtidos em outros estudos que consideravam o transporte ferroviário de carvão para o caso americano atendiam ao *Tier 4 Emissions Standards*, que entra em vigor em 2015. Neste cenário o diesel utilizado é do tipo ULSD, com 15 ppm de enxofre. Esta não é a realidade do Brasil ou da Colômbia.

Não foram consideradas perdas de carvão e consumo de água nesta etapa de transporte ferroviário de carvão.

4.2.2.2 Transporte marítimo

Os motores marítimos contribuem consideravelmente para as emissões de dióxido de enxofre, material particulado e óxidos de nitrogênio. Os impactos relacionados a essas emissões se tornam ainda mais significativos quando são considerados nos portos ou em localidades próximas à costa.

Os combustíveis utilizados nos motores marítimos têm um conteúdo de enxofre maior do que os combustíveis destinados ao uso rodoviário. Por exemplo, o diesel marítimo e o óleo combustível marítimo possuem conteúdo de enxofre geralmente na faixa de 1 a 3%, enquanto que o diesel rodoviário se encontra na faixa entre 2.000 e 50 ppm, ou seja, na faixa de 0,2% a 0,0005%, respectivamente, para o caso do Brasil (BC AIR QUALITY, 2011).

Segundo o IBAMA (2008), o carvão será transportado em navios com capacidade bruta de até 80.000 toneladas.⁸⁶ A distância navegada entre o porto na Colômbia e o Porto de Itaquí foi estimada em 4.000 km ou 2.160 milhas náuticas,

⁸⁶ Segundo IBAMA (2008), serão utilizados navios do tipo PANAMAX, que recebem esse nome, porque possuem tamanho máximo aceitável para transitar através das eclusas do Canal do Panamá, as quais limitam a largura em 32,3 metros, o comprimento em 275 metros e a profundidade (calado), em 12 metros, aproximadamente (MILLER *et al.*, 2009). Esta é uma embarcação adequada para o transporte de granéis sólidos com capacidade de transporte entre 50.000 toneladas e 75.000 toneladas de carga líquida (ANTAQ, 2011).

aproximadamente.⁸⁷ Considerando-se a capacidade líquida do navio igual a 75.000 toneladas e uma carga anual de aproximadamente 801.100 toneladas de carvão, serão necessárias aproximadamente 11 viagens (ida e volta) para abastecer a UTE durante o período de um ano para o caso 1. No caso 2, que considera o CCS, o aumento do consumo de carvão aumenta para 13 (ida e volta), o número de viagens anuais.

Vale ressaltar que foram contabilizadas somente as emissões estimadas para o motor principal do navio, durante a viagem. Assim, outras fontes de emissões, como os motores auxiliares, turbinas ou boilers não foram considerados, tampouco as operações de manobras ou o tempo que o navio fica atracado em espera com os equipamentos ligados.

A estimativa das emissões na etapa de transporte marítimo teve como base na metodologia simplificada proposta no estudo TROZZI; VACCARO (1998). Este propõe duas metodologias, uma simplificada e uma completa, com aplicações distintas. A metodologia simplificada deve ser aplicada para casos onde não são consideradas as operações transientes, de carregamento e descarregamento no porto e na geração auxiliar de energia. A metodologia completa considera as emissões do navio durante a viagem e durante as operações portuárias (TROZZI; VACCARO, 1998).⁸⁸

A Tabela 17 resume os fatores de emissão para a categoria de motor escolhido para o estudo, do tipo baixa rotação (*slow speed engine*).⁸⁹

Tabela 17 – Fatores de emissão (g/t de combustível) para GEE

GEE	g/t de combustível
CO ₂	3.179.000,0
N ₂ O	168,0
CH ₄	32,4

Fonte: COOPER; GUSTAFSSON (2004)

O consumo médio de combustível estimado para o tipo de navio *solid bulk* é de 33,8 toneladas por dia (TROZZI; VACCARO, 1998). Como o consumo foi estimado em dias de operação do navio, será necessário o cálculo do número de dias para o navio percorrer a distância entre os dois portos. O número de dias de navegação pode ser

⁸⁷ A distância do Porto de Cartagena (Colômbia) até o porto de Pecém é de 4656 km (2495 milhas náuticas) (SEARATES, 2011) (PORTWORLD, 2011).

⁸⁸ Para a metodologia completa são consideradas as emissões de outras etapas: manobra, o período que o navio fica atracado (*hotelling*) e a etapa de cruzeiro. Durante o período que o navio permanece atracado energia elétrica deve ser fornecida para a iluminação, aquecimento, refrigeração, ventilação, etc. Navios equipados com motores de combustão interna normalmente usam geradores movidos a diesel para fornecer energia auxiliar (TROZZI; VACCARO, 1998)

⁸⁹ Os fatores de emissão utilizados para o cálculo dos poluentes foram obtidos no estudo COOPER; GUSTAFSSON (2004).

estimado utilizando-se a velocidade estimada do navio e a distância a ser percorrida. A média de velocidade, para um navio do tipo *solid bulk*, é de 14,32 nós⁹⁰ (TROZZI; VACCARO, 1998). Assim, cada viagem (ida e volta) dura 13 dias, aproximadamente. A Tabela 18 resume os valores considerados e calculados.

Tabela 18 – Dados utilizados para o transporte marítimo de carvão

Dados	Unidade	Valor
Velocidade média do navio	nós	14,30
Distância por viagem (ida e volta)	milhas náuticas	4.320
Tempo por viagem	horas	302
Tempo por viagem	dias	13
Consumo médio de combustível do navio	toneladas/dia	33,80
Consumo de combustível por viagem (ida e volta)	toneladas	425
Capacidade do navio (líquida)	toneladas	75.000
Número de viagens por ano – caso sem CCS	unidades	11
Consumo anual de combustível – caso sem CCS	toneladas	4.544
Número de viagens – caso com CCS	unidades	13
Consumo anual de combustível – caso com CCS	toneladas	5.493
Consumo de diesel / kg de carvão transp.	kg diesel/kg carvão	0,005673

A Tabela 19 resume os fatores de emissões utilizados para a etapa do transporte marítimo de carvão.

Tabela 19 – Fatores de emissões para o transporte marítimo de carvão

GEE	g/t de combustível	kg/kg de diesel	kg/kg de carvão transp	Referência
CO ₂	3179000,0	3,179	0,0180336000	Cooper e Gustaffson (2004)
N ₂ O	168,0	0,000168	0,0000009530	Cooper e Gustaffson (2004)
CH ₄	32,4	0,0000324	0,0000001838	Cooper e Gustaffson (2004)

Não foi considerado nenhum consumo de água para a etapa de transporte marítimo.

4.2.3 Mineração de calcário e produção de cal

A cal não é encontrada diretamente na natureza e precisa ser obtida por meio da calcinação do calcário. Os processos básicos na produção da cal são: a mineração do calcário bruto,⁹¹ preparação do calcário (britagem e dimensionamento) para os fornos,

⁹⁰ A unidade nó (knots) = milhas náuticas por hora.

⁹¹ A mineração ou extração consiste em remover blocos ou pedaços de pedra de um depósito identificado ou pedreira. O processo é relativamente simples e as diferenças técnicas específicas utilizadas decorrem muitas vezes de variações nas propriedades físicas do depósito de calcário em si, tais como plano de fratura, densidade da rocha e profundidade, ou de considerações de custo e de preferência do operador da pedreira (BC AIR QUALITY, 2011).

calcinação do calcário, processamento da cal ainda por hidratação, e armazenamento e operações de manipulação e transporte (EPA, 1995).

O processo foi incluído no inventário desta tese devido a sua importância. Segundo o manual do IPCC, embora o processo principal relacionado às emissões resultantes da calcinação de carbonato seja similar entre as categorias de fontes na indústria mineral, três categorias podem ser destacadas devido à significativa contribuição para as emissões globais: produção de cimento, produção de cal e produção de vidro (IPCC, 2011).

Sendo assim, considerou-se neste estudo que a cal será obtida no estado do Ceará devido à proximidade e a presença de jazidas e usinas de calcificação (IBAMA, 2008). O consumo estimado da cal para o uso na etapa de dessulfurização (ver item 4.2.5) foi estimado em aproximadamente 5.315 t/ano e 6.420 t/ano, para o caso 1 e caso 2, respectivamente. Os fluxos de referência para esta etapa são: 1 kg de “calcário para calcinação”, referente ao processo de mineração de calcário e 1 kg de “cal para transporte”, referente ao processo de calcinação.

4.2.3.1 Mineração do calcário

A maior parte das minas de calcário, tanto no Brasil quanto no mundo, são lavradas a céu aberto. O principal motivo para essa configuração é o custo reduzido (MME, 2009).⁹²

Segundo LUZ; LINS (2009), as principais etapas da lavra de calcário a céu aberto incluem as seguintes operações: remoção do capeamento, perfuração, desmonte por explosivos e transporte até a usina de processamento.⁹³ Nesta etapa, que envolve a mineração propriamente dita, as emissões derivam principalmente do funcionamento dos equipamentos, movidos a diesel, e da movimentação do calcário. No

⁹² No Brasil, apenas uma mina de porte médio possui operações que não são exclusivamente a céu aberto. Neste caso a mina é classificada como mina mista. Quando a operação ocorre a céu aberto a mina também é chamada de pedreira.

⁹³ A remoção do capeamento é o elemento-chave no custo da lavra a céu aberto. Para cada operação ou situação, há uma razão estéril/minério economicamente viável. A escala de produção é responsável pela viabilidade econômica de várias minas, especialmente tendo em vista os produtos serem de valor agregado relativamente baixo. A seleção dos equipamentos varia com a particularidade de cada operação, capacidade de produção, tamanho e forma do depósito, distância de transporte, estimativa da vida útil da mina, localização em relação aos centros urbanos e fatores sócio-econômicos (LUZ; LINS, 2009).

beneficiamento primário, que envolve a britagem, as emissões correspondem ao consumo de energia elétrica nos equipamentos (MME, 2009).⁹⁴

Os melhores dados para a etapa de mineração de calcário foram obtidos para pedreiras e processamento de aproximadamente 206.710 m³ (7,3 milhões de ft³) e 93.440 m³ (3,3 milhões de ft³) de calcário, respectivamente. A energia média necessária para produzir 1 m³ de calcário é de 565 MJ (ou 160 MJ por ft³ de calcário).⁹⁵

A Tabela 20 mostra a distribuição dessa energia por m³ do produto de calcário produzido. É possível observar o significativo percentual da participação do diesel e da eletricidade no fornecimento da energia para a pedreira e para o processamento.

Tabela 20 - Consumo de energia para a produção de 1 m³ de calcário

Energia	Pedreira		%	Processamento		%
	(MJ/ft ³)	(MJ/m ³)	(MJ/m ³)	(MJ/ft ³)	(MJ/m ³)	(MJ/m ³)
Eletricidade	1,00	35,31	5%	120	4237,77	84%
Gás natural	0,00	0,00	0%	0,053	1,87	0%
Propano	0,16	5,65	1%	8,7	307,24	6%
Diesel	18,00	635,67	91%	12	423,78	8%
Gasolina	0,58	20,48	3%	2,3	81,22	2%
Total	19,74	697,11	100%	143,053	5051,88	100%

Fonte: Adaptado de NSC (2009)

Nesta etapa não há uso direto significativo de água.⁹⁶ A maior preocupação está relacionada com a possível degradação dos recursos hídricos na região da área de lavra, devido à grande movimentação de minério. O risco está relacionado com possíveis efeitos sobre a qualidade da água, por causa de assoreamento ou da suspensão de sólidos (MME, 2009).

Assim, na etapa de mineração do calcário foram considerados os consumos de diesel e eletricidade e desconsiderado o uso de água. A Tabela 21 resume os fatores de emissão para a mineração de calcário.

⁹⁴ Embora o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) possam ter emissões significativas em algumas atividades de mineração, como é o caso do CH₄ na mineração do carvão, dado o conhecimento científico atual, estas emissões são assumidas como insignificantes para a mineração do calcário (IPCC, 2006b).

⁹⁵ O estudo NSC (2009) apresenta um conjunto de dados que representam mais de 7,3 milhões de ft³ de calcário extraído e cerca de 3,3 milhões ft³ de produtos de calcário gerado na América do Norte. Os dados também refletem uma diversidade de operações em relação ao tamanho e a localização. Os entrevistados indicaram produção líquida anual na pedreira variando de cerca de 4.300 ft³ para mais de 1,4 milhões ft³, enquanto os processadores relataram uma série de cerca de 5 a 600,000 ft³ / ano. Os dados foram obtidos por pedreiras de empresas localizadas em 4 estados dos EUA, bem como de uma província canadense (NSC, 2009).

⁹⁶ O estudo (BC AIR QUALITY, 2011) apresenta um consumo de água para essas duas etapas. No entanto este consumo não foi considerado neste inventário. Utilizou-se a informação do MME, para considerar o consumo de água desta etapa como não significativo.

Tabela 21 - Fatores de emissão para a mineração de calcário

	kg CO ₂ /kg calcário	kg CH ₄ /kg de calcário	kg N ₂ O/kg de carvão calcário
Fatores de emissão	0,0313283628	0,0000017546	0,0000120916

4.2.3.2 Produção da cal

A produção de cal pode se referir a dois tipos: a cal virgem (ou cal viva) e a cal hidratada.⁹⁷ O primeiro tipo, que será o utilizado na UTE, é o produto da calcinação de rochas carbonatadas (calcário) a temperaturas próximas à da fusão.⁹⁸ O processo de calcinação consiste no aquecimento dos carbonatos a temperatura de aproximadamente 1.110 °C, permitindo a liberação de CO₂ e a geração de CaO - óxido de cálcio (IPCC, 2006b; MINEROPAR, 1999).⁹⁹

O processo de calcinação pode ocorrer em diversos tipos de fornos por meio da eq.16 (EPA, 1995):



Teoricamente, para cada tonelada de cal virgem, são necessárias 1,7 a 1,8 toneladas de calcário a ser calcinado, porém na prática, as indústrias produtoras de cal virgem observam uma relação de aproximadamente 2,0 toneladas de calcário para cada tonelada de cal virgem produzida (LUZ; LINS, 2009; MINEROPAR, 1999).

Monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NOx) são produzidos nos fornos¹⁰⁰ de calcinação. As emissões de SO₂ são influenciadas por diversos fatores: o conteúdo de enxofre do combustível, o teor de enxofre e a forma mineralógica (pirita ou gesso) do calcário, a qualidade da cal a ser produzido e o tipo de forno empregado (EPA, 1995).

⁹⁷ O segundo tipo, a cal hidratada, consiste em hidratar a cal, agregando-se 18% de água ao peso da cal. O processo de hidratação é uma reação exotérmica de 278 kcal por kg de cal hidratada produzida (MINEROPAR, 1999). Esse processo envolve uma demanda por água, baseada na necessidade da hidratação da cal virgem. Nesse processo, uma tonelada de cal virgem resulta em 1,3 toneladas de cal hidratada (MME, 2009).

⁹⁸ No entanto, para servir para fabricação de cal industrial o calcário precisa ter uma determinada pureza. Para ser classificado como calcário, a rocha deve conter pelo menos 50 % de carbonato de cálcio. Quando a rocha contém de 30 a 45 % de carbonato de magnésio, a rocha é chamada de dolomita, ou calcário dolomítico. A cal também pode ser produzida a partir de aragonite, giz, coral, mármore e conchas do mar (EPA, 1995).

⁹⁹ No processo de calcinação a massa original de CaCO₃ sofre uma redução de aproximadamente 44% em função da liberação de CO₂. No caso de calcários magnesianos, a redução de massa pode representar 48%. Essa perda é chamada de “perda ao fogo” (LUZ; LINS, 2009).

¹⁰⁰ Basicamente há quatro tipos de fornos para calcinação do calcário: verticais, rotativos, horizontais e leito fluidizado. A escolha por um determinado tipo de forno tem como base as características do material a ser calcinado e pelo tipo de produto final que se deseja obter (IPECE, 2004).

Por causa da grande variedade de elementos influenciadores, os fatores de emissão de SO₂ estão sujeitos a variações significativas de acordo com a planta. A principal fonte de emissões de enxofre é o combustível utilizado no forno, e uma grande parcela do enxofre do combustível não é emitida por causa da reação do SO₂ com óxidos de cálcio no forno. As emissões de SO₂ podem ser reduzidas, se o equipamento utiliza um processo úmido (*wet process*) ou permite um contato entre o CaO e SO₂ (EPA, 1995).

O forno vertical é o mais difundido no Nordeste do Brasil e o tipo de combustível utilizado pode ser lenha, carvão (mineral ou vegetal), coque, gás ou óleo combustível (IPECE, 2004).¹⁰¹ No entanto, no Brasil os combustíveis empregados são: gás natural, óleo combustível, lenha e carvão vegetal. Este perfil de utilização de combustíveis é bastante dinâmico, podendo variar significativamente ano a ano. (PEREIRA; FERREIRA, 2009).¹⁰²

As reações envolvidas são reversíveis, portanto, podem liberar e absorver CO₂, em diferentes etapas. Por exemplo, na produção de cal virgem, a emissão de CO₂ pode representar aproximadamente 44% do peso do calcário processado, o que corresponde a 770 kg de CO₂ por tonelada de cal produzida (MME, 2009).

Na etapa de produção de cal hidratada (Ca(OH)₂) o processo não gera emissões líquidas de CO₂ (MME, 2009). As emissões iniciais de CO₂ referentes ao processo de calcinação são teoricamente totalmente anuladas na etapa de precipitação (SAMPAIO, 2010).

No entanto, as emissões referentes ao consumo de combustíveis para a calcinação, além de outras demandas energéticas, que são significativas, correspondentes ao consumo de energia utilizada no processo, não são compensadas. Estas emissões são estimadas em aproximadamente 361 kg CO₂ por tonelada de calcário processado na calcinação (MME, 2009).¹⁰³

¹⁰¹ Nos EUA, o forno rotativo é o mais utilizado, representando 90 % de toda a produção da cal no país. São utilizados como combustível o carvão, óleo combustível e gás natural. Trocadores de calor são utilizados para pré-aquecer a carga dos fornos utilizando o calor da cal produzida e dos gases de exausto do forno (EPA, 1995).

¹⁰² Segundo (PEREIRA; FERREIRA, 2009), há alguns anos o óleo combustível predominava e representava 50% do combustível consumido.

¹⁰³ O consumo da cal pode em alguns casos não resultar em emissões líquidas de CO₂ para a atmosfera. O uso de cal hidratada para o processo de *water softening*, por exemplo, resulta na reação de CO₂ com a cal para formar carbonato de cálcio, o que resulta em emissões líquidas de CO₂ nulas para a atmosfera. Da mesma forma, o precipitado de carbonato de cálcio, que é usado na indústria de papel, bem como para outras aplicações industriais, é um produto derivado da reação da cal hidratada com o CO₂ (IPCC, 2006b).

Se as emissões de CO₂ provenientes da queima de combustível são estimadas utilizando-se fatores de emissões para fontes de combustão externa, para o caso da emissão de CO₂ liberado pelas reações de produção de calcário (*non-combustion* CO₂), apenas fatores de emissão de CO₂ (*non-combustion*) devem ser utilizados. Segundo o estudo (EPA, 1995), as emissões são estimadas em 915 kg de CO₂/t para a cal produzida de calcário dolomítico e 785 kg de CO₂/t de cal produzida de calcário calcítico.¹⁰⁴

Segundo PEREIRA E FERREIRA (2009), para o caso brasileiro, a parte da emissão do CO₂ que é proveniente da decomposição do calcário (1,75 t calcário/t cal virgem) representa 770 kg CO₂/t de cal. Ainda segundo PEREIRA E FERREIRA (2009), a parcela de CO₂ emitido pela queima do combustível foi estimada com base na relação energia/emissão para o gás natural (4,26 mil kcal/t de CO₂) e o consumo específico para a cal virgem de 1.026 mil kcal/t, resultando em 241 kg de CO₂/t de cal (PEREIRA; FERREIRA, 2009).¹⁰⁵ A Tabela 22 resume os dados utilizados na etapa de produção da cal.

Tabela 22 – Dados para a produção da cal

Descrição	Unidade	Valor	Referência
Razão de produção da cal	t calcário/t de cal	2	Pereira e Ferreira (2009)
Calcinação - reação	kg CO ₂ / t de cal	770	Pereira e Ferreira (2009)
Calcinação - combustível dos fornos	kg CO ₂ / t de cal	241	Pereira e Ferreira (2009)
Total de emissão	kg CO ₂ /kg de cal	1,011	Pereira e Ferreira (2009)

4.2.4 Transporte da cal

A cal que será utilizada na UTE de Itaquí será transportada do estado do Ceará pelo modal rodoviário (IBAMA, 2008). O fluxo de referência para esta etapa é igual a 1 kg de cal transportado (“cal para UTE”).

No Ceará, o calcário é encontrado em 21 municípios, mas a maior concentração de produtores está em Limoeiro do Norte e Sobral (IPECE, 2004).¹⁰⁶ Na

¹⁰⁴ Estes são os mesmos valores utilizados no método Tier 1 (IPCC, 2006b), que aplica um fator de emissão para a quantidade total de cal produzida. O fator de emissão é baseado em razões estequiométricas, que variam dependendo do tipo de cal produzida. A relação estequiométrica é a quantidade de CO₂ liberada pelo precursor do carbonato de cálcio. Mais detalhes podem ser obtidos em (IPCC, 2006b). Neste estudo foram utilizados os valores do estimados para o caso brasileiro.

¹⁰⁵ Vale ressaltar que nesta estimativa de PEREIRA E FERREIRA (2009) não foram consideradas as caeiras, que são pequenos fornos geralmente sem registros legais. Estes fornos usam lenha como combustível, o que em pode resultar em desmatamento. Neste estudo, utilizou-se o fator de PEREIRA E FERREIRA (2009). Obviamente existem outros poluentes liberados pelos fornos, esta decisão foi tomada devido a dificuldade envolvida na estimativa da proporção de cada combustível utilizado.

¹⁰⁶ As empresas que atuam nesse segmento no estado do Ceará são: Grupo Carbomil (Limoeiro do Norte), Companhia Brasileira de Equipamento (Barbalha), Cimento Portland (Coreaú e Sobral), Companhia Mineira de Metais (Frecheirinha), Calcário do Brasil (Cascavel, Limoeiro do Norte e Tabuleiro do Norte),

simulação deste estudo, considerou-se que a cal será comprada nas localidades mais próximas a Itaqui. Na tentativa de minimizar o erro da estimativa, foi realizado um levantamento das principais localidades de produção de calcário e a distância até Itaqui, pelo modal rodoviário (Tabela 23).

Tabela 23 - Distâncias até a localidade da UTE – Itaqui via rodovias

Cidades (CE)	Distância (km)	Rodovias
Coreaú	702	BR 222
	688	BR 222 – PI 213
	798	BR 316
Sobral	698	BR 222
Limoeiro do Norte	1122	BR 222
	1101	BR 226
	1141	BR 265

Fonte: GOOGLMAPS (2011)

Com base nos dados obtidos, optou-se por considerar que a cal será comprada na região de Sobral que está a uma das menores distâncias e é atendida pela melhor rodovia. Neste caso, a distância média considerada foi de 700 km para o transporte do produto.

Considerando 5.260 horas de operação por ano, o consumo de cal estimado no modelo IECM será de aproximadamente 5.318 toneladas por ano para o caso 1, sem captura, e 6.428 toneladas por ano para o caso 2, com captura.

Para a estimativa do número de viagens necessárias para abastecer a UTE considerou-se o uso de uma carreta com capacidade de 30 toneladas de carga útil.¹⁰⁷

Assim, no período de um ano seriam necessárias 177 e 214 viagens, para o caso 1 e o caso 2, respectivamente. A hipótese contabilizou as viagens de ida e as viagens de volta da carreta (sem carga) para o percurso com a menor distância. A Tabela 24 resume os dados utilizados na estimativa. O consumo de diesel foi estimado em aproximadamente 0,01404667 kg/kg de cal transportada.

Luna (Farias Brito), Micronita (Limoeiro do Norte), Mineração Casa da Pedra (Santana do Cariri), Mineração GC e Mineração Miliane (Jaguaruana), Mucuripe Mineração (Redenção), Ibacip (Barbalha), Hidracor (Acarape e Canindé), Carcal (Canindé), Corcal (Coreaú), Mineração Monte Barroso (Forquilha), Minerj (redenção) e Quimbara (Tabuleiro do Norte) (IPECE, 2004).

¹⁰⁷ A carreta mais indicada para o transporte de produtos granulados e/ou pulverulentos é a carreta do tipo silo. No entanto, também podem ser utilizadas em carretas e caminhões caçamba, carrocerias e graneleiros, além da carreta silo (SINDIPESA, 2011). Por envolver muitas incertezas, tendo em vista que o mesmo fornecedor pode utilizar diferentes tipos de carreta para o transporte da cal, optou-se por considerar a mesma capacidade de carga (igual a 30 toneladas de carga útil) para todas as etapas que envolvem o transporte rodoviário. Por exemplo, para uma carreta silo de 54 m³ a capacidade de carga pode ser estimada utilizando-se a densidade da cal virgem igual a 3,35 g/cm³. A sua densidade aparente é de 0,9 a 1,1 g/cm³.

Tabela 24 - Dados utilizados na etapa de transporte da cal

Descrição	Unidade	Caso 1	Caso 2
Distância média estimada	km	700	700
Tempo de operação da UTE	horas/ano	5.260	5.260
Consumo de cal	toneladas/ano	5.318	6.428
Número de viagens para o transporte	unidade/ano	177	214
Consumo total de combustível (diesel) por ano	litros/ano	86.858	104.986

A estimativa das emissões para a etapa de transporte da cal foi realizada com base no manual (IPCC, 2006a). Os dados da Tabela 25 e da Tabela 26 resumem os dados utilizados do modal rodoviário e os fatores de emissões, respectivamente. Estes dados também serão utilizados para as estimativas de outras etapas que utilizam o modal rodoviário.

Tabela 25 - Dados utilizados para o cálculo do consumo no transporte rodoviário

Dados	Unidades	Valores	Referência
PBT da carreta	t	45	(SINDIPESA, 2011)
Carga útil da carreta	t	30	(SINDIPESA, 2011)
Consumo médio de combustível com carga	km/l	2	(SINDIPESA, 2011)
Consumo médio de combustível sem carga	km/l	5	(SINDIPESA, 2011)
Densidade do diesel	kg/m ³	0,86	(EPE, 2011)
PCI diesel	kcal/kg	10.100	(EPE, 2011)

Tabela 26 - Fatores de emissões para transporte rodoviário de cal

Fator de Emissão	kg CO ₂ /kg de cal	kg CH ₄ /kg de cal	kg N ₂ O/kg de cal
<i>Default</i>	0,0444545735	0,0000023397	0,0000023397
<i>Lower</i>	0,0435546833	0,0000009599	0,0000007799
<i>Upper</i>	0,0448745222	0,0000056993	0,0000071991

Fonte: Adaptado de IPCC (2006a)

Nota: Os valores apresentados na tabela foram convertidos de kg/TJ, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de cal.

Não foi considerado nenhum consumo direto de água para a etapa de transporte rodoviário da cal.

4.2.5 Unidade Termoelétrica (UTE)

As simulações realizadas no software IECM utilizaram parâmetros e uma configuração de equipamentos similar a UTE Itaquí. Os resultados das simulações sempre serão dados em relação à potência líquida.¹⁰⁸ O fluxo de referência para esta etapa é igual a 1 kWh.

¹⁰⁸ A potência líquida é a potência disponível depois da utilização de parte da potência por equipamentos auxiliares.

As características da potência dos principais equipamentos auxiliares da planta simulada estão resumidas na Tabela 27.¹⁰⁹

Tabela 27 - Características da planta simulada

Parâmetros da UTE	Unidade	Caso 1	Caso 2
Potência elétrica bruta	MW	360,0	360,0
Potência elétrica líquida	MW	331,0	273,9
Planta base	MW	20,0	21,9
Controle de NOx (<i>in-furnace control</i>)	MW	0,0	0,0
Filtro manga - <i>Fabric Filter Use</i> (MW)	MW	1,4	1,4
<i>Spray Dryer Use</i> (MW)	MW	2,7	2,7
CO ₂ Capture System Use	MW	0,00	48,8
Horas operacionais no ano	Horas	5.260	5.260
Eficiência, PCS	%	29,7	24,6

Fonte: Simulação no IECM

4.2.5.1 Condições atmosféricas

Os valores utilizados nas simulações para a temperatura média anual e para a umidade relativa do ar média foram os da região do Porto de Itaqui, em São Luiz do Maranhão, iguais a 26,1 °C a 86%, respectivamente (IBAMA, 2008).

A temperatura de saída do gás de exaustão do economizador, a temperatura de saída do gás de exaustão do *air preheater* e a eficiência da caldeira derivaram da simulação do NETL em RUBIN *et al.* (2007), para uma planta com as mesmas características. A eficiência de 88,4% para a caldeira, calculada pelo modelo IECM, é compatível com a eficiência de 90% estimada pelo fabricante da caldeira.

4.2.5.2 Fator de capacidade

O fator de capacidade (FC) é uma variável de extrema importância para as simulações realizadas, uma vez que as termelétricas brasileiras a carvão operam com flexibilidade parcial.

O fator de capacidade é a relação entre a potência média obtida ao longo de um ano pela potência instalada na UTE. Este fator reflete o uso da energia ao longo de todos os meses do ano e a disponibilidade da energia para consumo (eq. 17).

¹⁰⁹ O software IECM permite que seja considerada a utilização de gás natural e óleo combustível de forma auxiliar ao carvão demandado. A planta pode utilizar certa quantidade de óleo diesel para determinadas condições de operação. Isso ocorre na planta de Itaqui. Outra opção seria fornecer a energia para a regeneração do solvente na planta de captura com um fluxo auxiliar de gás natural para a planta. Nos casos simulados considerou-se que apenas o carvão será utilizado como combustível.

$$FC = \frac{\text{energia produzida (kWh/a)}}{\text{capacidade instalada (kW) x (8.760 h/a)}} \quad \text{eq. 17}$$

As condições de operação da UTE são determinadas por contratos de *take or pay* de compra do carvão e por condicionantes técnicos. A inflexibilidade na operação das plantas pode ser reduzida com a estocagem de carvão quando as condições hidrológicas favoráveis a geração hidroelétrica gerarem uma redução na geração a carvão. O preço do carvão, apesar de apresentar uma volatilidade menor que a do petróleo, pode apresentar diferenças significativas entre diferentes carvões, por causa do tipo de mina e qualidade, especialmente entre o carvão importado e o nacional.

Como as plantas a carvão no Brasil operam no regime de semi-base o fator de capacidade adotado foi de 60%. Este valor é compatível com a estimativa de apresentada no parecer do IBAMA (2008), que prevê a operação da UTE durante um período de 4 a 6 meses por ano. No entanto, a planta deverá estar sempre pronta para o *start-up* imediato, com o objetivo de atender à solicitação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).¹¹⁰

4.2.5.3 Condições do ciclo a vapor

Ciclos a vapor subcríticos operam com pressões de vapor abaixo de 22 MPa e as temperaturas podem atingir aproximadamente 550° C (MIT, 2007). A simulação da planta base obteve uma eficiência de 1ª Lei de aproximadamente 29,5% no regime subcrítico.

4.2.5.4 Controle de emissões

A simulação das plantas considerou condições similares às condições de operação e aos equipamentos que serão empregadas em Itaqui, uma vez que a utilização

¹¹⁰ Vale ressaltar que, seguindo a tendência mundial, as usinas térmicas brasileiras a carvão operam com as mesmas tecnologias da época de sua implantação e seus despachos, em condições flexíveis, induzem a custos variáveis mais elevados, reduzindo a sua disponibilidade, em razão de maior número de intervenções corretivas, elevando seus custos operacionais. Nos EUA o despacho das térmicas a gás é baseado no custo operacional variável (*Variable Operating Cost – VOC*) da planta, que é basicamente o custo de combustível, e não nos custos total de geração, que inclui o custo de capital. Assim, com o aumento dos preços do gás natural nos últimos anos o fator de capacidade das plantas caiu de 80-90%, que era o valor considerado na maioria dos estudos, para 30% em média (RUBIN *et al.*, 2007).

da tecnologia CCT¹¹¹ pode influenciar significativamente os resultados da energia consumida e dos custos envolvidos.

A Tabela 28 resume as restrições de emissões do Banco Mundial, da Resolução CONAMA e as restrições que serão adotadas na UTE Itaquí.

Tabela 28 - Resumo das restrições de emissões

Emissões	CONAMA	Banco Mundial ⁽³⁾	UTE Itaquí
Particulados ^(PM) (mg/Nm ³)	500 ⁽¹⁾	50	50
Dióxido de Enxofre (mg/Nm ³)	1.250 ⁽¹⁾	< 850	400
Óxido de Nitrogênio (mg/Nm ³)	⁽²⁾	510	200 - 510

Fonte: MPX (2011d)

Nota: (1) Resolução CONAMA Nº 8 de 6 de dezembro de 1990. (2) Definido pelo órgão ambiental de cada estado. (3) Diretrizes de saúde, segurança e meio ambiente para plantas termelétricas, grupo do Banco Mundial (31 de Julho de 2007).

4.2.5.5 Controle de NOx

Apesar de existirem métodos de remoção de NOx durante a combustão e pós-combustão, que podem ser utilizados separadamente ou em conjunto, as simulações foram realizadas apenas com a opção de remoção durante a combustão (*in-furnace control*) (item 3.1.3.1). Segundo o parecer IBAMA (2008), para atender ao padrão de emissão de NOx de 500 mg/Nm³, será utilizado o sistema de queimadores de baixo NOx.

Nas duas configurações simuladas considerou-se a tecnologia de combustores de baixo NOx (*low NOx*), com uma eficiência de remoção de NOx calculada no modelo IECM em aproximadamente 41%, para os casos 1 e 2.

4.2.5.6 Controle de Particulado

Na remoção de particulado, para atender ao padrão de emissão equivalente a 50 mg/Nm³, a UTE utilizará o sistema de filtro manga, com eficiência de aproximadamente 99,5% (IBAMA, 2008). O *software* permite a utilização de diversos tipos de filtro de particulados (*fabric filter*), que são diferenciados pela técnica empregada para a sua limpeza (item 3.1.3.2).

¹¹¹ A tecnologia de “Queima Limpa do Carvão” (Clean Coal Technology - CCT) consiste em um conjunto de tecnologias destinadas à redução de emissões.

4.2.5.7 Remoção de SO_x

O sistema de dessulfurização escolhido é denominado SDA - *Spray Dryer Absorber* (item 3.1.3.3). Com previsão de atendimento ao padrão de emissão equivalente a 400 mg/Nm³. É um sistema semi seco com eficiência de 95%, adequado para carvões com teores de enxofre menor que 1% (IBAMA, 2008).

Segundo o IBAMA (2008) a escolha do sistema SDA (*Spray Dryer Absorber*) – secador spray com cal para a redução do SO_x nos gases de exausto foi baseado na comparação com outros processos disponíveis. A escolha tomou como base as seguintes vantagens: a alta eficiência de remoção desse sistema, aproximadamente 95%; o menor investimento e o menor custo operacional; o menor consumo de energia elétrica; a maior flexibilidade para manutenção, porque permite que reparos nos atomizadores e mangas do filtro durante a operação da unidade; e a ausência de efluentes líquidos. Apesar das vantagens, este sistema apresenta como desvantagem ambiental, a geração de resíduo e a necessidade de uma área para sua estocagem e disposição final, considerando a falta de uso comercial para o resíduo a ser gerado (IBAMA, 2008).

A eficiência máxima para SDA calculada no IECM é de 90% para remoção de SO₃ e de 7,24 % para remoção de SO₂.

4.2.5.8 Sistema de arrefecimento

A água para a reposição das perdas (*make-up water*) por evaporação no circuito de resfriamento e nos demais sistemas de água da UTE será retirada da Baía de São Marcos via adutora de 5 km de comprimento e espessura de 0,60 m e o lançamento de efluentes (purga da caldeira, torre de resfriamento e água do dessalinizador) será realizado por um emissário de mesma extensão, também na Baía de São Marcos, com temperatura máxima estimada em 35°C.¹¹²

O sistema de arrefecimento utilizado para as simulações será do tipo fechado com torre úmida (item 3.1.2). No entanto, os resultados simulados no IECM foram diferentes dos valores apresentados pelo parecer técnico do IBAMA (2008). O consumo de água para *make up* com consumo estimado no IECM em 1.116 t/h e 1.327 t/h, para o

¹¹² Segundo IBAMA (2008) está prevista a utilização de um sistema de dessalinização com capacidade de 110 m³/h para pré-tratamento da água do sistema potável e de desmineralização de água a ser utilizada na caldeira. Os efluentes gerados na UTE durante a operação serão compostos por efluentes líquidos industriais e efluentes domésticos. Para os efluentes sanitários estão previstas fossas sépticas-sumidouro e Estação de Tratamento para os diversos efluentes.

caso 1 e caso 2, respectivamente. A Tabela 29 resume os valores estimados na simulação da planta.

Tabela 29 – Volumes estimados de consumo e descarte de água

Água	Unidade	Caso 1	Caso 2
<i>Make up</i>	t/h	1.116,00	1.327,00
Consumo na UTE	t/h	829,16	1.022,50
Evaporação da torre	t/h	829,16	986,10
Evaporação planta CCS	t/h	0,00	36,40
<i>Waste water</i>	t/h	267,80	318,50

Fonte: Simulação no IECM

A diferença entre o volume apresentado para água de *make up* e o volume de consumo na UTE é o volume de água para atender a atividades que não estão ligadas diretamente a produção de energia.

4.2.5.9 Disposição de resíduos

As opções para a disposição da água utilizada na planta são: lagoa de tratamento (*ash pond*), tratamento químico (*chemical treatment*), tratamento mecânico (*mechanical treatment*). A simulação considerou lagoas de tratamento (*ash pond*) para a disposição de resíduos.

4.2.5.10 Disposição das cinzas

Segundo o IBAMA (2008), as cinzas volantes ou leves, serão dispostas temporariamente em um silo e posteriormente serão transportadas para bacias de estocagem.¹¹³ As cinzas de fundo (ou pesadas) serão moídas, umedecidas para o transporte até um silo e posteriormente transportadas para as bacias de estocagem ou poderão ser vendidas como subproduto, por exemplo, como componente na fabricação de blocos de concreto na construção civil.¹¹⁴

A simulação no IECM estimou a saída de 10,9 t/h de cinzas volantes (*fly ash*) e 4,03 t/h de cinzas de fundo ou pesadas (*bottom ash*), para o caso 1. Para o caso 2 os valores simulados foram de 13,2 t/h de cinzas volantes e 4,9 t/h de cinzas de fundo.

¹¹³ As bacias de armazenamento ou estocagem são terrenos impermeabilizados, com dimensão de 40 x 150 metros e profundidade de 2 a 5 metros. O tempo de operação é de 2 anos, podendo chegar a 4 anos dependendo da operação da UTE. O local para a disposição das cinzas será construído de acordo com as normas de disposição para Classe I e deverão ser instalados poços de monitoramento no entorno da bacia de estocagem (IBAMA, 2008).

¹¹⁴ A UTE deve considerar também como premissa a impossibilidade de comercialização do subproduto da unidade de dessulfurização. Assim, a construção de mais bacias para receber as cinzas deve ser projetada para poder receber as cinzas para toda a vida útil da UTE (IBAMA, 2008).

4.2.6 Captura de CO₂

A configuração da planta de captura de CO₂ no modelo IECM envolve parâmetros como: o tipo de solvente que será utilizado; o uso ou não de outra fonte de energia para fornecer calor ao processo de captura (por exemplo, um *boiler* a gás natural); a necessidade de um *by-pass* para controlar o volume de gases de escape que será tratado; e a eficiência de remoção de CO₂ desejada.

A última versão do modelo IECM¹¹⁵ permite a simulação da planta com três tecnologias de captura. A primeira utiliza como solvente a amina convencional o *ABB Lummus Crest MEA Proces*, a segunda utiliza a amina avançada o *Econamine FG PlusSM Process* (EFG) e a terceira utiliza a amônia (item 3.2.2).

Neste estudo utilizou-se na simulação apenas o caso com o solvente MEA convencional com uma concentração de 30% wt na solução aquosa, perda nominal de solvente de 3,0 kg/t de CO₂ e uma carga de 0,19 mol CO₂/mol solvente (*lean CO₂ loading*).

O modelo utiliza uma unidade DCC e de uma unidade extra de dessulfurização (SO₂ *polisher*) para que o gás que entra na planta de captura tenha um percentual de SO₂ de 10 ppmv e uma temperatura adequada ao processo. O valor calculado pelo modelo é de 45°C.

A planta foi simulada com percentual de captura de CO₂ igual a 90%. Neste caso, o modelo considera o processamento de toda a corrente de gás da planta de energia, para o solvente simulado. O modelo IECM permite dois tipos configuração para que se obtenha o percentual final de captura da planta. O primeiro método permite modificar os parâmetros relativos à planta de absorção. Neste caso, seriam ajustadas as capacidades e a eficiência das unidades. Esse método não foi escolhido porque implicaria em uma alteração na eficiência das colunas de absorção. Consequentemente, esta variação na eficiência resultará em equipamentos, como absorvedores e regeneradores, com diferentes dimensões e custos. O outro método envolve a utilização de um *by-pass*, que permite ajustar o percentual de captura de CO₂ da planta. Este *by-pass* possibilita que uma parte do gás de exausto da planta de energia não passe pela planta de captura.

¹¹⁵ A versão 7.0.0.0 do modelo IECM foi disponibilizada no dia 3 de novembro de 2011, mas no momento das simulações deste estudo ainda era apresentada como uma versão beta.

A Tabela 30 resume os dados utilizados na simulação do estágio de captura que está presente somente no caso 2.

Tabela 30 - Dados do Absorvedor

Absorvedor	Unidade	Tipo/Valor
Tipos de solvente	-----	MEA
Concentração do solvente	% (base mássica)	30,00
Lean CO ₂ Loading	mol CO ₂ / mol ácido	0,20
Perda nominal de solvente	kg/t CO ₂ capturado	3,00
Boiler auxiliar	-----	Não
Compressor de CO ₂	-----	Sim
Controle por <i>bypass</i> do gás de exausto	-----	Sim
SO₂ Polisher/Direct Contact Cooler		
<i>Direct Contact Cooler</i> (DCC)	-----	Sim
SO ₂ Polisher Used	-----	Sim
Concentração de SO ₂ - <i>polisher</i>	ppmv	10
Temperatura de saída do DCC	°C	45
Eficiência de remoção do CO ₂	%	90
Eficiência total de remoção de CO ₂	%	90

4.2.7 Produção do solvente

As emissões relacionadas à produção do solvente (MEA) foram contabilizadas no estudo. A simulação no modelo IECM estima um consumo de aproximadamente 2,96 t/h de solvente. O fluxo de referência para esta etapa é igual a 1 kg de solvente MEA. A Tabela 31 resume a capacidade de produção dos principais produtos da planta Oxiteno, que é um dos potenciais fornecedores do solvente MEA, caso este seja produzido no Brasil.

Tabela 31 – Capacidade de produção dos principais produtos da planta Oxiteno (BA)

Unidades	Capacidade de produção (t/a)
Óxido de etileno	260.000
Etilenoglicóis	285.000
Etalonaminas	110.000
Éteres Glicólicos	25.000
Etoxilados	270.000
<i>White Mineral oils</i>	60.000
<i>Fatty alcohols</i>	77.000
<i>Fatty acids</i>	7.000
Glicerina	11.00

Fonte: ULTRAPAR (2011)

A Oxiteno exporta diversos produtos químicos, entre eles etanolaminas. A Oxiteno concorre no mercado brasileiro em grande parte com produtos importados. Desde o ano de 1990, a empresa opera em um ambiente cada vez mais competitivo, devido às importações provenientes de indústrias petroquímicas internacionais e transnacionais. Os produtos importados são em sua maioria *commodities* químicas e a

concorrência é baseada principalmente no preço. Os produtos importados têm custos adicionais no mercado brasileiro, devido às tarifas de importação que geralmente variam entre 12% e 14%, além das despesas adicionais com o frete. No entanto, fatores como a qualidade do produto e prazo de entrega, confiabilidade de fornecimento e de serviços técnicos e de apoio também são importantes fatores competitivos. A Oxiteno acredita ter uma vantagem competitiva sobre as importações em relação à pontualidade de entrega e confiabilidade do fornecimento, por ser um produtor local (ULTRAPAR, 2011).¹¹⁶

Apesar da possível vantagem competitiva apresentada pela Oxiteno, o fornecimento do solvente utilizado na planta de captura estará sujeito a condições especiais estabelecidas no contrato com o licenciador da planta. Como o solvente geralmente utiliza aditivos específicos protegidos por patentes, a decisão sobre o fornecedor não será baseada apenas por fatores como, por exemplo, preço ou sua localização.

Nesta tese, considerou-se que o solvente será produzido na planta da Oxiteno. Com os dados do consumo de energia não estão disponíveis, foram utilizados os dados das emissões resultante da produção da MEA obtidos na base de dados Ecoinvent.¹¹⁷ A Tabela 32 resume as emissões resultantes da produção de 1,0 kg de MEA, que foram utilizados no modelo CMLCA.

¹¹⁶ No caso de especialidades químicas, o preço é um fator menos decisivo do que nas *commodities* químicas. Para as especialidades os fatores mais importante são a conformidade com as especificações, o desempenho do produto e a confiabilidade do serviço. Acesso à tecnologia, assistência técnica e pesquisa e desenvolvimento são fatores importantes em relação à conformidade com as especificações e desempenho do produto, especialmente no desenvolvimento de novos produtos para atender as necessidades dos clientes (ULTRAPAR, 2011).

¹¹⁷ Essa decisão pode resultar em diversos tipos de erros. Por exemplo, podemos citar o erro gerado ao considerar a produção do solvente ocorrendo em um país onde a produção de energia elétrica é baseada em termoeletricas a carvão. A decisão de manter os dados da Ecoinvent tomou como base o fato de que se os dados fossem atualizados para o caso brasileiro, que possui a maior parte de sua produção elétrica baseada na hidroeleticidade, as emissões tenderiam a ser menores. Logo, a análise aqui foi conservadora. Além disso, a análise de perturbação (item 5.2 mais adiante) resultou num multiplicador igual a 0,0336. Este multiplicador, que relaciona a produção do solvente aos efeitos na categoria de emissões, é relativamente baixo, indicando que os erros porventura associados a simplificações nesta etapa do inventário não são críticos.

Tabela 32 - Emissões resultantes da produção de 1 kg de MEA

Emissão	Unidade	kg/kg MEA
CO ₂	kg	3,13
CO	kg	0,00202
Etileno	kg	0,00017
Óxido de etileno	kg	0,00164
Amônia	kg	0,02300
Metano	kg	0,00671
NMVOG	kg	0,00202
NOx	kg	0,00732
Material particulado MP2.5	kg	0,00727
Material particulado MP10	kg	0,00046
Material particulado MP > PM10	kg	0,00079
SO ₂	kg	0,00866

Fonte: ALTHAUS *et al.* (2007) apud PEHNT; HENKEL (2009)

4.2.8 Transporte do solvente

A simulação no IECM com captura de 90% mostrou perda de aproximadamente 3,0 kg de MEA/tCO₂ capturado.¹¹⁸ O fluxo de referência para esta etapa é igual a 1 kg de solvente transportado.

Na estimativa das emissões relativas à etapa de transporte do solvente, utilizou-se a hipótese de que todo o solvente será produzido na planta da empresa Oxiten, localizada no estado da Bahia e transportado por modal rodoviário até a UTE.¹¹⁹

As duas rotas terrestres entre a planta da Oxiten e a UTE Itaquí têm distâncias de 1.553 km e 1.704 km. A primeira rota utiliza as rodovias BR-316 e BR-407 e a segunda apenas a rodovia BR-316.¹²⁰

O consumo de MEA foi estimado na simulação no IECM em 1.157 kg/h. Considerando 5.260 horas de operação por ano, o consumo de solvente seria aproximadamente 6.086 toneladas por ano.¹²¹ Assim, no período de um ano seriam necessárias 203 viagens da planta da Oxiten na Bahia para a UTE. A hipótese contabilizou as viagens de ida e as viagens de volta do caminhão (sem carga) para o percurso com a menor distância. A Tabela 33 e a Tabela 34 resumem os dados para o cálculo do consumo de combustível e os fatores de emissões para o transporte do solvente.

¹¹⁸ O estudo VELTMAN *et al.* (2010) menciona valores entre 1,6 a 3,1 kg de solvente/t CO₂ capturado.

¹¹⁹ Apesar de a empresa Oxiten possuir um representante autorizado em Recife - Nordesquim - Rua Sílvia Delmar Hollenbach, 694 - Imbiribeira - Recife - PE - a sua capacidade de produção está localizada na sua planta na Bahia - Rua Benzeno, 1065- Complexo Básico - Camaçari - BA.

¹²⁰ Trajetos e distâncias obtidos no GoogleMaps (GOOGLEMAPS, 2011).

¹²¹ Para o cálculo de transporte rodoviário considerou-se a mesma hipótese do transporte de calcário. Serão utilizados caminhões com capacidade de carga útil de 30 toneladas.

Tabela 33 - Dados utilizados para o cálculo do consumo no transporte rodoviário

Descrição	Unidade	Caso 1	Caso 2
Distância média considerada no estudo	km	1.553	1.553
Consumo de MEA por ano	t/a	0	6.086
Viagens por ano (ida e volta)	unidade	0	203
Consumo total de combustível (diesel)	litros/ano	0	220.530
Consumo de diesel	kg/kg de solv. transp	0	0,03116353

Tabela 34 - Fatores de emissões para transporte rodoviário de solvente

Fator de emissão	kg CO ₂ /kg de solvente	kg CH ₄ /kg de solvente	kg N ₂ O/kg de solvente
<i>Default</i>	0,0986256466	0,0000051908	0,0000051908
<i>Lower</i>	0,0966291760	0,0000021296	0,0000017303
<i>Upper</i>	0,0995573328	0,0000126443	0,0000159718

Fonte: Adaptado de IPCC (2006a)

Nota: Os valores apresentados na tabela foram convertidos de kg/TJ, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de solvente.

4.2.9 Transporte do solvente degradado

O solvente degradado, correspondente à parcela que não pode ser recuperada no *reclaimer*, e, portanto, precisa ser descartada. Neste estudo considerou-se o descarte no mesmo local do descarte das cinzas da UTE. A simulação no IECM estimou uma massa de rejeito no *reclaimer* de aproximadamente 2,6 t/h ou 13.560 t/a. O fluxo de referência para esta etapa é igual a 1 kg de solvente degradado transportado.

O transporte será realizado por modal rodoviário desde a UTE Itaqui até o aterro das cinzas. A distância foi estimada em 20 km.¹²²

Assim, seriam necessárias 452 viagens de ida e volta por ano. O consumo de diesel foi estimado em 0,00040133 kg/kg de soda cáustica transportada. A Tabela 35 e a Tabela 36 resumem os dados para o cálculo do consumo de combustível e os fatores de emissões para o transporte do solvente.

Tabela 35 - Dados utilizados para o cálculo do consumo no transporte rodoviário

Descrição	Unidade	Caso 1	Caso 2
Distância média considerada no estudo	km	20	20
Quantidade de solvente degradado	t/a	0	13.560
Viagens por ano (ida e volta)	unidade	0	452
Consumo total de combustível (diesel)	litros/ano	0	6.328
Consumo de diesel	kg/kg de cal transportada	0	0,00040133

¹²² Até o momento deste estudo não foi possível obter a localização da área de disposição dos resíduos da UTE. Inicialmente os rejeitos da UTE serão armazenados dentro do terreno da UTE, mas futuramente eles serão colocados em um aterro fora do terreno. Neste caso, assumiu-se uma distância de 20 km da planta. Essa distância considera que a futura área de disposição fica no perímetro urbano.

Tabela 36 - Fatores de emissões para transporte rodoviário de solvente degradado

Fator de emissão	kg CO ₂ /kg de cal	kg CH ₄ /kg de cal	kg N ₂ O/kg de cal
<i>Default</i>	0,0012701307	0,0000000668	0,0000000668
<i>Lower</i>	0,0012444195	0,0000000274	0,0000000223
<i>Upper</i>	0,0012821292	0,0000001628	0,0000002057

Fonte: Adaptado de IPCC (2006a)

Nota: Os valores apresentados na tabela foram convertidos de kg/TJ, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de solvente degradado.

4.2.10 Produção da soda cáustica (NaOH)

A soda cáustica (NaOH) é adicionada ao *reclaimer* para reagir com os HSS e recuperar parte do solvente MEA degradado. Nesta reação, cada mol de NaOH regenera um mol de MEA. No fundo do *reclaimer* fica depositado um sal orgânico de sódio (VELTMAN *et al.*, 2010), assim como também ficam retidas pequenas quantidades de solventes, inibidores de corrosão e outros aditivos (SCHREIBER *et al.*, 2009)

Considerou-se que a produção de NaOH será realizada na unidade da Braskem de produção de cloro e soda cáustica localizada em Alagoas.

A salmoura, solução saturada de NaCl, que fornece o sal necessário para a realização do processo eletrolítico¹²³ é obtida por extração em minas subterrâneas localizadas a aproximadamente 8 km da planta (BASTOS, 2011).¹²⁴

Os principais produtos da unidade da Braskem são a soda cáustica, cloro e o dicloroetano (DCE), com produção atual anual de 460.000 toneladas, 400.000 toneladas e 520.000 toneladas, respectivamente (BASTOS, 2011).

A unidade produz também o ácido clorídrico e o hipoclorito de sódio. As principais matérias-primas e insumos são: eteno, que é fornecido pela Unidade de Insumos Básicos da Braskem em Camaçari (BA) pelo “etenoduto”; a energia elétrica, fornecida pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF; e gás natural, fornecido pela empresa de Gás de Alagoas - ALGAS (BASTOS, 2011).

A demanda térmica da planta é atendida pelo hidrogênio produzido no processo e complementada por gás natural.¹²⁵ A capacidade instalada de geração de

¹²³ A salmoura concentrada, purificada, ácida e aquecida é enviada para o compartimento do anodo das células eletrolíticas, e eletrolisada pela passagem de corrente elétrica contínua. Atualmente, três processos de eletrólise são utilizados industrialmente: o de mercúrio, o de diafragma e o de membrana. A tecnologia utilizada na planta é a de diafragma, que utiliza um catodo perfurado de aço ou ferro e um anodo de titânio recoberto de platina ou óxido de platina. Este diafragma separa o anodo e o catodo para evitar que os gases formados se recombinem. Para uma análise detalhada da planta soda cloro da Braskem consultar BASTOS (2011).

¹²⁴ A água e a salmoura necessárias para o processo são supridas pela operação de mineração (BASTOS, 2011). No entanto, neste estudo não foi contabilizada a etapa de mineração para a produção de soda cáustica.

vapor é de 160 t/h, o que equivale a 120 MW. A potência elétrica demandada é de 170 MW (BASTOS, 2011).

Ainda segundo BASTOS (2011), em plantas cloro-soda do tipo utilizado pela Braskem, o processo de eletrólise da salmoura produz hidrogênio na proporção de aproximadamente 0,03 kg para cada 1 kg de cloro produzido.

O consumo específico de energia é significativo e varia de acordo com a tecnologia utilizada. Este consumo é estimado entre 2,8 e 3,6 MWh/tonelada de cloro produzido na planta (O'BRIEN, 2005 apud BASTOS, 2011). Para o ano de 2010 o consumo médio das plantas nacionais do setor cloro-soda foi de 3,17 MWh/tonelada de cloro. O hidrogênio produzido no processo para geração de energia tem sido aproveitado pela indústria com um fator de utilização superior a 80%. Nos últimos nove anos o menor valor observado foi de 85,5% (ABICLOR, 2009 apud BASTOS, 2011).

Para a simulação desse processo serão adotadas algumas simplificações. Trata-se de um processo multifuncional, que produz cinco produtos, sendo que três são os principais e representam a maior parte de produção. Neste caso, considerou-se que a alocação do processo será realizada seguindo uma partição física (massa) para esses três produtos com as seguintes proporções: soda cáustica (33%), cloro (29%) e o dicloroetano (38%).

Não foram contabilizadas as emissões ou consumo de energia para a produção e transporte de eteno, que é um dos insumos da planta. A entrada de energia para o processo é fornecida na forma de gás natural e energia elétrica. O hidrogênio também é utilizado para a produção de energia térmica, mas este é produzido e consumido pelo próprio processo. Assim, visando simplificar a análise, serão consideradas a entrada de um volume anual aproximado de 59.000 toneladas de gás natural e de aproximadamente 1.268.000 MWh de eletricidade da rede por ano. A Tabela 37 e a Tabela 38 resumem os dados do processo de produção de NaOH e os fatores de emissões para o consumo de gás natural na produção de NaOH.

¹²⁵ O hidrogênio e o gás natural são utilizados em caldeiras com eficiência de 80% para a produção de vapor, que é utilizado principalmente para a concentração da solução de soda cáustica e em menor parte para é enviada para a planta de dicloroetano.

Tabela 37 - Dados do processo de produção de NaOH utilizados no modelo CMLCA

Dados	Unidade	Valor	Referências
Produção de Hidrogênio	kg/kg cloro	0,03	Bastos (2011)
Consumo anual de energia elétrica da planta	MWh	1.354.560	
Consumo de energia elétrica	kWh / kg NaOH	2,94470	
Potência - calor (H ₂ + GN)	MW	120	Bastos (2011)
Dias de operação da planta	dias/ano	332	
Consumo anual total de calor da planta	MWh	956.160	
Eficiência da caldeira		0,85	Bastos (2011)
Poder calorífico inferior GN seco	kcal/m ³	8.800	BEN (2011)
Densidade GN seco	kg/m ³	0,74	BEN (2011)
Poder calorífico inferior GN seco	kcal/kg	11.892	
Poder calorífico inferior H ₂	kcal/kg	28.555	
Fator de utilização do H ₂		0,950	ABICLOR (2009)
ENTRADA			
Consumo de Energia Elétrica	MWh/t cloro	3,17	O'BRIEN (2005)
Consumo de Energia Elétrica	MWh	1.268.000	
Hidrogênio produzido no processo	kg/ano	12.000.000	
Hidrogênio utilizado para geração de calor	kg/ano	11.400.000	
Energia fornecida pelo H ₂	MWh	378.520	
Energia fornecida pelo GN	MWh	577.640	
Gás natural	kg/ano	41.773.891	
Gás natural	kg GN/kg NaOH	0,0908	
Gás natural	m ³ GN/kg NaOH	0,1227	
SAÍDA			
NaOH	kg/ano	460.000.000 (33%)	
Cloro	kg/ano	400.000.000 (29%)	
DCE	kg/ano	520.000.000 (38%)	

Tabela 38 - Fatores de emissões para o consumo de gás natural na produção de NaOH

Fator de emissão	kg CO ₂ /kg NaOH	kg CH ₄ /kg NaOH	kg N ₂ O/kg NaOH
<i>Default</i>	0,2694667460	0,0000048033	0,0000004803
<i>Lower</i>	0,2608207542	0,0000014410	0,0000001441
<i>Upper</i>	0,2800340694	0,0000144100	0,0000014410

Fonte: Adaptado de IPCC (2006c)

Nota: Os valores apresentados na tabela foram convertidos de kg/TJ, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de NaOH

4.2.11 Transporte da Soda Cáustica (NaOH)

A soda cáustica será fornecida pela planta da empresa Braskem localizada na área urbana de Maceió, no Pontal da Barra (item 4.2.10). Neste caso, o transporte será realizado por modal rodoviário desde o Pontal da Barra, em Maceió, até a UTE Itaqui. O fluxo de referência para esta etapa é igual a 1 kg de soda cáustica transportada (“soda cáustica para UTE”).

As três opções rodoviárias, mostradas na Tabela 39 têm distâncias aproximadas de 1540 km, 1670 km e 1715 km.¹²⁶

Tabela 39 - Distâncias até a localidade da UTE – Itaqui via rodovias

Distância (km)	Rota
1540	BR 316
1670	BR 226
1715	BR 235 – BR 316

Fonte: GOOGLMAPS (2011)

O consumo de soda cáustica foi estimado no IECM em aproximadamente 1,41 t/h ou 7.417 t/a.

Assim, no período de um ano seriam necessárias 247 viagens da planta da Oxiteno na Bahia para a UTE. A hipótese considerou as viagens de ida e as viagens de volta da carreta (sem carga) para o percurso com a menor distância. Não foi considerado consumo de água para esta etapa. O consumo de diesel foi estimado em 0,03090267 kg/kg de soda cáustica transportada. A Tabela 40 e a Tabela 41 resumem os dados para o cálculo do consumo no transporte e os fatores de emissões para transporte rodoviário de NaOH, respectivamente.

Tabela 40 - Dados utilizados para o cálculo do consumo no transporte rodoviário

Descrição	Unidade	Caso 1	Caso 2
Distância média considerada no estudo	km	1.540	1.540
Consumo de NaOH	t/a	0	7.417
Viagens por ano (ida e volta)	unidade	0	247
Consumo total de combustível (diesel)	litros/ano	0	266.503
Consumo de diesel	kg/kg de NaOH transp.	0	0,03090267

Tabela 41 - Fatores de emissões para transporte rodoviário de NaOH

Fator de emissão	kg CO ₂ /kg de NaOH	kg CH ₄ /kg de NaOH	kg N ₂ O/kg de NaOH
<i>Default</i>	0,0978000616	0,0000051474	0,0000051474
<i>Lower</i>	0,0958203033	0,0000021117	0,0000017158
<i>Upper</i>	0,0987239488	0,0000125385	0,0000158381

Fonte: Adaptado de IPCC (2006a)

Nota: Os valores apresentados na tabela foram convertidos de kg/TJ, que é a unidade apresentada pelo IPCC, para kg de GEE/kg de NaOH transportada.

4.2.12 Armazenamento de CO₂

O estágio de armazenamento de CO₂ inclui as operações de compressão, transporte por dutos e injeção do CO₂ em reservatório geológico apropriado.

¹²⁶ Na simulação foi utilizada a menor distância e caminhões com capacidade de carga útil de 30 toneladas. Trajetos e distâncias obtidos no GoogleMaps (GOOGLMAPS, 2011).

O CO₂ separado é comprimido a uma pressão de aproximadamente 14 MPa para ser transportado por duto até o local do armazenamento.¹²⁷ Nas simulações foi considerado um duto de 200 km de comprimento. Essa distância foi utilizada considerando-se que futuramente o CO₂ capturado poderia ser armazenado na Bacia Sedimentar do Parnaíba¹²⁸ ou na Bacia Sedimentar Pará-Maranhão¹²⁹ (*offshore*), onde a OGX possui blocos exploratórios de gás natural, que poderiam teoricamente armazenar este CO₂. Esta hipótese foi considerada com base nas futuras operações previstas pela empresa OGX, que faz parte do mesmo grupo EBX, ao qual pertence à MPX.¹³⁰

A eficiência¹³¹ utilizada para os compressores foi de 80% (RUBIN *et al.*, 2007) e o consumo de energia elétrica dos compressores, calculado no modelo IECM, foi de 107 kWh/tCO₂.

Vale lembrar que neste estudo não foram contabilizadas as emissões relativas à construção e instalação do duto para o transporte de CO₂ e que as simulações realizadas no IECM já consideram o consumo de energia e as emissões relativas às etapas de captura, compressão e transporte de CO₂. Assim, os sistemas serão tratados como um único bloco de processo no software CMLCA.¹³²

No caso 2, o CO₂ capturado passa a ser considerado um produto e não mais uma emissão como as outras correntes de CO₂ presentes nos outros estágios e pela própria UTE. Assim, a UTE com captura terá dois produtos finais: a eletricidade e o CO₂ capturado.

Sempre que um processo produz mais de um produto com valor comercial, portanto, sempre que estamos tratando de um processo multifuncional é necessária a

¹²⁷ No estudo de VIEBAHN (2007) assumiu-se que o CO₂ capturado é comprimido a 11 MPa (110 bar) e transportado por 300 km via gasodutos para o norte da Alemanha, onde estão localizados diversos campos de gás natural deplecionados, que poderiam teoricamente armazenar este CO₂.

¹²⁸ A Bacia do Parnaíba abrange uma área de aproximadamente 680.000 km², que está distribuída pelos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e pequena parte nos estados do Pará, Ceará e Bahia. A empresa OGX detém direitos sobre sete blocos exploratórios na Bacia do Parnaíba, que totalizam uma área superior a 20.000 km², adquirida junto à Petra Energia S.A., que continua com 30% de participação (OGX, 2011a).

¹²⁹ A Bacia do Pará-Maranhão possui uma total de aproximadamente 100.000 km², sendo que a OGX detém direitos de concessão sobre cinco blocos exploratórios, equivalentes a 960 km² da área total. A perfuração em áreas próximas a blocos da OGX indicaram a presença de petróleo leve na região. Acredita-se que esta região tenha um grande potencial de produção, por causa das características geológicas similares às da plataforma continental de Gana (Oeste da África), onde houve importantes descobertas de petróleo leve nos últimos anos (OGX, 2011b).

¹³⁰ Não foi considerado o EGR (*Enhanced Gas Recovery*), ou seja, a recuperação avançada de gás, apenas a possibilidade de utilização da Bacia Sedimentar para o armazenamento do CO₂.

¹³¹ Eficiência de 85 % (RAVAGNANI *et al.*, 2009).

¹³² Trata-se de uma simplificação, onde diversos processos são considerados como um único processo (caixa preta).

utilização da alocação. Apesar de o CO₂ capturado poder ter um valor comercial, uma vez que podem existir limites e taxas sobre as suas emissões, não foi considerado um valor comercial para o CO₂ capturado no caso estudado. Esta premissa será importante na fase de interpretação do estudo.¹³³

Vale ressaltar que este estudo não considera possíveis vazamentos de CO₂ ao longo do tempo. Esse tópico merece atenção porque resulta em uma grande incerteza sobre a eficácia da tecnologia CCS. Para ser eficaz e propiciar uma real redução de CO₂, esta tecnologia passa ainda a depender, em grande parte, do comportamento da etapa de estocagem de CO₂, que ainda envolve muitas incertezas, especialmente no que diz respeito ao risco de vazamento para a atmosfera, tornando necessária a vigilância constante do depósito de CO₂ (SPRENG *et al.*, 2007).¹³⁴

¹³³ Por exemplo, em SCHREIBER *et al.* (2009) utilizou-se a mesma premissa.

¹³⁴ Para uma estocagem que apresente um nível de segurança aceitável, o vazamento repentino de CO₂ deve ser muito improvável e o vazamento gradual muito lento (SPRENG *et al.*, 2007). O vazamento gradual pode causar problemas relacionados às mudanças climáticas e vazamentos repentinos podem causar problemas localizados.

5 Interpretação dos resultados

Conforme o item 2.1.4, a etapa de avaliação do impacto do ciclo de vida pode ser dividida em quatro etapas, sendo que nem todas são obrigatórias. Nesta tese foram realizadas a etapa de seleção das categorias de impactos e a etapa de caracterização.

A seleção de categorias de impactos e a classificação são obrigatórias. Nesta etapa os impactos ambientais relevantes para o estudo são definidos. Os fluxos elementares do inventário do ciclo de vida (por exemplo, consumo de recursos, emissões para a atmosfera, etc.) são atribuídos às categorias de impacto de acordo com a capacidade destes em contribuir para diferentes problemas ambientais.

A seleção da(s) categoria(s) de impacto deve ser baseada nas questões ambientais relevantes e relacionadas ao sistema analisado.¹³⁵ Como já foi explicitado na etapa de objetivo e escopo, o objetivo deste trabalho é estimar a contribuição efetiva da aplicação da tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) em uma UTE a carvão para a redução da emissão de GEE. O estudo parte da hipótese que a contabilização das emissões indiretas relacionadas à tecnologia resultará em uma redução do percentual do CO₂ equivalente evitado, em termos de redução de emissões de CO₂, que é atribuído à planta de captura pós-combustão. Por esta razão optou-se por considerar no estudo de ACV apenas o impacto relativo às mudanças climáticas.

Os fluxos são classificados em temas ambientais para os quais contribuem. A categoria considerada está situada no nível médio, isto é, modela um impacto usando um indicador localizado em algum lugar durante o mecanismo, mas antes da etapa final.

Na caracterização, o impacto de cada emissão ou consumo de recursos é modelado quantitativamente, de acordo com o mecanismo ambiental. O resultado é expresso como uma pontuação de impacto em uma unidade comum a todas as contribuições dentro da categoria de impacto. Para isso, aplicam-se os fatores de caracterização (ILCD, 2010b).

A Tabela 42 resume os fatores de caracterização da categoria “Aquecimento global” da metodologia CML-IA.¹³⁶

¹³⁵ Segundo o manual ILCD (2010a), a exclusão inicial de impactos relevantes devem ser claramente documentados e considerado na interpretação dos resultados, potencialmente limitando as conclusões e recomendações do estudo.

¹³⁶ O CML-IA é um banco de dados que contém os Fatores de Caracterização para a etapa de avaliação de impacto de ciclo de vida (CML, 2011).

Tabela 42 – Fatores de caracterização para a categoria (C6) Aquecimento Global (GWP₁₀₀)

Nome	Unidade	Valor
Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg CO ₂ eq. / kg	1
Óxido Nitroso (N ₂ O)	kg CO ₂ eq. / kg	298
Metano (CH ₄)	kg CO ₂ eq. / kg	25

Nota: A categoria Aquecimento Global (GWP₁₀₀), da metodologia CML-IA é baseada na metodologia GWP₁₀₀ do IPCC (IPCC, 2007).

Como mostrado anteriormente, a UTE do estudo de caso possui uma potência instalada, ou potência bruta, de 360 MW. No entanto, nem toda a energia produzida pela UTE estará disponível para a rede elétrica (*grid*). Parte dessa energia é utilizada nos próprios processos da UTE. As simulações realizadas no IECM estimaram uma potência líquida, ou seja, a parcela de energia disponível da energia que será enviada ao *grid*, de 331 MW para o caso 1. No caso 2, considerando-se a penalidade energética imposta a UTE pela planta de captura, a energia líquida foi estimada em 274 MW.

A redução da energia líquida leva à discussão sobre como a energia que é redirecionada para a planta de captura será restituída no *grid*. Por exemplo, os valores obtidos na simulação deste estudo mostram que houve uma redução de aproximadamente 17% na energia líquida. Não faz parte do escopo desse estudo analisar os custos envolvidos ou outras opções tecnológicas para a geração de energia elétrica, mas vale lembrar que uma capacidade de geração adicional incorre em custos que devem ser considerados nos custos relativos à aplicação da tecnologia CCS.

A comparação realizada neste estudo considerou a hipótese de que essa energia seria fornecida pela mesma planta. Neste caso, visando facilitar a análise, considerou-se um terceiro caso, chamado de caso 2b, no qual a planta teria uma potência bruta de 435 MW para manter a potência líquida de 331MW, mantendo assim a energia líquida fornecida ao *grid*. É importante ressaltar que na prática, quando a UTE receber a planta de captura não haverá um aumento da sua potência bruta, apenas a sua energia líquida será reduzida. Para o caso estudado, a energia líquida será reduzida de 1.741.000 MWh/a, no caso 1, para 1.440.700 MWh/a, no caso 2.

A Tabela 43 resume os valores obtidos para a etapa de categorização em relação à categoria (C6) Aquecimento Global (GWP₁₀₀) para uma UTE com 360 MW sem captura (caso 1), UTE com 360 MW com captura (caso 2) e o caso com a UTE com potência equivalente a 435 MW de potência bruta (caso 2b), no período de um ano.

Tabela 43 – Caracterização em relação à categoria (C6) - Aquecimento Global (GWP100)

Caso	Potência Bruta	Unidade	Valor
1	360 MW	t CO ₂ eq./a	2.190.000
2	360 MW	t CO ₂ eq./a	510.000
2b	435 MW	t CO ₂ eq./a	616.000

Notas: ⁽¹⁾ Não foram consideradas perdas no transporte, por isso os valores dos produtos “carvão para transp. marítimo” e “carvão para transp ferroviário” são iguais. ⁽²⁾ Eletricidade consumida do *grid*.

Tabela 45A Tabela 43 e a Tabela 44 resumem os resultados do inventário para os produtos e fluxos elementares, respectivamente.

Como era esperado não houve alteração da massa dos produtos entre os casos 1 e 2, que representam a UTE com a mesma potência bruta de 360 MW (Tabela 44). A única variação ocorreu para a energia consumida na forma de eletricidade proveniente da rede (“eletricidade da rede”), devido ao maior consumo de energia para o fornecimento de produtos que não estavam presentes no caso 1 (“solvente MEA”, “soda cáustica (NaOH)”, “solvente MEA para UTE”, “soda cáustica (NaOH) para UTE”).

Quando são comparados os casos 1 e caso 2b é possível observar um aumento de aproximadamente 20% das massas dos produtos. Ou seja, caso a UTE com captura passasse a fornecer a mesma energia líquida da UTE sem captura (caso 1) o consumo dos produtos aumentaria em aproximadamente 20%. O mesmo aumento pode ser observado para os fluxos elementares, carvão, calcário, cinzas pesadas, cinzas leves e água (Tabela 45).

Tabela 44 - Resultado do Inventário – Produtos

Produtos	Unidade	Caso 1	Caso 2	Caso 2b
Carvão para transp marítimo ⁽¹⁾	t/a	801.000	801.000	968.000
Eletricidade UTE	kWh/a	1.740.000	1.440.000	1.740.000
Carvão para transp ferroviário ⁽¹⁾	t/a	801.000	801.000	968.000
Cal para UTE	t/a	5.320	5.320	6.430
Calcário para calcinação	t/a	23.700	23.700	28.600
Carvão para UTE	t/a	801.000	801.000	968.000
Cal para transporte	t/a	5.320	5.320	6.430
Solvente MEA	t/a	-----	5.040	6.090
Soda cáustica (NaOH)	t/a	-----	6.140	7.420
Solvente MEA para UTE	t/a	-----	5.040	6.090
Soda cáustica (NaOH) para UTE	t/a	-----	6.140	7.420
Eletricidade do <i>grid</i> ⁽²⁾	kWh/a	21.300	27.300	33.000

Notas: ⁽¹⁾ Não foram consideradas perdas no transporte, por isso os valores dos produtos “carvão para transp. marítimo” e “carvão para transp ferroviário” são iguais. ⁽²⁾ Eletricidade consumida do *grid*.

Tabela 45 - Resultado do Inventário – Fluxos elementares

Fluxos elementares	Unidade	Caso 1	Caso 2	Caso 2b
Carvão ^{(1) (2)}	t/a	- 961.000	- 961.000	- 1.160.000
Gás Natural ⁽²⁾	10 ³ m ³ /a	-----	- 251	- 303
CO ₂	t/a	1.920.000	240.000	291.000
N ₂ O	t/a	9	12	14
CH ₄	t/a	10.600	10.600	12.800
Calcário ⁽²⁾	t/a	- 23.700	- 23.700	- 28.600
Bottom ash	t/a	21.200	21.200	25.600
Fly ash	t/a	57.500	57.500	69.500
MEA degradado	t/a	-----	11.200	13.600
Água ⁽²⁾	t/a	- 4.430.000	- 4.520.000	- 5.460.000

Notas: ⁽¹⁾ A massa de carvão que entra na UTE (Tabela 45 - produtos) é diferente da massa de carvão extraído (recurso) porque o modelo considerou a perda durante 20% na produção de carvão. ⁽²⁾ O sinal negativo representa uma entrada no sistema. Por exemplo, o carvão que é um recurso, sai do meio ambiente e entra no sistema estudado, enquanto que o CO₂, que é uma emissão, sai do sistema para o meio ambiente.

A etapa de interpretação dos resultados foi baseada nas análises de contribuição e perturbação. A análise de incerteza não foi realizada porque necessita dos parâmetros de incerteza, não disponíveis, para os parâmetros de entrada. A análise comparativa não foi realizada por se tratar de uma análise simples, o que pode facilmente induzir a realização de alegações sem uma análise adequada da robustez desses créditos, com respeito à influência de incertezas envolvidas.

Como descrito no item 2.1.5, a etapa de interpretação é um processo iterativo e pode resultar em revisões da ACV em vários aspectos como, por exemplo, a qualidade

dos dados utilizados. Durante as etapas iterativas da ACV, a fase de interpretação serve para orientar os trabalhos visando à melhoria do modelo do inventário do ciclo de vida para atender às necessidades do objetivo do estudo. Se as etapas iterativas da ACV resultaram em um modelo final de LCI e resultados, e especialmente em estudos de ACV para fins comparativos (em parte, também aplicável a outros tipos de estudos), a fase de interpretação serve para a obtenção de conclusões robustas e até recomendações. Portanto, as conclusões e recomendações do estudo foram baseadas nesta etapa.

5.1 Análise de contribuição

Nesta etapa foram desagregados os resultados obtidos no inventário, para permitir que seja apresentada contribuição de cada processo ou fluxo elementar para a categoria de aquecimento global (ver item 2.1.5).

Os dados obtidos na análise de contribuição, apresentados na Tabela 46, mostram uma mudança no perfil de emissões do sistema como um todo com o uso da planta de captura.

No caso 1, o total das emissões de CO₂ representa 88% das emissões totais estimadas em CO₂ equivalente, enquanto que as emissões de CH₄ representam apenas 12% do total. No caso 2, o total de emissões de CO₂ representa 47% das emissões totais estimadas em CO₂ equivalente, enquanto que as emissões de CH₄ representam 52%. Apesar da grande variação observada para o CO₂ e o CH₄, as emissões de N₂O não são significativas nos dois casos.

Tabela 46 – Contribuição dos fluxos elementares para as emissões

Processos	Fluxos Elementares	Caso 1 kg CO ₂ eq./a	%	Caso 2 kg CO ₂ eq./a	%	Caso 2b kg CO ₂ eq./a	%
Todos	[E410] CO ₂	1.920.000	88	240.000	47	291.000	47
Todos	[E495] N ₂ O	2.730	0	3.450	1	4.160	1
Todos	[E642] CH ₄	265.000	12	266.000	52	321.000	52
Total	Total	2.190.000	100	510.000	100	616.000	100

A Tabela 47 apresenta os dados desagregados por processos e respectivos fluxos elementares.

Tabela 47 - Contribuição dos processos para as emissões

Processos	Fluxo elementar	Caso 1 kg CO ₂ eq./a	%	Caso 2 kg CO ₂ eq./a	%	Caso 2b kg CO ₂ eq./a	%
Produção de carvão	CO ₂	665	0	666	0	804	0
Produção de carvão	N ₂ O	77	0	77	0	93	0
Produção de carvão	CH ₄	264.000	12	264.000	52	320.000	52
Transp. marítimo de carvão	CO ₂	14.400	1	14.500	3	17.500	3
Transp. marítimo de carvão	N ₂ O	228	0	228	0	275	0
Transp. marítimo de carvão	CH ₄	4	0	4	0	4	0
Transporte ferrov. de carvão	CO ₂	7.130	0	7.130	1	8.610	1
Transporte ferrov. de carvão	N ₂ O	119	0	820	0	991	0
Transporte ferrov. de carvão	CH ₄	69	0	10	0	12	0
Mineração de calcário	CO ₂	734	0	734	0	887	0
Mineração de calcário	N ₂ O	84	0	84	0	102	0
Mineração de calcário	CH ₄	1	0	1	0	1	0
Produção da cal	CO ₂	5.380	0	5.380	1	6.500	1
Transporte da cal	CO ₂	236	0	236	0	286	0
Transporte da cal	N ₂ O	2.220	0	2.220	0	2.680	0
Transporte da cal	CH ₄	434	0	434	0	525	0
UTE	CO ₂	1.890.000	86	189.000	37	228.000	37
Produção do solvente	CO ₂	-----	0	15.800	3	19.000	3
Produção do solvente	CH ₄	-----	--	845	0	1.020	0
Transporte do solvente	CO ₂	-----	--	497	0	600	0
Transporte do solvente	N ₂ O	-----	--	8	0	9	0
Transporte do solvente	CH ₄	-----	--	1	0	1	0
Transporte de NaOH	CO ₂	-----	--	600	0	725	0
Transporte de NaOH	N ₂ O	-----	--	9	0	11	0
Transporte de NaOH	CH ₄	-----	--	1	0	1	0
Produção de NaOH	CO ₂	-----	--	551	0	666	0
Produção de NaOH	N ₂ O	-----	--	0	0	0	0
Produção de NaOH	CH ₄	-----	--	0	0	0	0
Produção de eletricidade	CO ₂	4.500	--	5.770	1	6.980	1
Total		2.190.000	100	510.000	100	616.000	100

A redução das emissões de CO₂ relacionadas apenas à utilização da planta de captura, ou seja, o CO₂ capturado na UTE foi estimado em 1.701.000 kg de CO₂ por ano. Este valor é a diferença entre a emissão de 1.890.000 kg de CO₂ por ano (caso1) e a emissão de 189.000 kg de CO₂ por ano (caso 2) e representa uma redução de 90% nas emissões da UTE com CCS em relação à UTE sem CCS (Tabela 47).

Os valores de CO₂ capturado e evitado na UTE também podem ser estimados pela massa de CO₂ por kWh produzido na UTE. A quantidade de CO₂ evitado é a

diferença das emissões de CO₂ por kWh da UTE com captura de CO₂, em comparação com as emissões da UTE que não captura CO₂, ou seja, a planta que serve de linha de base.

O uso da tecnologia de captura de CO₂ reduz a eficiência térmica da UTE, aumentando a emissão de CO₂ para a mesma energia gerada, ou seja, a massa de CO₂ por kWh. Por esta razão, a quantidade de emissões de CO₂ evitadas é inferior ao percentual de 90% que é capturado. A Tabela 48 resume os valores estimados para o CO₂ emitido, capturado e evitado. Ao observarmos os valores do CO₂ emitido para o caso 1 e para o caso 2 é possível estimar uma redução equivalente a 88%, que é inferior aos 90% da taxa de captura da planta.

Tabela 48 - CO₂ emitido, capturado e evitado na UTE

CO ₂ (g/kWh)	Caso 1	Caso 2	Caso 2b
CO ₂ Emitido	1.083	131	131
CO ₂ Capturado	0	1.179	1.179
CO ₂ Evitado	0	952	952

Aqui vale ressaltar que a comparação deve ser realizada sempre entre plantas com a mesma tecnologia de geração de energia. Em alguns casos, nos quais não é realizado o *retrofitting*, as plantas com captura de CO₂ podem deslocar, ou seja, substituir plantas antigas e ineficientes, o que aumentaria a quantidade de CO₂ evitado (IEA, 2007).

No entanto, quando outras etapas do ciclo de vida são adicionadas o percentual de CO₂ evitado é reduzido. A estimativa do CO₂ equivalente evitado em todo o ciclo de vida dos dois casos estudados deve ser realizada pela diferença entre o total de emissões para o caso 1, estimado em 2.190.000 kg CO₂ eq. ao ano, e o caso 2, estimado em 510.000 kg CO₂ eq. ao ano. Essa diferença representa uma redução de 77% do CO₂ equivalente evitado. Esse resultado mostra que apesar de haver uma redução de 90% do CO₂ emitido na UTE, a redução das emissões de GEE, em CO₂ eq. evitado para todo o sistema, é de 77% (Tabela 47).

A comparação da redução entre os casos 1 e caso 2 considera que haverá uma redução de produção de energia líquida. No entanto, como já comentado anteriormente, quando esta parcela de energia deixa de ser fornecida pela UTE ela terá que ser fornecida por outra unidade geradora. Assim, quando a redução é calculada pela diferença entre o caso 1 e caso 2b, ou seja, uma redução de 2.190.000 kg CO₂ eq. por

ano para 616.000 kg de CO₂ eq. por ano, a redução das emissões de GEE, em CO₂ eq. evitado, é de 72% (Tabela 47).

5.2 Análise de perturbação

A ideia da análise de perturbação é que pequenas perturbações (perturbações marginais) nos parâmetros de entrada podem se propagar como desvios menores ou maiores nos parâmetros de saída resultantes e que o conhecimento da magnitude desses desvios e os seus respectivos parâmetros podem ser úteis (item 2.1.5).

Com comentado anteriormente, a análise de perturbação não exige que as incertezas do parâmetro sejam especificadas. Esta abordagem faz uma análise da sensibilidade inerente dos resultados para cada parâmetro de entrada consecutivos, sem considerar a incerteza real desses parâmetros.

A análise de perturbação é uma forma de análise de sensibilidade e busca identificar os itens que são de alguma forma críticos, ou seja, quando pequenas alterações ou imprecisões nos dados podem ter uma influência significativa nos resultados. Basicamente, a análise gera uma pequena perturbação em todos os itens de dados, um a um, e recalcula os resultados da ACV. Os resultados são, então, usados para o cálculo dos multiplicadores, que indicam os itens de dados que sofrem uma influência significativa.

A extensão na qual a perturbação de certo parâmetro de entrada se propaga em um determinado parâmetro de saída pode ser interpretado como um multiplicador. Se um aumento de 1% em um parâmetro de entrada resulta em um aumento de 2% em um parâmetro de saída, o multiplicador que relaciona estes dois itens é igual a 2. Se o resultado de saída diminui em 2%, o multiplicador é igual a -2. O conceito de multiplicadores é restrito às mudanças marginalmente pequenas (HEIJUNGS; KLEIJN, 2001).

Isso permite o conhecimento mais preciso e enumera os itens de dados dos quais ainda grandes incertezas não são importantes, e que, portanto, não merecem prioridade em uma ACV mais detalhada.

Os multiplicadores obtidos que relacionam os produtos e a categoria de aquecimento global estão resumidos na Tabela 49 e Tabela 50.

A interpretação dos dados apresentados deve ser realizada da seguinte forma. Tomemos como exemplo a primeira linha da Tabela 49, onde o produto “[G1] - carvão

para transporte marítimo” é um parâmetro de entrada (*input*) para o processo “[P2] - transporte marítimo de carvão”. O multiplicador calculado para este caso é igual a 0,13. Neste caso, um aumento de 1% no parâmetro de entrada, ou seja, na massa do produto [G1] - carvão para transporte marítimo, representará um aumento de 0,13% (medido em CO₂ eq.) na contribuição do processo “[P2] - transporte marítimo de carvão” para a categoria Aquecimento Global.

O produto “[G1] Carvão para transporte marítimo” também é um parâmetro de saída (*output*), neste caso, em relação ao processo “[P3] transporte ferroviário de carvão” (linha 2 da Tabela 49). Assim, uma variação de 1% em seu fluxo resultará em um multiplicador da mesma magnitude do caso anterior, igual a 0,13, mas com o sinal negativo.

Tabela 49 – Multiplicadores em relação à categoria Aquecimento Global (C6) - Caso 1

Produtos	Processos	Multiplicadores
[G1] Carvão para transp. marítimo	[P2] Transporte marítimo de carvão	0,13
[G1] Carvão para transp. marítimo	[P3] Transporte ferroviário de carvão	-0,13 ⁽¹⁾
[G2] Eletricidade UTE	[P7] UTE	-1 ⁽¹⁾
[G3] carvão para transp. ferroviário	[P1] Produção de carvão	-0,12 ⁽¹⁾
[G3] carvão para transp. ferroviário	[P3] Transporte ferroviário de carvão	0,12
[G4] Cal para UTE	[P6] Transporte da cal	0,00
[G4] Cal para UTE	[P7] UTE	0,01
[G5] Calcário para calcinação	[P1] Produção de carvão	0,00
[G5] Calcário para calcinação	[P4] Mineração de calcário	0,00
[G5] Calcário para calcinação	[P5] Produção da cal	0,00
[G6] Carvão para UTE	[P2] Transporte marítimo de carvão	-0,14 ⁽¹⁾
[G6] Carvão para UTE	[P7] UTE	0,14
[G7] Cal para transporte	[P5] Produção da cal	0,00
[G7] Cal para transporte	[P6] Transporte da cal	0,01
[G9] Eletricidade do <i>grid</i>	[P1] Produção de carvão	0,00
[G9] Eletricidade do <i>grid</i>	[P4] Mineração de calcário	0,00
[G9] Eletricidade do <i>grid</i>	[P8] Produção de eletricidade	0,00

Notas: ⁽¹⁾ O sinal negativo não representa uma diminuição do fluxo. Nos casos acima eles são negativos porque se referem a produtos saindo da unidade de produção. Por exemplo, o produto “[G1] Carvão para transp. marítimo” é um *output* do processo “[P3] Transporte ferroviário de carvão” e um *input* para “[P2] Transporte marítimo de carvão”. Por esta razão ele apresenta dois multiplicadores de mesma magnitude, sendo um negativo, para o caso do *output*, e outro positivo, para o caso do *input*.

Tomemos como exemplo o produto “[G2] Eletricidade UTE”, que é o produto do processo “[P7] UTE”. Como era de se esperar, porque uma alteração no parâmetro de entrada do processo “[P7] UTE” envolve todos os outros processos do sistema, um

aumento de 1% na produção desse fluxo irá refletir em um aumento de 1% na categoria (6) Aquecimento Global.

Tabela 50 - Multiplicadores em relação à categoria Aquecimento Global (C6) - Caso 2

Produtos	Processos	Multiplicadores
[G1] Carvão para transp. marítimo	[P2] Transporte marítimo de carvão	0,56
[G1] Carvão para transp. marítimo	[P3] Transporte ferroviário de carvão	-0,56 ⁽¹⁾
[G2] Eletricidade UTE	[P7] UTE com CCS	-1 ⁽¹⁾
[G3] carvão para transp. ferroviário	[P1] Produção de carvão	-0,51
[G3] carvão para transp. ferroviário	[P3] Transporte ferroviário de carvão	0,51
[G4] Cal para UTE	[P6] Transporte da cal	-0,01 ⁽¹⁾
[G4] Cal para UTE	[P7] UTE com CCS	0,03
[G5] Calcário para calcinação	[P1] Produção de carvão	0,01
[G5] Calcário para calcinação	[P4] Mineração de calcário	0,01
[G5] Calcário para calcinação	[P5] Produção da cal	0,01
[G6] Carvão para UTE	[P2] Transporte marítimo de carvão	-0,56 ⁽¹⁾
[G6] Carvão para UTE	[P7] UTE com CCS	0,58
[G7] Cal para transporte	[P5] Produção da cal	0,00
[G7] Cal para transporte	[P6] Transporte da cal	0,02
[G8] Solvente MEA	[P8] Produção do solvente	-0,02 ⁽¹⁾
[G8] Solvente MEA	[P9] Transporte do solvente	0,04
[G9] Soda cáustica (NaOH)	[P10] Transporte de NaOH	0,01
[G9] Soda cáustica (NaOH)	[P11] Produção de NaOH; input of soda cáustica	0,01
[G10] Solvente MEA para UTE	[P7] UTE com CCS	0,04
[G10] Solvente MEA para UTE	[P9] Transporte do solvente	-0,02 ⁽¹⁾
[G11] Soda cáustica para UTE	[P7] UTE com CCS	0,02
[G11] Soda cáustica para UTE	[P10] Transporte de NaOH	0,01
[G14] Cloro	[P11] Produção de NaOH; input of Cloro	0,01
[G15] Dicloroetano	[P11] Produção de NaOH; input of Dicloroetano	0,01
[G16] Eletricidade do <i>grid</i>	[P1] Produção de carvão	0,02
[G16] Eletricidade do <i>grid</i>	[P4] Mineração de calcário	0,02
[G16] Eletricidade do <i>grid</i>	[P11] Produção de NaOH; input of soda cáustica	0,01
[G16] Eletricidade do <i>grid</i>	[P11] Produção de NaOH; input of Cloro	0,01
[G16] Eletricidade do <i>grid</i>	[P11] Produção de NaOH; input of Dicloroetano	0,01
[G16] Eletricidade do <i>grid</i>	[P12] Produção de eletricidade	0,00

Notas: ⁽¹⁾ O sinal negativo não representa uma diminuição do fluxo. Nos casos acima eles são negativos porque se referem a produtos saindo da unidade de produção.

Os multiplicadores que apresentam os maiores valores são os estimados para os produtos relacionados à produção de carvão – “[G1] Carvão para transp. marítimo”, “[G3] carvão para transp. ferroviário” e “[G6] Carvão para UTE” - e a eletricidade produzida na UTE – “[G2] Eletricidade UTE”.

No caso dos multiplicadores relacionados à produção de carvão observa-se um aumento entre os valores calculados para o caso 1 e para o caso 2. Esse aumento é o resultado da mudança de perfil dos gases de efeito estufa que contribuem para a categoria “Aquecimento Global”. Como comentado anteriormente na análise de contribuição, o CH₄ passa a representar grande parcela dos GEE.

Segundo o conceito da análise de perturbação, a etapa de mineração merece prioridade em uma ACV mais detalhada. A mineração se mostrou o processo mais sensível em relação a variações marginais nos parâmetros de entrada. Vale ressaltar que a análise também deve levar em consideração aspectos que influenciam o potencial de emissão de CH₄, por exemplo, o tipo de mineração, subterrânea ou de superfície, a técnica utilizada e a profundidade do leito carvão.

5.3 Horizonte de tempo e a métrica utilizada

A consideração do tempo na ACV é fundamental na avaliação das medidas de mitigação e nas métricas utilizadas. Segundo PETERS *et al.* (2011), dois aspectos devem ser considerados sobre o tempo: o momento no qual ocorrem as emissões e os impactos e a seleção do horizonte de tempo que será utilizado para a comparação dos impactos climáticos. No entanto, considerar o tempo nos estudos de ACV não é uma prática comum.¹³⁷

Em relação ao primeiro aspecto, geralmente os resultados obtidos na etapa de inventário representam as massas agregadas de todas as saídas de um determinado fluxo elementar para o meio ambiente. A agregação dos dados gera uma limitação, porque a emissão de toda a massa de gases em um único momento geralmente não tem o mesmo impacto se esta mesma massa for emitida em menores quantidades durante um período de tempo (LEVASSEUR *et al.*, 2010). Por exemplo, neste estudo o período de emissão pode ser igualado à vida útil da UTE.¹³⁸

Esses dois aspectos ainda geram a relação entre o momento que ocorrem as emissões e o momento no qual os impactos climáticos são avaliados. Por exemplo, as emissões podem ocorrer entre 1990 e 2010, enquanto os impactos climáticos são avaliados entre 2050 e 2100. Assim, os momentos nos quais ocorrem as emissões e os

¹³⁷ Por exemplo, estudos de ACV sobre biocombustíveis mostram que a inclusão do tempo pode tornar os biocombustíveis menos favoráveis que a gasolina (PETERS *et al.*, 2011).

¹³⁸ Vale lembrar que o que é importante neste caso é a vida útil de operação e não a vida útil econômica da planta.

impactos são particularmente importantes para que as opções de mitigação possam ser priorizadas (PETERS *et al.*, 2011).

Estes aspectos já foram tratados por outros autores. Por exemplo, em ROSA; SCHAEFFER (1995) foi realizada uma análise sobre os efeitos cumulativos do aquecimento das emissões ao longo do tempo, por unidade de energia produzida, em uma hidrelétrica em comparação às emissões de GEE, por unidade de energia produzida, em uma UTE.

Na comparação de diferentes cenários ou produtos, é importante que os impactos sejam considerados com base nos mesmos limites temporais, caso contrário há o risco de resultados tendenciosos. Em estudos de ACV, um horizonte de tempo infinito é geralmente utilizado para avaliar os impactos potenciais e para que sejam evitadas preferências de tempo. No entanto, para a categoria de impacto de aquecimento global a escolha de um horizonte infinito de tempo gera uma inconsistência entre o intervalo de tempo escolhido para a análise e o intervalo de tempo coberto pelos resultados da ACV (LEVASSEUR *et al.*, 2010).

A mudança no perfil das emissões do sistema estudado levou à análise sobre a importância do horizonte de tempo utilizado para relacionar as emissões do sistema aos seus efeitos para o aquecimento global. Observou-se que no caso 1 as emissões de CO₂ representavam a maior parte das emissões, enquanto que no caso 2 o CH₄ passa a representar o maior percentual. No estudo de caso, o aumento das emissões de CH₄ entre os casos 1 e caso 2b é relativamente pequeno, estimado em aproximadamente 2.200 kg/a (Tabela 51). No entanto se for considerado um horizonte de tempo mais curto para a métrica utilizada é possível notar uma mudança ainda mais acentuada no impacto das emissões do sistema na categoria Aquecimento Global.

Tabela 51 - Emissão de metano por processo, em kg/a

Processos	Caso 1		Caso 2		Caso 2b	
	Valor (kg/a)	%	Valor (kg/a)	%	Valor (kg/a)	%
[P1] Produção de carvão	10.600	100	10.600	99,52	12.800	99,52
[P2] Transp. marítimo de carvão	0	0	0	0	0	0
[P3] Transp. ferroviário de carvão	3	0	0	0	0	0
[P4] Mineração de calcário	0	0	0	0	0	0
[P6] Transporte da cal	17	0	17	0,16	21	0,16
[P8] Produção do solvente	0	0	34	0,32	41	0,32
[P9] Transporte do solvente	0	0	0	0	0	0
[P10] Transporte de NaOH	0	0	0	0	0	0
[P11] Produção de NaOH	0	0	0	0	0	0
Total	10.600	100	10.600	100	12.800	100

A métrica escolhida na etapa de categorização deste estudo foi a métrica GWP para o horizonte de 100 anos, que é a métrica adotada no Protocolo de Quioto.

Existem outras métricas além do GWP, mas foge ao escopo desse estudo analisar cada uma delas.¹³⁹ Não há uma métrica disponível que permita a comparação com precisão de todas as consequências das emissões de diferentes gases ou substâncias. A escolha da métrica mais apropriada vai além dos aspectos científicos e depende de quais aspectos das alterações climáticas e horizontes temporais são considerados mais importantes pelos tomadores de decisão (IPCC, 2009). A métrica mais adequada vai depender de quais consequências são mais importantes para uma determinada aplicação. Assim, as escolhas procuram selecionar um tipo específico de índice de ponderação e hipóteses que sejam adequadas para fundamentar a escolha, tendo como base os temas abordados na política de mitigação apresentada (HAYHOE *et al.*, 2000).

No caso do uso do GWP, a escolha do horizonte de tempo determina como os formuladores de políticas pesam os custos de curto e longo prazo e os benefícios de diferentes estratégias para combater as alterações climáticas. Considerando que as

¹³⁹ Em (REISINGER *et al.*, 2010) é apresentada uma avaliação abrangente das incertezas no Potencial de Aquecimento Global (GWP) e no Potencial de Mudança Global de temperatura (GTP) do CH₄. Por exemplo, há métricas que combinam considerações físicas e econômicas: enquanto o *Global Damage Potentials* (GDPs) e compara os danos relativos resultantes das emissões de massas iguais de dois GEE (nesta métrica há uma dependência dos aspectos físicos do sistema climático e das considerações econômicas que ligam a mudança climática a seus impactos e suas consequências para a economia); o *Global Cost Potentials* (GCPs), por sua vez, compara os custos marginais de abatimento relativos para dois gases, quando um determinado objetivo de mudança climática é atingido ao menor custo. Para mais informações sobre as diferentes métricas existentes consultar (GIAN-KASPER *et al.*, 2009; JOHANSSON, 2009).

emissões de gases de efeito estufa precisam ser reduzidas no horizonte de décadas, seria prudente uma revisão do horizonte de tempo utilizado para a aplicação do GWP.

A escolha do tipo de métrica tem o maior impacto, quando são comparadas as emissões de gases com tempos de vida significativamente diferentes. Em termos práticos, isto significa que, quando se comparam as emissões de GEE para as emissões de CO₂, a escolha do horizonte de métrica e tempo terá implicações muito maiores sobre o CH₄ do que para o N₂O, cuja vida útil é mais parecida com a vida do CO₂ (GIAN-KASPER *et al.*, 2009).

O GWP para as emissões de CH₄ é determinado pelas relações entre as concentrações de CH₄ e CO₂ e do forçamento radiativo.¹⁴⁰ O CO₂ possui um forçamento radiativo de 1,6 W/m² e é o principal gás de efeito estufa antropogênico, representando a maior parcela de contribuição da perturbação humana ao longo do período histórico. Possui um tempo de residência extremamente longo na atmosfera. As trocas entre a atmosfera a Terra e a superfície do oceano resultam em uma retirada relativamente rápida, de cerca de 50%, do CO₂ emitido pela combustão de combustíveis fósseis e biomassa. A fração restante diminui lentamente, a uma taxa controlada pela mistura vertical lenta das massas de água oceânicas. O resultado é que em um horizonte de 1000 anos, cerca de 20% dos CO₂ emitido ainda está na atmosfera. Esta vida longa característica do CO₂ dita as prioridades de longo prazo em termos de mitigação de GEE (FRIEDLINGSTEIN, 2009).

Por sua vez, cada uma das relações entre as concentrações de CH₄ e CO₂ e do forçamento radiativo é afetada por um número de incertezas científicas e fatores dependentes do tempo. Ao se relacionarem as emissões de CH₄ com o forçamento radiativo, a vida do CH₄ é o fator mais sensível a mudanças dependentes do tempo. A comparação do forçamento radiativo produzido pelas emissões de CH₄ com o forçamento radiativo produzido pelas emissões de CO₂ é adicionalmente incerta por causa de efeitos indiretos do forçamento radiativo (HAYHOE *et al.*, 2000).

¹⁴⁰ O forçamento radiativo é uma medida de como o balanço de energia do sistema (atmosfera da Terra) é influenciado quando os fatores que afetam o clima são alterados. O termo radiação é utilizado porque esses fatores alteram o equilíbrio entre a entrada de radiação solar e a saída da radiação infravermelha da atmosfera. O termo forçamento é utilizado para indicar que este balanço radiativo, que é o mecanismo que controla a temperatura da superfície da Terra, está sendo forçado para uma posição fora de seu equilíbrio. O forçamento radiativo é normalmente quantificado como a taxa de troca de energia por unidade de área do globo medido no topo da atmosfera, utilizando-se a unidade W/m². Quando o forçamento radiativo é avaliado como positivo, a energia do sistema irá aumentar, levando a um aquecimento do sistema (IPCC, 2011).

Por ter um tempo de permanência curto na atmosfera (12 anos) o seu efeito de aquecimento irá ocorrer durante os primeiros anos após a sua emissão. No caso do CO₂, que possui uma vida longa na atmosfera (na ordem de milhares de anos), o efeito ocorrerá no longo prazo (LEVASSEUR *et al.*, 2010).

Com a mudança do horizonte de tempo de 100 para 500 anos, o numerador da equação 13 permanece constante para os gases de vida curta, neste caso o CH₄, enquanto que a denominador, que é a integral para o CO₂, cresce significativamente. O mesmo pode ser feito para a mudança de 100 para 20 anos. Por esse motivo o GWP do CH₄ cresce consideravelmente com a diminuição do horizonte de tempo, que define os limites da integral.

$$GWP_i^{HT} = \frac{\int_0^{HT} a_i[C_i(t)dt]}{\int_0^{HT} a_r[C_r(t)dt]} \quad \text{eq. 13}$$

Onde,

HT é o horizonte de tempo utilizado

a é o aumento do forçamento radiativo instantâneo por unidade de massa na atmosfera

C(t) é carga do gás emitido na atmosfera em função do tempo ¹⁴¹

i é o gás considerado, neste caso é o CH₄ ou o CO₂

r é o gás de referência, CO₂

O numerador e o denominador desta equação são chamados de potencial de aquecimento global absoluto (*Absolute Global Warming Potentials – AGWP*).

Assim, a seleção do horizonte de tempo utilizado equivale a dar um peso ao tempo e é uma das partes mais críticas do processo de contabilidade do carbono emitido. Sendo assim, quanto mais curto o horizonte de tempo, maior a importância dada aos impactos mais próximos no tempo, porque os impactos que ocorrem depois do limite escolhido não são considerados. A maioria dos métodos de ACV utiliza a métrica GWP₁₀₀. No entanto, o uso de um horizonte de tempo fixo para a análise de um estudo

¹⁴¹ A carga de CO₂ atmosférico *C* (t) após uma emissão pulso é dada pelo modelo de Bern. Para outros gases de efeito estufa a carga atmosférica dependente do tempo é dada por uma equação de decaimento de primeira ordem.

de ACV gera inconsistências entre o horizonte de tempo escolhido para a análise e o período de tempo considerado nos resultados, especialmente para produtos ou projetos com vida longa (LEVASSEUR *et al.*, 2010).

A redução nas emissões de CH₄ terá um efeito, em relação à categoria de mudanças climáticas, maior no curto prazo. Por exemplo, esse efeito é o resultado do maior valor para o GWP₂₀, igual a 72, quando comparado ao GWP₁₀₀, igual a 25. Ou seja, uma medida que reduza o CH₄ terá 72 vezes mais impacto sobre o aquecimento global que uma medida que reduza o CO₂, considerando um período de 20 anos (LEVASSEUR *et al.*, 2010). A título de exemplificação, a Figura 16 mostra a comparação dos efeitos sobre as mudanças no nível de temperatura causados pelas reduções de CO₂ e CH₄, em CO_{2eq} (GWP₁₀₀) e °C.

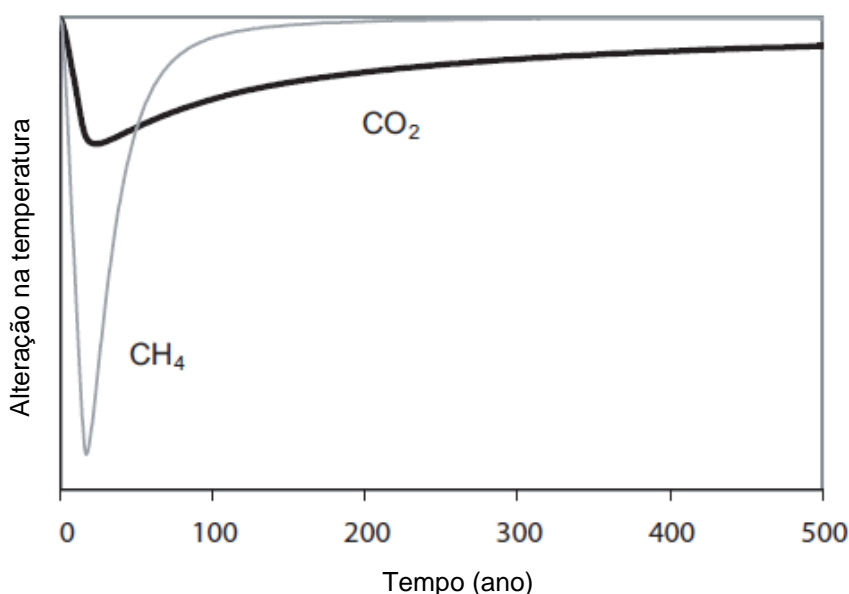


Figura 16 – Efeitos sobre as mudanças no nível de temperatura causados pelas reduções de CO₂ e CH₄, em CO_{2eq} (GWP₁₀₀) e °C.
Fonte: GODAL; FUGLESTVEDT, J. (2002)

A Tabela 52 resume os valores do GWP para diferentes horizontes de tempo 20, 100 e 500 anos.¹⁴²

¹⁴² O software CMLCA disponibiliza diferentes horizontes de tempo para a métrica GWP: “(C6) *Global Warming* (GWP₁₀₀)”, “(C7) *Global Warming Net* (GWP₁₀₀ min)”, “(C8) *Global Warming Net* (GWP₁₀₀ max)”; “(C9) *Global Warming* (GWP₂₀)”; “(C10) *Global Warming* (GWP₅₀₀)”. A diferenciação entre as métricas é feita no caso do software CMLCA criando-se categorias (C) diferentes. As métricas avaliadas no relatório do IPCC são baseadas em aspectos puramente físicos, mas muitos economistas têm argumentado que as métricas de emissões precisam também incluir dimensões econômicas do problema que se destinam abordar.

Tabela 52 – Valores do GWP para CO₂, CH₄ e N₂O para diferentes horizontes de tempo

Gases	GWP para determinado horizonte de tempo em anos		
	20	100	500
CO ₂	1	1	1
CH ₄	72	25	7,6
N ₂ O	289	298	153

Fonte: IPCC (2011).

A análise de contribuição com o GWP para o horizonte de 100 anos mostrou que a participação do CH₄ passou de 12% no caso base para 52% no caso da UTE com CCS (Tabela 46).

A Tabela 48 apresenta os valores estimados para o CO₂ emitido, capturado e evitado nas fronteiras da UTE. Se a comparação for refeita, considerando as emissões em todo o ciclo de vida, as emissões evitadas serão inferiores. A Tabela 53 resume os valores obtidos com o GWP₁₀₀.

Tabela 53 - CO₂ equivalente (GWP₁₀₀) emitido, capturado e evitado no sistema completo.

CO ₂ e (g/kWh)	Caso 1	Caso 2 / Caso 2b
CO ₂ e Emitido	1.258	354
CO ₂ Capturado	0	1.179
CO ₂ e Evitado	0	904

O valor das emissões de CO₂e em g/kWh permite que o CCS seja comparado a outras tecnologias. A título de comparação, a Tabela 54 apresenta um resumo realizado em SOVACOOOL (2008) de diversos resultados de emissões de CO₂e, em g/kWh.

Tabela 54 - CO₂ equivalente emitido para diferentes tecnologias

Tecnologia	Capacidade/Configuração/Combustível	Estimativa (gCO₂e/kWh)
Eólica	2,5 MW, <i>offshore</i>	9
Hidroeletricidade	3,1 MW, reservatório de acumulação	10
Eólica	1,5 MW, <i>onshore</i>	10
Biogás	Digestão anaeróbica	11
Hidroeletricidade	300 kW, fio d'água	13
Solar térmica	80 MW, parabólica	13
Biomassa	Coqueima – madeira de reflorestamento e <i>hard coal</i>	14
Biomassa	Madeira de reflorestamento e turbina a vapor	22
Biomassa	Coqueima – madeira de reflorestamento e <i>hard coal</i>	23
Biomassa	<i>Forest Wood reciprocating engine</i>	27
Biomassa	<i>Waste Wood steam turbine</i>	31
Solar PV	Policristalino	32
Biomassa	<i>Short rotation forestry steam turbine</i>	35
Geotermal	80 MW, <i>hot dry rock</i>	38
Biomassa	<i>Short rotation forestry steam turbine</i>	41
Nuclear	Diferentes tipos de reator	66
Gás Natural	Ciclo combinado	443
Célula combustível	Hidrogênio de reforma do gás natural	664
Diesel	Diferentes plantas e tipos de turbina	778
Óleo pesado	Diferentes plantas e tipos de turbina	778
Carvão	Diferentes plantas com tratamento de gases	960
Carvão	Diferentes plantas sem tratamento de gases	1050

Fonte: SOVACOOOL (2008)

Nota: O estudo SOVACOOOL (2008) obteve estes valores de emissão de outros estudos de ACV que utilizaram GWP100. É possível verificar que, sob a métrica de GWP100, uma UTE a carvão convencional que adote CCS com taxa de remoção de 90% tem emissões cerca de 80% daquelas verificadas em uma UTE baseada em ciclo combinado a gás natural.

No entanto, a utilização do GWP₁₀₀ para estudos de ACV não é a forma correta de avaliar as emissões de CO₂ equivalente.

A importância do uso de um método que considere um GWP dinâmico já foi tratada por outros autores, por exemplo, nos estudos de ROSA; SCHAEFFER (1995), PETERS *et al.* (2011) e LEVASSEUR *et al.* (2010).

No GWP dinâmico o horizonte de tempo deve ser considerado para cada pulso de emissão. Assim, as emissões não devem ser consideradas como um único pulso, ou seja, em apenas um único momento no tempo. As emissões devem ser dispersas ao longo da vida útil de funcionamento do sistema estudado, por exemplo, anualmente. Para uma UTE com 40 anos de vida útil as emissões deverão ser consideradas por pulsos anuais durante os 40 anos. O intervalo de tempo de interesse, ou seja, para o qual se deseja avaliar o impacto também deve ser definido. Caso o horizonte de tempo para se estimar o impacto seja de 100 anos, então para o primeiro pulso, que ocorre no ano 1, o limite de integração será do ano 1 até o ano 100. Seguindo o mesmo raciocínio, o limite de integração para o segundo pulso será do ano 2 até o ano 100. Essa lógica

deve ser aplicada para todos os pulsos até o último o pulso 40, quando o limite de integração será do ano 40 até o ano 100.

Por exemplo, no estudo SOCOLOW; PACALA (2006) o CCS é citado como uma das tecnologias para a redução das emissões de CO₂ para a atmosfera no horizonte de 50 anos. Neste estudo foi utilizado o horizonte de 100 anos. Neste caso deveria ser considerado o horizonte de 50 anos, que é o horizonte para o qual a avaliação está sendo realizada. Além disso, os cenários utilizados consideram o CO₂ capturado e não o CO₂ equivalente evitado. Supondo que a tecnologia CCS estivesse disponível em escala comercial para uso imediato, talvez fosse mais ou, pelo menos, tão interessante para a redução das emissões de CO₂ equivalente, no horizonte de tempo de 50 anos, por exemplo, medidas de redução do metano na etapa de mineração de carvão para as termoelétricas a carvão.

6 Conclusão e Recomendações

Esta tese teve por objetivo estimar a contribuição da tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) em uma UTE a carvão para a redução da emissão de gases de efeito estufa. Partiu-se da hipótese que a utilização da tecnologia de captura resulta em um aumento das emissões do sistema, ou seja, aumenta as emissões na UTE com captura assim como em etapas fora das fronteiras da planta *per se*. Portanto, a contabilização dessas emissões indiretas levará a uma redução do percentual do carbono evitado, em termos de redução de emissões de CO₂ equivalente, que é atribuído à planta de captura.

O estudo foi estruturado com base no método de análise de ciclo de vida (ACV), apresentado no capítulo 2. O principal objetivo de uma ACV é a avaliação dos impactos ambientais de uma tecnologia ou um serviço. No entanto, seguindo o objetivo e escopo propostos, esta tese considera somente aspectos relacionados aos impactos relativos às mudanças climáticas. Essa decisão foi tomada apesar do conhecimento da importância de outros aspectos, não ligados aos aspectos do aquecimento global, na avaliação dos benefícios e custos do CCS. Optou-se por um estudo que tratasse apenas dos aspectos que relacionavam o CO₂ capturado na UTE com a redução efetiva de CO₂ equivalente no sistema como um todo.

No capítulo 3 foi realizada uma breve descrição das principais tecnologias empregadas na UTE a carvão pulverizado e da configuração da planta de captura de carbono. A escolha da tecnologia de captura adequada para a UTE analisada foi baseada em outros estudos que realizaram comparações detalhadas das tecnologias disponíveis e as condições adequadas para a sua utilização. O caso estudado foi tratado como um caso de *retrofitting* de uma UTE para receber uma planta de captura de CO₂. Assim, neste caso, a opção tecnológica mais adequada é a pós-captura, com absorção química, utilizando o solvente MEA.

A realização de uma análise de ciclo de vida exige a aquisição de uma grande quantidade de dados na realização da etapa de inventário. A realização da tese apresentou certa dificuldade associada ao levantamento e realização de estimativas devido a pouca disponibilidade de dados para o estudo de caso. Essa dificuldade foi contornada utilizando-se as metodologias do IPCC para inventário de emissões de gases de efeito estufa.

No capítulo 4, que trata do estudo de caso, foi realizada a etapa de inventário da ACV. O estudo de caso foi estruturado com base em uma UTE real, que está localizada próximo ao porto de Itaqui, no estado do Maranhão. Devido a não disponibilidade dos dados dos processos da UTE considerada no estudo, utilizou-se o *software* IECM para simulação dos processos da UTE. Vale ressaltar que a simulação realizada procurou seguir dados compatíveis com os dados da UTE, com o objetivo de simular uma planta semelhante à planta real. No entanto, isso não implica em que todos os valores e/ou as escolhas tecnológicas representem exatamente os valores ou equipamentos adotados na UTE. Os valores aqui simulados são compatíveis, porém, em busca do valor mais aproximado da planta real.

Os resultados obtidos do inventário foram utilizados para compreender e avaliar a redução em termos de CO₂ equivalente associada à quantidade de CO₂ capturado. Esta avaliação envolveu a correlação dos dados obtidos na etapa de inventário com impactos ambientais específicos, neste caso apenas impactos relativos às mudanças climáticas.

O capítulo 5 apresenta a etapa de interpretação de resultados, que foi baseada nas análises de contribuição e de perturbação.

O uso da tecnologia de captura de CO₂ reduz a eficiência térmica da usina, aumentando a emissão de CO₂ para a mesma energia gerada. Por esta razão, quando duas UTEs com a mesma tecnologia de geração de energia são comparadas, uma com captura e a outra sem captura, a quantidade de emissões evitadas pela UTE com captura é inferior ao montante capturado nas fronteiras da UTE.

A redução da eficiência térmica da UTE gera um aumento da emissão de CO₂ para a mesma energia gerada, ou seja, a massa de CO₂ por kWh. Por esta razão, a quantidade de emissões de CO₂ evitadas é inferior ao percentual de 90% que é capturado. Ao observarmos os valores do CO₂ emitido para o caso sem captura e para o caso com captura é possível estimar uma redução equivalente a 88%, que é inferior aos 90% da taxa de captura da planta.

Quando as emissões de todo o sistema, ou seja, as emissões de outras etapas envolvidas no funcionamento da UTE, são consideradas, a quantidade de CO₂ evitado é ainda menor. Há um aumento no consumo ou adição de produtos que serão utilizados pelo sistema. Essa alteração resulta em mais emissões para o ciclo de vida. Os resultados estimados nesta tese mostram que uma planta com percentual de captura de

90% do CO₂, na prática, está evitando aproximadamente 72% em CO₂ eq., quando utilizada a métrica GWP para o horizonte de 100 anos.

A análise de contribuição permitiu identificar o percentual de cada um dos gases de efeito estufa considerada no estudo em relação aos seus efeitos ao aquecimento global. Observou-se uma mudança no perfil de emissões entre o caso sem captura e o caso com captura. Houve um aumento significativo na participação das emissões de CH₄, enquanto que a participação do N₂O manteve-se não significativa. Assim, o efeito de redução no aquecimento global, que seria obtido com a captura das emissões de CO₂ na planta de captura é em parte anulado pelo aumento das emissões de CH₄, que ocorre de forma significativa na etapa de mineração de carvão.

A mudança de perfil também refletiu nos resultados dos multiplicadores obtidos na análise de perturbação. Os valores dos multiplicadores relacionados à produção de carvão aumentaram para o caso 2 em relação ao caso 1. Assim, a etapa de mineração, ou seja, o tipo de mineração (subterrânea ou de superfície), a técnica utilizada, a profundidade do leito carvão, terão grande influência no sistema estudado.

O impacto das emissões de CH₄ no perfil de emissões do sistema como um todo está relacionado com a métrica e principalmente com o horizonte de tempo utilizado. No caso do GWP, que foi a métrica utilizada na análise, a escolha do horizonte de tempo determina como os formuladores de políticas pesam os custos de curto e longo prazo e os benefícios de diferentes estratégias para combater as alterações climáticas.

Considerando o objetivo da UNFCCC de estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera em um nível que evite uma interferência antropogênica significativa no sistema do clima, fica evidente que as emissões de gases de efeito estufa precisam ser reduzidas no horizonte de décadas. Neste caso, seria prudente uma revisão do horizonte de tempo utilizado nas aplicações da métrica GWP. Geralmente é utilizado o horizonte de tempo de 100 anos, que é o horizonte de tempo adotado no Protocolo de Quioto.

O resultado obtido mostra que a aplicação de medidas de redução de CH₄ na etapa de mineração pode representar uma redução significativa para a redução do aquecimento global no curto prazo.¹⁴³

¹⁴³ O *Methane International Coal Mine Methane (CMM) Projects Database* é projetado para servir como repositório abrangente de dados e informações sobre projetos CMM de recuperação e projetos de uso do metano em operação e desenvolvimento no mundo (CMM, 2012). O CEPAC (Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono) iniciou em julho de 2009 um projeto de recuperação de metano na jazida de Charqueadas, situado em Porto Batista

Aqui vale ressaltar que medidas que visem à redução de CH₄ na mineração não serão eficazes em todos os casos porque, a liberação de CH₄ depende do tipo de mineração empregada no caso estudado. Por exemplo, na mineração de superfície, onde praticamente todo o CH₄ já foi liberado antes mesmo da mineração, a redução das emissões de CH₄ não será eficaz. Assim, o resultado obtido nesta tese não pode ser generalizado para todos os casos. Outra singularidade do caso estudado está relacionada com a rota escolhida para a captura. Apesar de a tecnologia escolhida para a UTE, que foi a queima a carvão pulverizado, representar a maioria das plantas nos EUA e no mundo, ainda existem outras tecnologias de queima. A rota de pós-captura, utilizando o solvente MEA, foi escolhida com base na tecnologia de queima da UTE e no estágio de desenvolvimento da rota. Para a configuração de pós-combustão existem outras opções de solventes que vêm sendo desenvolvidos e que geram uma menor penalidade para a UTE. No entanto, na simulação deste estudo optou-se pela absorção química com solvente MEA. Esta é a opção que resulta na maior penalidade energética, mas é a que está mais próxima de uma utilização comercial.

A tecnologia CCS pode representar um instrumento importante para permitir a redução significativa das emissões de gases de efeito estufa, especialmente para o caso de UTE's a carvão. A implementação dessa tecnologia deve, no entanto, considerar os custos extras. Em primeiro lugar os custos diretos ligados à instalação da planta de captura e em segundo lugar a necessidade de reposição da energia que não é mais disponibilizada para o *grid*.

A competitividade do CCS na matriz energética brasileira deve ser analisada em comparação a um portfólio mais amplo que englobe outras medidas de abatimento, por exemplo, outras tecnológicas de baixo carbono como UTEs a gás natural com CCS, usinas nucleares de terceira geração, UTEs de biomassa de segunda geração, UTEs de co-queima de carvão com biomassa, usinas solar-térmicas, fotovoltaicas, geradores eólicos e o uso de veículos híbridos elétricos acoplados a geração de energia elétrica. Uma análise desse tipo deve simular curvas de aprendizado tecnológico e competitividade das diferentes alternativas de baixo carbono em um modelo de

(Triunfo/RS). Trata-se de um projeto piloto de recuperação do metano contido na camada de carvão (CBM – *coal bed methane*) e recuperação avançada de metano com injeção de CO₂ (ECBM – *Enhanced Coal Methane*) (PUCRS/CEPAC, 2012).

otimização global.¹⁴⁴ O resultado da análise derivará do MESSAGE em termos de simulação da matriz energética nacional, conforme diferentes cenários tecnológicos. Também podem ser analisadas diferentes formas de incentivo e competição entre as tecnologias de geração (ex: leilão de baixo carbono, leilão específico, sinalização política, certificados negociáveis de carbono, etc). Os cenários tecnológicos do CCS podem ser baseados na captura pós-combustão através da absorção química e nas alternativas de desenvolvimento tecnológico, por exemplo, captura pós-combustão por membranas ou adsorção, etc.

Neste estudo a análise foi limitada a três gases que têm influência na categoria de aquecimento global. No entanto, o sistema estudado gera outros fluxos elementares para o meio ambiente, conseqüentemente gera impactos em outras categorias que não foram tratadas na tese. Por esse motivo, sugere-se que uma análise mais abrangente, com a inclusão de outros fluxos elementares, seja realizada em estudos futuros. A inclusão de outros impactos, por exemplo, o impacto na demanda de água e o impacto na geração de resíduos tóxicos, irá ajudar a avaliar outros efeitos e permitir o desenvolvimento de estratégias que levem em conta outros aspectos como, por exemplo, o aspecto social e o uso de recursos.

Propõe-se para estudos futuros a utilização da metodologia híbrida para a ACV, que procura combinar as vantagens da metodologia baseada na análise de processos e da metodologia Insumo-Produto. A metodologia híbrida possui um limite a montante (*upstream limit*) da fronteira do sistema mais completo em nível nacional, fornecido pela matriz Insumo-Produto, enquanto que o inventário baseado na análise de processo fornece informações mais precisas e detalhadas, com os dados relativamente mais recentes.

Propõe-se para estudos futuros a análise das opções de geração de energia para fornecer a parcela de energia que passa a ser utilizada pela planta de captura. A utilização do CCS implicará devido à penalidade energética imposta a UTE, em uma redução na energia disponibilizada pela UTE ao *grid* com a mesma massa de combustível utilizada. Assim os sistemas com CCS devem ser avaliados no contexto mais amplo, onde devem ser consideradas as outras opções para o fornecimento dessa energia que foi redirecionada para a planta de captura. Nesse contexto, podem ser

¹⁴⁴ Por exemplo, pode ser aplicado o MESSAGE Brasil, que foi desenvolvido no PPE, e cuja versão inicial do PPE foi adotada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030.

consideradas outras tecnologias para o fornecimento de energia, incluindo fontes renováveis. Esta avaliação seria ainda mais detalhada se a ACV incluísse os custos nos processos. Considerando-se os custos das opções tecnológicas, em uma escolha comparativa com outras tecnologias, o custo do CCS não deveria ser maior que o custo das outras opções tecnológicas.

Sugere-se também a inclusão de uma análise detalhada sobre o armazenamento do CO₂, com a comparação entre as opções de transporte e de armazenamento, incluindo a análise da opção de recuperação avançada de gás ou óleo para a etapa de armazenamento de CO₂.

Finalmente, propõe-se para estudos futuros a análise mais detalhada da influência do horizonte de tempo nas aplicações da métrica GWP. Este estudo apenas discute a importância da utilização de um GWP dinâmico que já foi tratado por outros autores, por exemplo, nos estudos de ROSA; SCHAEFFER (1995), PETERS *et al.* (2011) e LEVASSEUR *et al.* (2010). Em estudos futuros o GWP dinâmico deve ser utilizado, permitindo um cálculo mais preciso da contribuição das emissões de gases de efeito estufa para as mudanças climáticas.

7 Referências Bibliográficas

ABICLOR. **Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados**. Disponível em: <www.abiclor.com.br>.

ADVANCED BIOFUELS USA. **Articles tagged with: life cycle analysis**. Disponível em: <<http://advancedbiofuelsusa.info/tag/life-cycle-analysis>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

ALTHAUS, H.; CHUDACOFF, M.; HISCHIER, R. *et al.* **Life Cycle Inventories of Chemicals**. . Dübendorf, CH: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. , 2007

ANEEL. **Banco de Informações de Geração - BIG**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/15.htm>>. Acesso em: 1 nov. 2011.

ANTF. **Notícias - Minas ressurge como polo produtor de locomotivas**. Disponível em: <<http://www.antf.org.br/index.php/noticias/2649-minas-ressurge-como-polo-produtor-de-locomotivas>>. Acesso em: 30 nov. 2011.

ASPELUND, A.; JORDAL, K. Gas conditioning—The interface between CO₂ capture and transport. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 1, n. 3, p. 343–354, jul 2007.

BASTOS, J. B. V. **Avaliação de Mecanismos de Incentivo a Cogeração de Energia a partir de Bagaço da Cana de Açúcar em uma Planta Química Brasileira de Soda-Cloro**. . Rio de Janeiro, Brasil: Programa de Pós- Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro - EQ/UFRJ. , 2011

BC AIR QUALITY. **Marine Emissions**. Disponível em: <<http://www.bcairquality.ca/topics/marine-emissions.html>>. Acesso em: 11 nov. 2011.

BENOIST, A.; DRON, D.; ZOUGHAIB, A. Origins of the debate on the life-cycle greenhouse gas emissions and energy consumption of first-generation biofuels – A sensitivity analysis approach. **Biomass and Bioenergy**, n. article in press, 2012.

BLM. **Bureau of Land management - Archived Documents**. Disponível em: <http://www.blm.gov/co/st/en/BLM_Programs/land_use_planning/rmp/red_cliff_mine/documents.html>. Acesso em: 21 dez. 2011.

BLOMEN, E.; HENDRIKS, C.; NEELE, F. Capture technologies: Improvements and promising developments. **Energy Procedia**, v. 1, n. 1, p. 1505–1512, fev 2009.

BROEK, M. VAN DEN; HOEFNAGELS, R.; RUBIN, EDWARD; TURKENBURG, W.; FAAIJ, A. Effects of technological learning on future cost and performance of power plants with CO₂ capture. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 6, p. 457–480, dez 2009.

CBES. Land-Use Change and Bioenergy: Report from the 2009 workshop. . Tennessee, USA: U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and Oak Ridge National Laboratory, Center for Bioenergy Sustainability. Disponível em: <http://www.ornl.gov/sci/ees/cbes/workshops/LandUse_Report.pdf>. , 2009

CIFERNO, J.; FOUT, TIMOTHY; MURPHY, J. T.; JONES, A. P. **DOE/NETL's Carbon Capture R&D Program for Existing Coal-Fired Power Plants.** . [S.l.]: DOE/NETL. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/ewr/co2/pubs/EPEC%20CO2%20capture%20program%20overview%20feb09.pdf>>. , 2009

CML. **CML-IA Characterisation Factors.** Disponível em: <<http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>>. Acesso em: 20 out. 2011.

CMM. **The Global Methane International Coal Mine Methane (CMM) Projects Database.** Disponível em: <<http://www2.ergweb.com/cmm/index.aspx>>. Acesso em: 26 fev. 2012.

CMU. **Integrated Environmental Control Model (IECM).** Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University (CMU), 2011.

COOPER, D.; GUSTAFSSON, T. **Methodology for calculating emissions from ships.** , Report series for SMED and SMED & SLU. Norrköping, Sweden: SMHI Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Disponível em: <<http://www.westcoastcollaborative.org/files/sector-marine/SMED%20Methodology%20for%20Calculating%20Emissions%20from%20Ships.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2011. , 2004

COSTA, I. V. L. DA. **Análise do Potencial Técnico do Sequestro Geológico de CO2 no Setor Petróleo no Brasil.** Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

CREYTS, J.; DERKACH, A.; NYQUIST, S.; OSTROWSKI, K.; JACK STEPHENSON. **Reducing US Greenhouse Gas Emissions: How much at what cost?** , US Greenhouse Gas Abatement Mapping Initiative. [S.l.]: Mc Kinsey & Company. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/client-service/sustainability/greenhousegas.asp>>. Acesso em: 21 set. 2010. , dez 2007

CRPM. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil : Texto, Mapas e SIG.** Brasília: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2003.

DNV. **Global Technology Roadmap for CCS in Industry - Sectoral Assessment: Refineries.** . London, UK: Det Norske Veritas. Disponível em: <http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Energy_and_Climate_Change/Energy_Efficiency/CCS/Refineries3.pdf>. Acesso em: 10 set. 2011. , 2010

DRAUKER, L. C.; JAMES, R. J.; SKONE, T. J.; BROMILEY, R. **Life Cycle Analysis: Existing Pulverized Coal (EXPC) Power Plant.** . [S.l.]: NETL - National Energy Technology Laboratory. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/refshelf/PubDetails.aspx?Action=View&PubId=351>>. , 2010

EKVALL, TOMAS; FINNVEDEN, G. Allocation in ISO 14041 - a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 3, p. 197–208, jun 2001.

EPA. **AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors**. , Stationary Point and Area Sources. [S.l.]: U.S. Environmental Protection Agency. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s17.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2011. , 1995

EPA. **Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases - SECTION II — ENERGY**. . Washington, DC 20460: U.S. Environmental Protection Agency. Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/economics/downloads/GM_SectionII_Energy.pdf>. Acesso em: 10 out. 2011. , 2006

EPA. **Module 6: Air Pollutants and Control Techniques - Particulate Matter - Control Techniques | Basic Concepts in Environmental Sciences | APTI | USEPA**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/apti/bces/module6/matter/control/control.htm>>. Acesso em: 26 ago. 2010.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia - 2020**. . Rio de Janeiro, Brasil: Empresa de Pesquisa Energética – EPE. , 2012

EUROPEAN COMMISSION. **ILCD Handbook: Framework and requirements for LCIA models and indicators**. 1. ed. Italy: Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

FEELEY III, T. J.; SKONE, T. J.; STIEGEL JR., G. J. *et al.* Water: A critical resource in the thermoelectric power industry. **Energy**, v. 33, n. 1, p. 1–11, jan 2008.

FERON, P. H. M. Exploring the potential for improvement of the energy performance of coal fired power plants with post-combustion capture of carbon dioxide. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 2, p. 152–160, mar 2010.

FIGUEROA, J.; FOUT, T; PLASYNSKI, S.; MCILVRIED, H.; SRIVASTAVA, R. Advances in CO2 capture technology—The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program☆. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 2, n. 1, p. 9–20, jan 2008.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, TOMAS; *et al.* Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, out 2009.

FRIEDLINGSTEIN, P. A Natural Carbon Cycle View of Global Warming Potentials. **IPCC Expert Meeting on the Science of Alternative Metrics - Meeting Report**. Bern, Switzerland: IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, 2009. .

GIAN-KASPER, P.; STOCKER, T.; MIDGLEY, P.; TIGNOR, M. **IPCC Expert Meeting on the Science of Alternative Metrics**. . Bern, Switzerland: IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-metrics-oslo.pdf>>. Acesso

em: 10 out. 2011. , 2009

GODAL, O.; FUGLESTVEDT, J. Testing 100-Year Global Warming Potentials: Impacts on Compliance Costs and Abatement Profile. **Climatic Change**, n. 52, p. 93–127, 2002.

GOOGLEMAPS. **GoogleMaps**. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl>>. Acesso em: 15 nov. 2011.

GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; GORRÉE, M. *et al.* **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2002.

HAYHOE, K.; JAIN, A.; KHESHGI, H.; WUEBBLES, D. **Contribution of CH₄ to Multi-Gas Reduction Targets - The Impact of Atmospheric Chemistry on GWPs**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.

HEIJUNGS, R. **Chain Management by Life Cycle Assessment - Short manual - CMLCA 4.0**. . [S.l.]: Centre of Environmental Science - Leiden University. , 2003

HEIJUNGS, R. **CMLCA user`s manual**. . Acesso em: 19 fev. 2012.

HEIJUNGS, R.; KLEIJN, R. Numerical approaches towards life cycle interpretation five examples. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 6, p. 141–148, maio 2001.

HERTWICH, E. G.; AABERG, M.; SINGH, B.; STRØMMAN, A. H. Life-cycle Assessment of Carbon Dioxide Capture for Enhanced Oil Recovery. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 16, n. 3, p. 343–353, jun 2008.

HERZOG, H. **Capture Technologies for Retrofits**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://web.mit.edu/mitei/>>. Acesso em: 10 maio. 2011. , 2009

HOFFMANN, B. S. **O Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO₂: uma Solução para Mitigar as Emissões de CO₂ em Termelétricas a Carvão em Larga Escala no Curto Prazo?** Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

IBAMA. **Análise dos Estudos Ambientais (EIA/RIMA e EAR) - Usina Termelétrica Porto do Itaqui**. . Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/licenciamento/index.php>>. Acesso em: 9 jul. 2011. , 2008

IBGE. **Matriz de insumo-produto Brasil - Série Relatórios Metodológicos - Volume 18**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1997.

IEA. **Capturing CO₂**. . Cheltenham, UK: IEA Greenhouse Gas R&D Programme. Disponível em: <http://www.ieaghg.org/docs/general_publications/cocapture.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2011. , 2007

IEA. **Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios & Strategies to 2050**. . France: International Energy Agency. , 2008

IEA. **Power Generation from Coal - Measuring and Reporting Efficiency Performance and CO2 Emissions**. . Paris, France: International Energy Agency. Disponível em: <http://www.iea.org/papers/2010/power_generation_from_coal.pdf>. Acesso em: 8 set. 2011a. , 2010

IEA. **IEA Clean Coal Centre | Clean Coal Technologies**. Disponível em: <<http://www.iea-coal.org.uk/site/ieacoal/databases/clean-coal-technologies>>. Acesso em: 26 ago. 2010b.

IEA. **Monthly Electricity Statistics**. . Paris, France: International Energy Agency. Disponível em: <<http://www.iea.org/stats/surveys/mes.pdf>>. Acesso em: 5 jan. 2012. , nov 2011

IJIMA, M. **CO2 Recovery from Flue Gas Using Hindered Amines**. . Dhahran, Saudi Arabia Dhahran, Saudi Arabia: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.co2management.org/>>. Acesso em: 29 maio. 2010. , 2006

ILCD. **ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First Edition ed. Luxembourg: European Commission, 2010a.

ILCD. **ILCD Handbook: Framework and requirements for LCIA models and indicators**. First Edition ed. Luxembourg: European Commission, 2010b.

ILCD. **ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment**. First Edition ed. Luxembourg: European Commission, 2010c.

IPCC. CH4 Emissions: Coal Mining and Handling. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 1996.

IPCC. **IPCC special report on carbon dioxide capture and storage**. Cambridge: Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 3: Mobile Combustion. v. Volume 2: Energy, 2006a.

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 2: Mineral Industry Emissions. v. Volume 3: Energy, 2006b.

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 2: Stationary Combustion. v. Volume 2: Energy, 2006c.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm>. , 2007

IPCC. **IPCC Data Distribution Centre**. Disponível em: <<http://www.ipcc-data.org/>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

IPECE. **Panorama Geral do Setor Mineral Cearense - Nota técnica 09**. . [S.l.]: Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). Disponível em: <http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/notas_tecnicas/NT_9.pdf>. , 2004

IRENE, S. CO₂ and climatic change: An overview of the science. **Energy Conversion and Management**, v. 34, n. 9–11, p. 729–735, nov 1993.

ISO14040. **Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Standard ISO 14040**. . [S.l.]: International Organization for Standardization - ISO. Disponível em: <http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=37456>. Acesso em: 18 jun. 2010. , 1997

JAMES, R. J.; SKONE, T. J.; DRAUKER, L. C.; BROMILEY, R. **Life Cycle Analysis: Supercritical Pulverized Coal (SCPC) Power Plant**. . [S.l.]: NETL - National Energy Technology Laboratory. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/refshelf/PubDetails.aspx?Action=View&PubId=354>>. Acesso em: 16 maio. 2011. , 2010

JOHANSSON, D. J. A. Economics vs. Physical-based Metrics for Relative Greenhouse Gas Valuations. **Working Papers in Economics**, n. 363, 2009.

KANNICHE, M.; GROS-BONNIVARD, R.; JAUD, P. *et al.* Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 1, p. 53–62, jan 2010.

KARLSEN, A. W.; TEWALT, S. J.; BRAGG, L. J.; FINKELMAN, R. B. **The World Coal Quality Inventory: South America**. . USA: U.S. Geological Survey. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/of/2006/1241/>>. , 2066

KENDALL, A.; CHANG, B. Estimating life cycle greenhouse gas emissions from corn–ethanol: a critical review of current U.S. practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 13, p. 1175–1182, set 2009.

KIRCHGESSNER, D. A.; PICCOT, S. D.; MASEMORE, S. S. An improved inventory of methane emissions from coal mining in the United States. **Journal of the Air & Waste Management Association (1995)**, v. 50, n. 11, p. 1904–1919, nov 2000.

KOORNNEEF, J.; KEULEN, T. VAN; FAAIJ, A.; TURKENBURG, W. Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 2, n. 4, p. 448–467, out 2008.

LEIDEN UNIVERSITY. **Institute of Environmental Sciences (CML)**. Disponível em: <<http://www.cml.leiden.edu/software/>>. Acesso em: 19 fev. 2012.

LENZEN, M. Errors in Conventional and Input-Output-based Life-Cycle Inventories. **Journal of Industrial Ecology**, v. 4, n. 4, p. 127–148, 2001.

LENZEN, M.; DEY, C. Truncation error in embodied energy analyses of basic iron and steel products. **Energy**, v. 25, n. 6, p. 577–585, jun 2000.

LENZEN, M.; TRELOAR, G. Differential Convergence of Life-Cycle Inventories toward Upstream Production Layers - Implications for Life-Cycle Assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 3-4, 2003.

LEVASSEUR, A.; LESAGE, P.; MARGNI, M.; DESCHÊNES, L.; SAMSON, R. Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. **Environ. Sci. Technol.**, v. 44, n. 8, p. 3169–3174, 2010.

LIU, H.; GALLAGHER, K. S. Catalyzing strategic transformation to a low-carbon economy: A CCS roadmap for China. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 59–74, jan 2010.

LUZ, A. B. DA; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações - Cap 16 - Calcário e Dolomito**. 2. ed. Rio de Janeiro, Brasil: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2009.

MCKINSEY&COMPANY. **Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil**. . [S.l.]: McKinsey&Company. Disponível em: <http://www.mckinsey.com.br/sao_paulo/carbono.pdf>. , 2009

MELAMU, R.; BLOTTNITZ, H. VON. 2nd Generation biofuels a sure bet? A life cycle assessment of how things could go wrong. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 2–3, p. 138–144, jan 2011.

MILLER, J. W.; AGRAWAL, H.; WELCH, B. **Measurement of Emissions from the Main Propulsion Engine (MAN B&W 11K90MC-C) on a Panamax Class Container Ship**. . Riverside, CA: University of California Riverside. Disponível em: <http://www.arb.ca.gov/ports/marinevess/documents/emissionstest/panamax%20main%2009_2006%20final.pdf>. Acesso em: 1 out. 2011. , 2009

MINEROPAR. **Programa de Desenvolvimento da Indústria Mineral Paranaense**. . Curitiba, Brazil: MINEROPAR - Minerais do Paraná S.A. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/relatorios_concluidos/05_relatorios_concluidos.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2011. , 1999

MIT. **The future of coal options for a carbon-constrained world**. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2007.

MME. **Perfil do Calcário**. , Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral. [S.l.]: Ministério de Minas e Energia. , 2009

MPX. **Plano de Negócios MPX Colombia**. . [S.l.]: RI - Relações com Investidores MPX. Disponível em: <<http://www.guiainvest.com.br/comunicado/arquivo/96512.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2011. , 2010

MPX. **RI - Portfólio de Projetos MPX**. Disponível em:

<<http://ri.mpx.com.br>>. Acesso em: 15 out. 2011a.

MPX. **MPX. infoinvest.** Disponível em: <http://mpx.infoinvest.com.br/ptb/1212/2010%204T%20Release%20de%20Resultados%20_port_vfinal.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2011b.

MPX. **Railway in Colombia.** Disponível em: <<http://www.mpx.com.br/en/our-businesses/logistics/Paginas/railway-in-colombia.aspx>>. Acesso em: 27 jun. 2011c.

MPX. **Geração de Energia.** Disponível em: <<http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 10 nov. 2011d.

NBR/ISO 14040. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** . [S.l.]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=40200>>. , 2001

NETL. **Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants, Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity.** . [S.l: s.n.]. , ago 2007

NSAKALA, N. YA; MARION, J.; BOZZUTO, C. *et al.* **Engineering feasibility of CO₂ capture on an Existing us coal-fired power plant.** . Washington DC, USA: [s.n.]. , 2001

NSC. **A Life-Cycle Inventory of Limestone Dimension Stone Quarrying and Processing.** . [S.l.]: The Natural Stone Council - NSC. Disponível em: <http://isse.utk.edu/ccp/projects/naturalstone/pdfs/Limestone_LCIv2.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2011. , 2009

NTEL. **Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity.** . United States: National Energy Technology Laboratory. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/BitBase_FinRep_Rev2.pdf>. , 2010

O'BRIEN, T. **HandBook of Chlor-Alkali Technology.** USA: Springer Science, 2005.

ODEH, N. A.; COCKERILL, T. T. Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. **Energy Policy**, v. 36, n. 1, p. 367–380, jan 2008.

OGX. **Bacia do Parnaíba.** Disponível em: <<http://www.ogx.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=81&lng=br>>. Acesso em: 12 nov. 2011a.

OGX. **Bacia do Pará-Maranhão.** Disponível em: <<http://www.ogx.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=28&lng=br>>. Acesso em: 12 nov. 2011b.

OLAJIRE, A. A. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications - A review. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2610–2628, jun 2010a.

OLAJIRE, A. A. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications - A review. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2610–2628, jun 2010b.

PAGE, S. C.; WILLIAMSON, A. G.; MASON, I. G. Carbon capture and storage: Fundamental thermodynamics and current technology. **Energy Policy**, v. 37, n. 9, p. 3314–3324, set 2009.

PARSONS, E. L.; SHELTON, W. W.; LYONS, J. L. **Advanced Fossil Power Systems Comparison Study**. . [S.l.]: National Energy Technology Laboratory (NETL). Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/publications/others/techrpts/AdvFossilPowerSysCompStudy.pdf>>. , 2002

PEHNT, M.; HENKEL, J. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 3, n. 1, p. 49–66, jan 2009.

PELLEGRINI, G.; STRUBE, R.; MANFRIDA, G. Comparative study of chemical absorbents in postcombustion CO₂ capture. **Energy**, v. 35, n. 2, p. 851–857, fev 2010.

PEREIRA, L. DOS S.; FERREIRA, G. E. A Indústria da Cal no Brasil. **XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM**, 2009.

PETERS, G. P.; AAMAAS, B.; T. LUND, M.; SOLLI, C.; FUGLESTVEDT, J. S. Alternative “Global Warming” Metrics in Life Cycle Assessment: A Case Study with Existing Transportation Data. **Environ. Sci. Technol.**, v. 45, n. 20, p. 8633–8641, 2011.

PORTWORLD. **Distance Calculation**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.portworld.com/map/>>. Acesso em: 15 nov. 2011. , 2011

PUCRS/CEPAC. **PUCRS | CEPAC - Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação sobre Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono**. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/cepac/index.php>>. Acesso em: 2 mar. 2012.

RAO, A. B. **A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control**. . [S.l: s.n.]. . Acesso em: 29 mar. 2010. , 15 out 2002

RAO, A. B.; RUBIN, E. S. A Technical, Economic, and Environmental Assessment of Amine-Based CO₂ Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 20, p. 4467–4475, 1 out 2002.

RAVAGNANI, A. T. F. S. G.; LIGERO, E. L.; SUSLICK, S. B. CO₂ sequestration through enhanced oil recovery in a mature oil field. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 65, n. 3–4, p. 129–138, abr 2009.

RAYNAL, L.; BOUILLON, P.-A.; GOMEZ, A.; BROUTIN, P. From MEA to demixing solvents and future steps, a roadmap for lowering the cost of post-combustion carbon capture. **Chemical Engineering Journal**, v. 171, n. 3, p. 742–752, 15 jul 2011.

REBITZER, G; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R. *et al.* Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, jul 2004.

REBITZER, GERALD; BUXMANN, K. The role and implementation of LCA within life cycle management at Alcan. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 13-14, p. 1327–1335, 2005.

REDDY, S.; JOHNSON, D.; GILMARTIN, J. **Fluor's Econamine FG PlusSM Technology For CO2 Capture at Coal-fired Power Plants**. . Baltimore, USA: [s.n.], 25 abr 2008

REISINGER, A.; MEINSHAUSEN, M.; MANNING, M.; BODEKER, G. Uncertainties of global warming metrics: CO2 and CH4. **Geophysical Research Letters**, v. 37, p. 6 PP., 30 jul 2010.

RIAHI, K; BARRETO, L.; RAO, S.; RUBIN, E. Towards fossil-based electricity systems with integrated CO2 capture Implications of an illustrative long-term technology policy. **Greenhouse Gas Control Technologies 7**. [S.l.]: Elsevier, 2005. v. 1p. 921–929.

RIAHI, KEYWAN; RUBIN, E. S.; TAYLOR, M. R.; SCHRATTENHOLZER, L.; HOUNSHELL, D. Technological learning for carbon capture and sequestration technologies. **Energy Economics**, v. 26, p. 539–564, jul 2004.

ROCHEDO, P. R. R. **Análise Econômica sob Incerteza da Captura de Carbono em Termoeletricas a Carvão: Retrofitting e Capture-ready**. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. S. **Minimum Work of Separation and Learning Curves for Carbon Capture based on Chemical Absorption**. 7th Conference on Sustainable Development of Energy. **Anais... SDEWES**, Ohrid, Macedonia: [s.n.], 2012

ROCKETT, G. C.; MACHADO, C. X.; KETZER, J. M. M.; CENTENO, C. I. The CARBMAP project: Matching CO2 sources and geological sinks in Brazil using geographic information system. **Energy Procedia**, v. 4, p. 2764–2771, 2011.

ROSA, L. P.; SCHAEFFER, R. Global warming potentials: The case of emissions from dams. **Energy Policy**, v. 23, n. 2, p. 149–158, fev 1995.

RUBIN, E. S.; CHEN, C.; RAO, A. B. Cost and performance of fossil fuel power plants with CO2 capture and storage. **Energy Policy**, v. 35, n. 9, p. 4444–4454, set 2007.

SAMPAIO, A. **Tecnologia nacional para extrair petróleo e gás do pré-sal**. Disponível em: <<http://www.dicyt.com/noticia/tecnologia-nacional-para-extrair-petroleo-e-gas-do-pre-sal>>. Acesso em: 22 jan. 2011.

SAUR, K. Life cycle interpretation — a brand new perspective? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 2, n. 1, p. 8–10, mar 1997.

SCHREIBER, A.; ZAPP, P.; KUCKSHINRICHS, W. Environmental assessment of German electricity generation from coal-fired power plants with amine-based carbon capture. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, p. 547–559, 4 jun 2009.

SEARATES. **Port distance.** Disponível em: <<http://www.searates.com/reference/portdistance/?fcity1=32&fcity2=20994&speed=14&ccode=1204>>. Acesso em: 12 out. 2011.

SIB. **Life Cycle Impact Assessment (LCIA) - End Points Versus Mid Points.** Disponível em: <http://www.scienceinthebox.com/en_UK/sustainability/lcia_en.html>. Acesso em: 30 nov. 2011.

SINDIPESA. **Tara, pesos brutos totais máximos e capacidade de carga útil das principais configurações utilizadas no transporte de cargas indivisíveis.** Disponível em: <<http://www.guiadotrc.com.br/lei/tabequip.asp>>. Acesso em: 12 nov. 2011.

SNIEC. **Emissões Fugitivas da Mineração e do Tratamento de carvão Mineral.** . Rio de Janeiro, Brazil.: Sindicato Nacional da Indústria de Extração de Carvão Mineral. Disponível em: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/publicacoes/relatorios_referencias/setor_energetico/4.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2011. , 2006

SOCOLOW, R.; PACALA, S. A Plan to Keep Carbon in Check. **Scientific American**, v. 295, n. 3, p. 50 – 57, 2006.

SOVACOOOL, B. K. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2950–2963, ago 2008.

SPATH, P. L.; MANN, M. K.; KERR, D. R. **Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production.** . USA: NREL. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25119.pdf>>. , 1999

SPLUNG. **Phases of Matter.** Disponível em: <<http://www.splung.com/content/sid/6/page/phasesofmatter>>. Acesso em: 26 ago. 2010.

SPRENG, D. **Net Energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems:** [S.l.]: Praeger Publishers, 1988.

SPRENG, D.; MARLAND, G.; WEINBERG, A. M. CO2 capture and storage: Another Faustian Bargain? **Energy Policy**, v. 35, n. 2, p. 850–854, fev 2007.

STAUDINGER. **T-s-Diagram.** Disponível em: <http://de.academic.ru/pictures/dewiki/84/T-s-Dia_Staudinger_.JPG>. Acesso em: 26 ago. 2010.

STRAZISAR, B. R.; ANDERSON, R. R.; WHITE, C. M. **Degradation of Monoethanolamine Used in Carbon Dioxide Capture from Flue Gas of a Coal-fired Electric Power Generating Station.** . [S.l.]: NETL - National Energy Technology Laboratory - Clean Air Technology Division. Disponível em:

<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/4b3.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2011. , 2001

STRAZISAR, B. R.; ANDERSON, R. R.; WHITE, C. M. Degradation Pathways for Monoethanolamine in a CO₂ Capture Facility. **Energy & Fuels**, v. 17, n. 4, p. 1034–1039, 1 jul 2003.

SUH, S.; HUPPES, G. Methods for Life Cycle Inventory of a product. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 7, p. 687–697, jun 2005.

THITAKAMOL, B.; VEAWAB, A.; AROONWILAS, A. Environmental impacts of absorption-based CO₂ capture unit for post-combustion treatment of flue gas from coal-fired power plant. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 1, n. 3, p. 318–342, jul 2007.

TILLMAN, A.-M. Significance of decision-making for LCA methodology. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 1, p. 113–123, 2000.

TROZZI, C.; VACCARO, R. **Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Ships**. , The MEET project. Roma, Italy: Institut Français des Sciences et Technologies des Transports. Disponível em: <<http://www.inrets.fr/ur/te/cost319/MEETdeliverable19.PDF>>. Acesso em: 5 nov. 2011. , 1998

ULTRAPAR. **ULTRAPAR HOLDINGS INC - FORM 20-F**. . Washington, D.C., U.S.A: US Securities and Exchange Commission. Disponível em: <http://www.ultra.com.br/arq/126/arq_126_11651.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2011. , 2011

UNFCCC. **Durban Climate Change Conference - November 2011**. Disponível em: <http://unfccc.int/meetings/durban_nov_2011/meeting/6245/php/view/schedule.php>. Acesso em: 5 mar. 2012.

UNFCCC. **Modalities and procedures for carbon dioxide capture and storage in geological formations as clean development mechanism project activities**. . [S.l.]: United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: <http://unfccc.int/files/meetings/durban_nov_2011/decisions/application/pdf/cmp7_carbon_storage_.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2012. , 2011

VELTMAN, K.; SINGH, B.; HERTWICH, E. G. Human and Environmental Impact Assessment of Postcombustion CO₂ Capture Focusing on Emissions from Amine-Based Scrubbing Solvents to Air. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 4, p. 1496–1502, fev 2010.

WCA. **World Coal Association - Coal Mining & the Environment**. Disponível em: <<http://www.worldcoal.org/coal-the-environment/coal-mining-the-environment/>>. Acesso em: 15 nov. 2011.

WEIDEMA, B. P.; EKVALL, TOMAS; HEIJUNGS, R. **Guidelines for application of deepened and broadened LCA**. , Co-ordination Action for innovation

in Life-Cycle Analysis for Sustainability - CALCAS. [S.l.]: ENEA, The Italian National Agency on new Technologies, Energy and the Environment. Disponível em: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/calcas_report_d18.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2011. , 2009

WNA. **Nuclear Energy and Climate Change**. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/climatechange/>>. Acesso em: 28 fev. 2012.

ANEXO A – Resultados das simulações no IECM

O Anexo A apresenta a principais telas do IECM, com os dados e resultados mais relevantes utilizados nas simulações do caso 1 e caso 2.

CASO 1 – UTE sem CCS

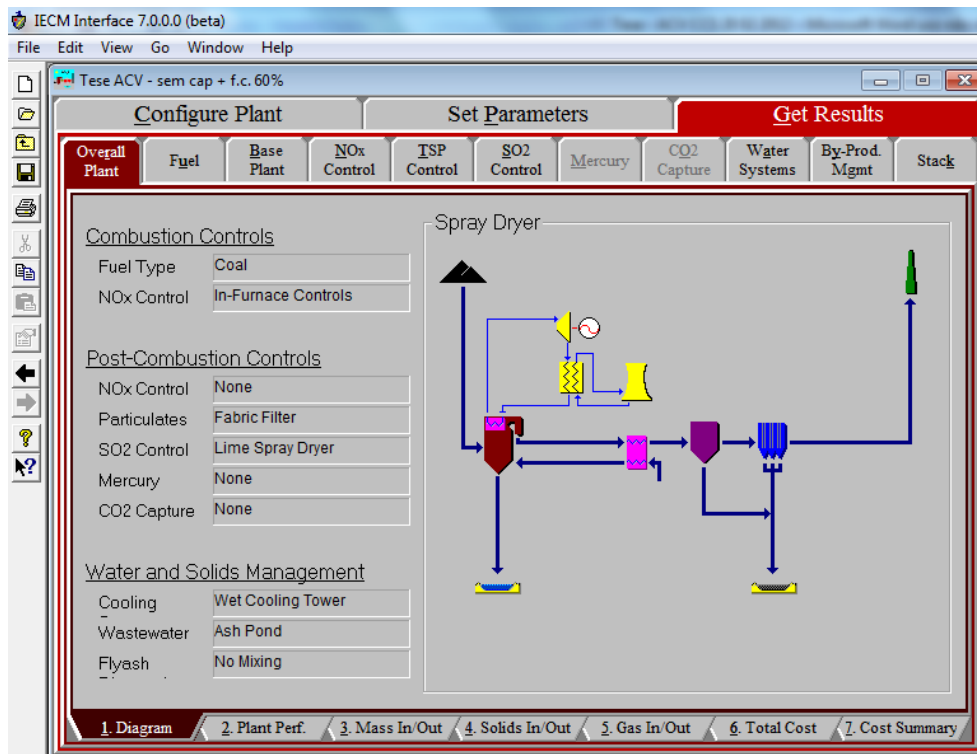


Figura 17 - Configuração da UTE - caso 1
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

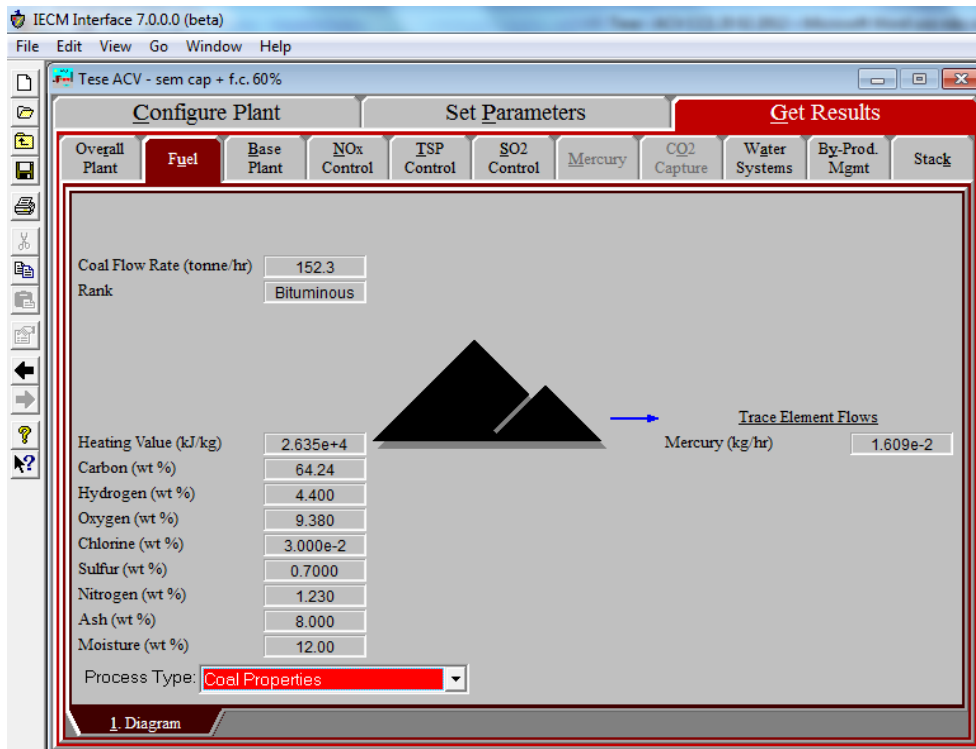


Figura 18 – Dados do carvão - caso 1
 Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

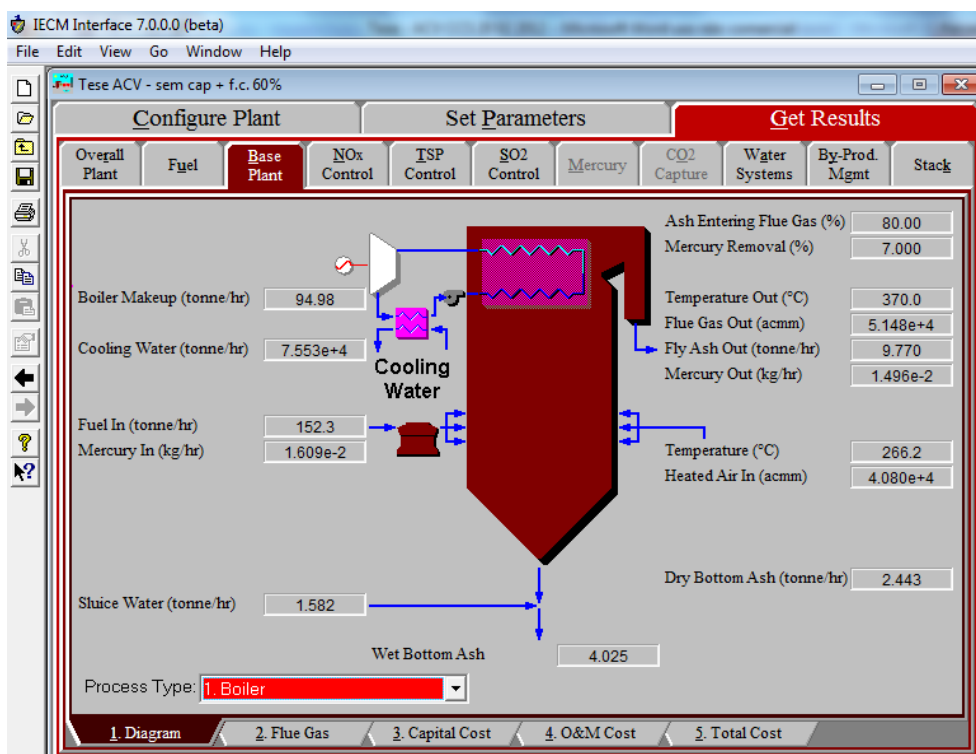


Figura 19 – Dados da caldeira - caso 1
 Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

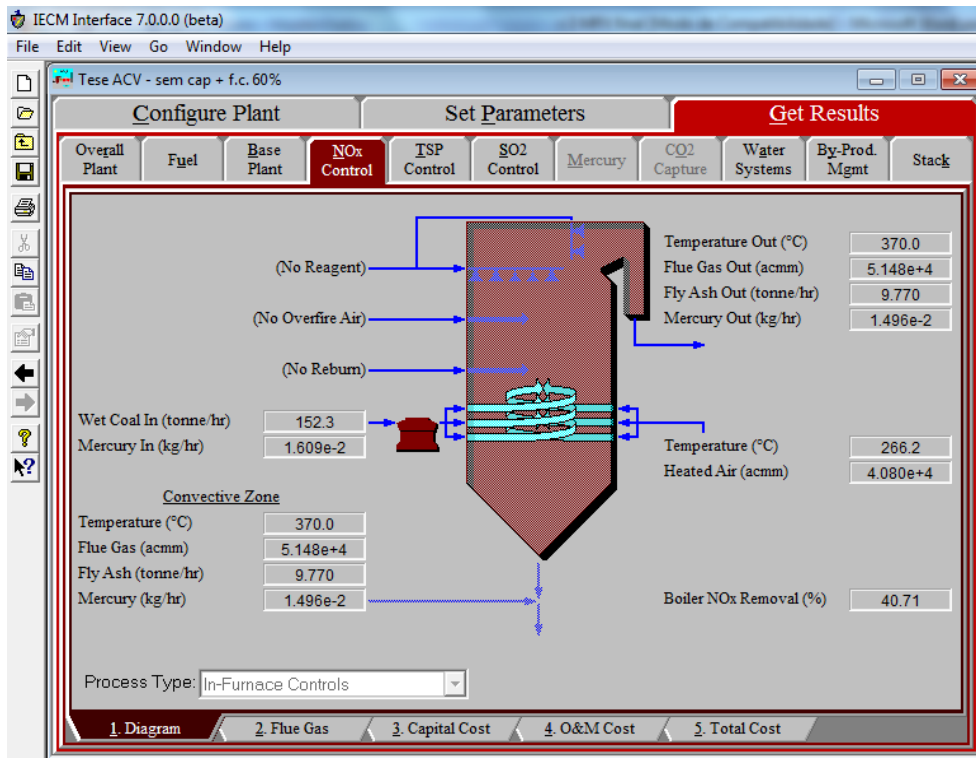


Figura 20 – Sistema do controle de NOx - caso 1
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

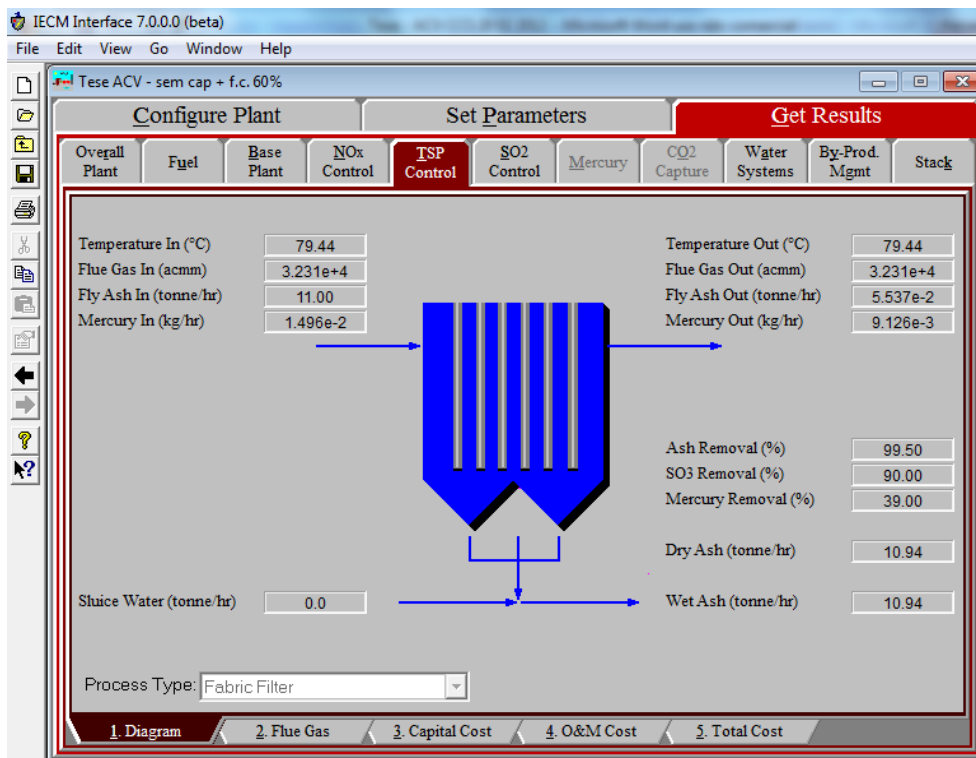


Figura 21 – Sistema do controle de material particulado - caso 1
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

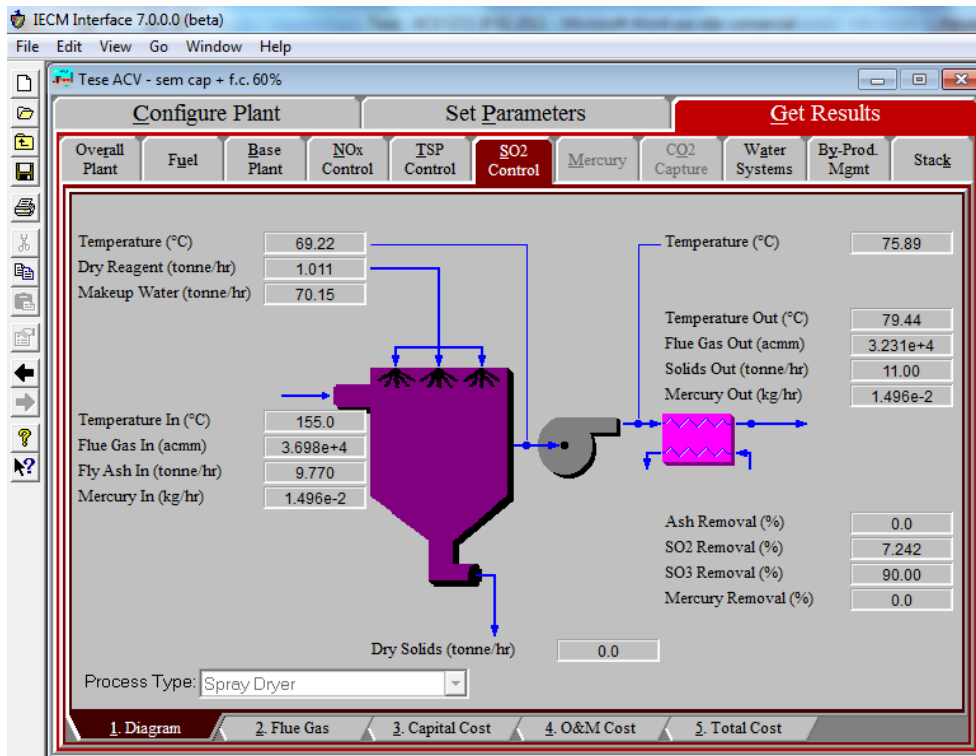


Figura 22 – Sistema do controle de SO₂ para - caso 1
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

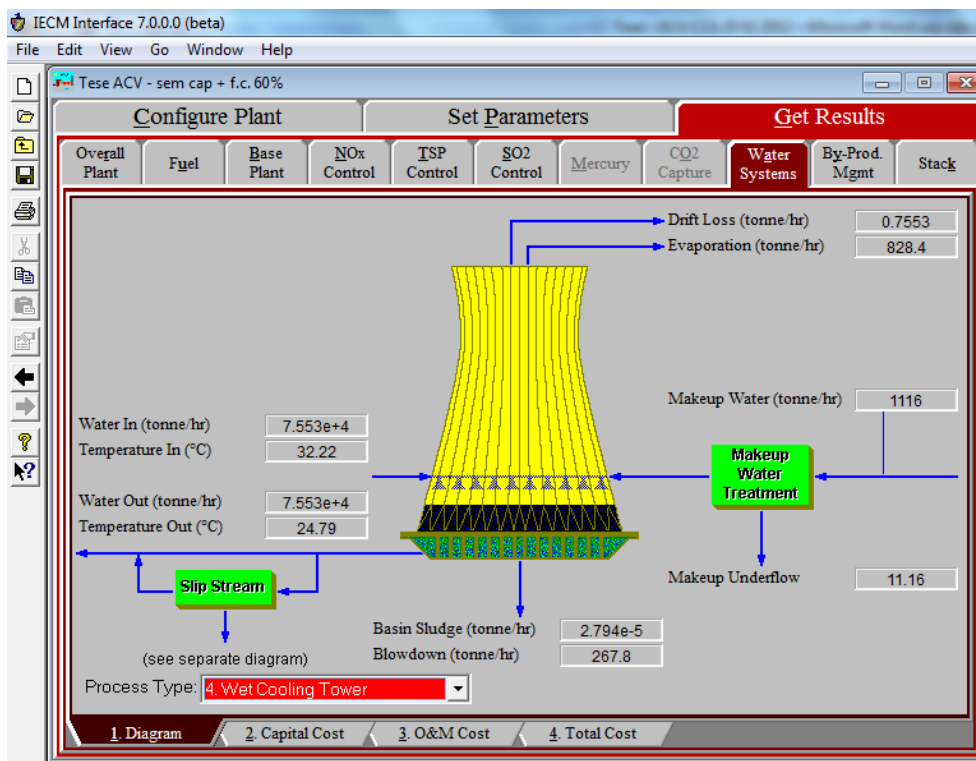


Figura 23 – Sistema de arrefecimento - caso 1
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

CASO 2 – UTE com CCS

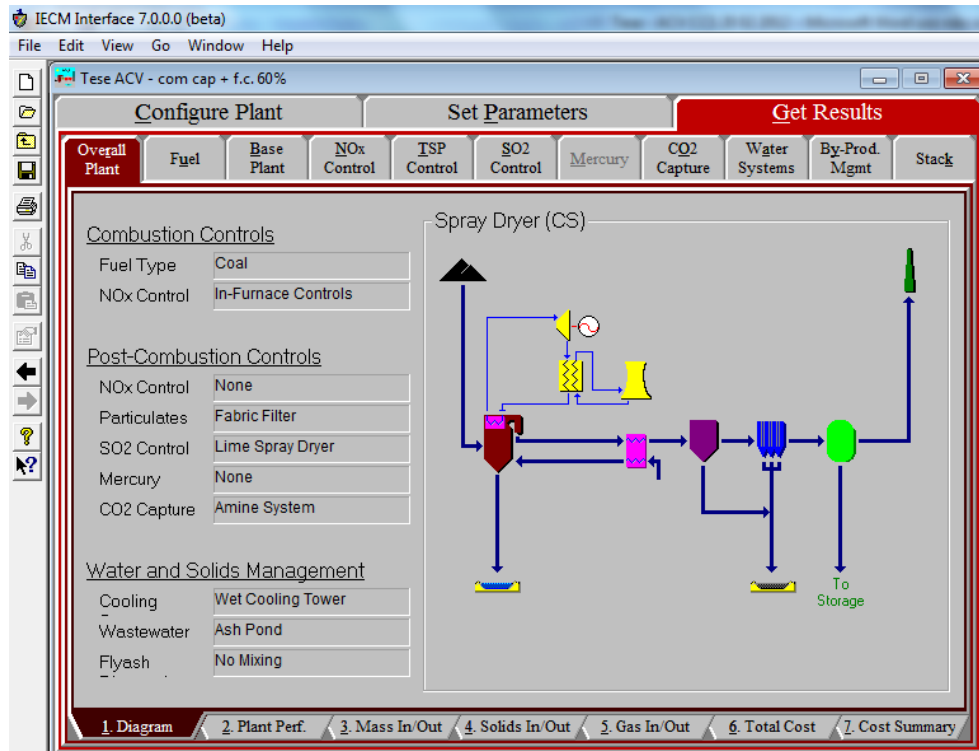


Figura 24 - Configuração da UTE - caso 2
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

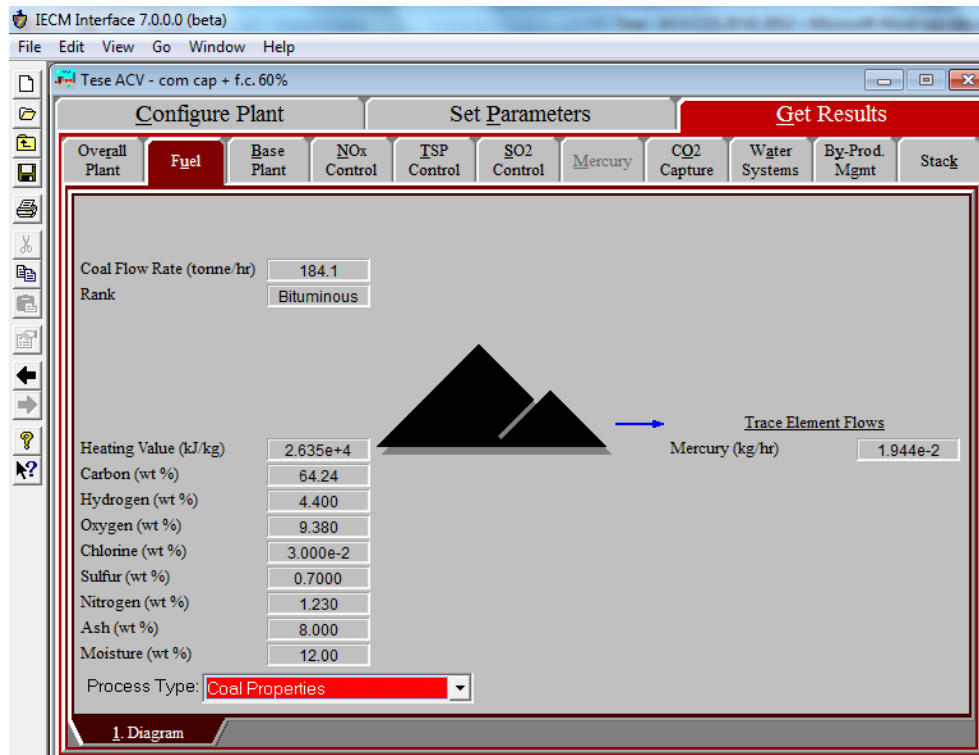


Figura 25 – Dados do carvão - caso 2
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

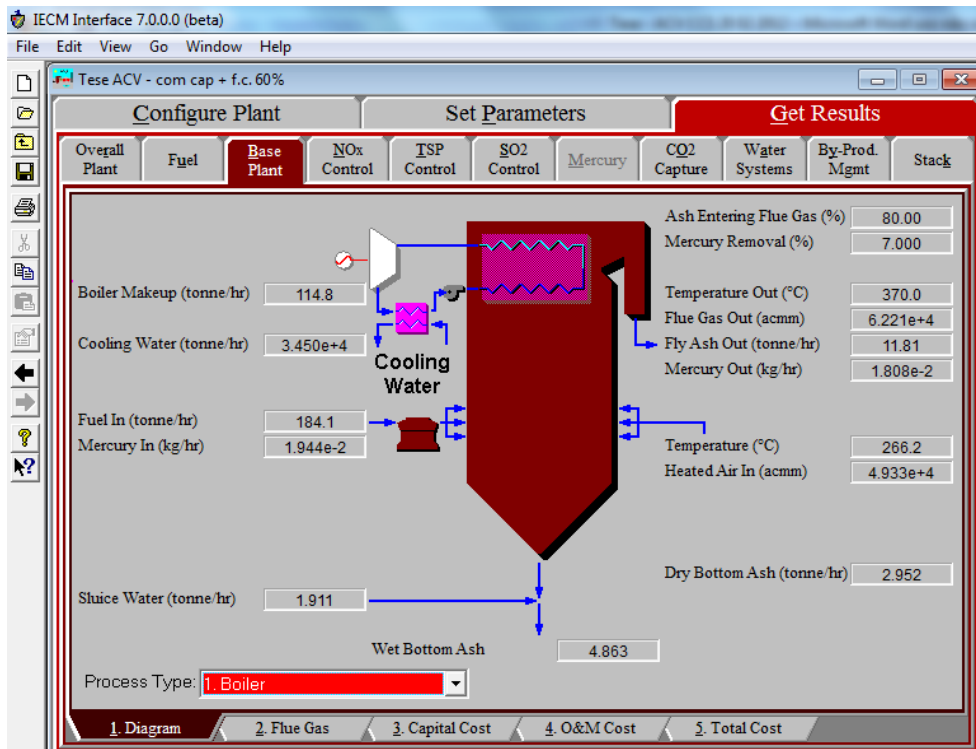


Figura 26 – Dados da caldeira da UTE - caso 2
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

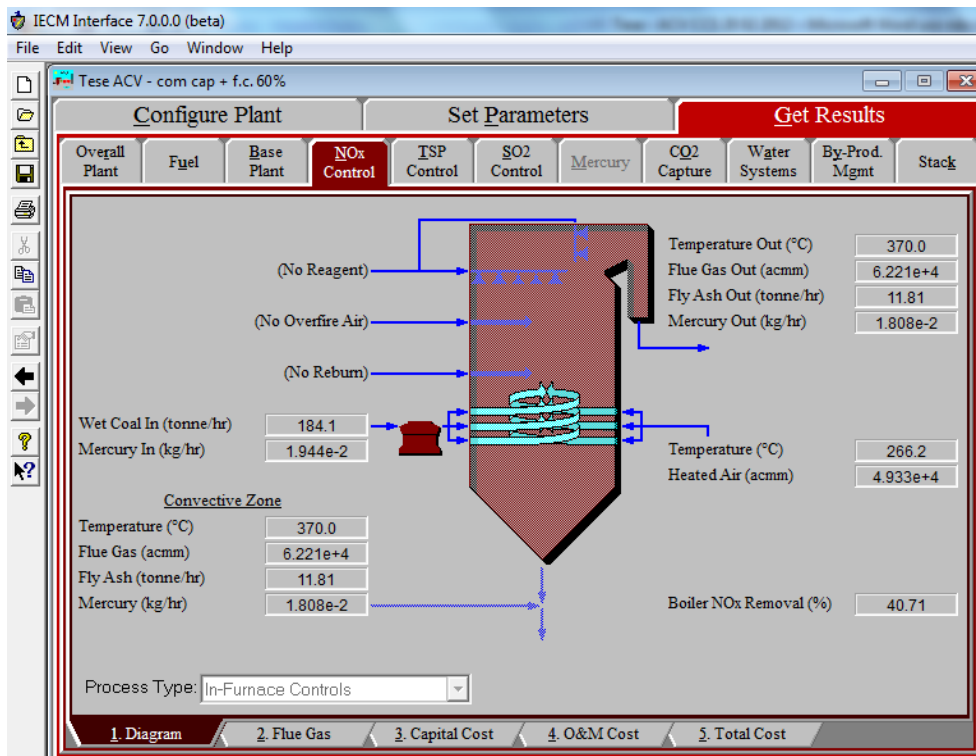


Figura 27 – Sistema do controle de NOx - caso 1
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

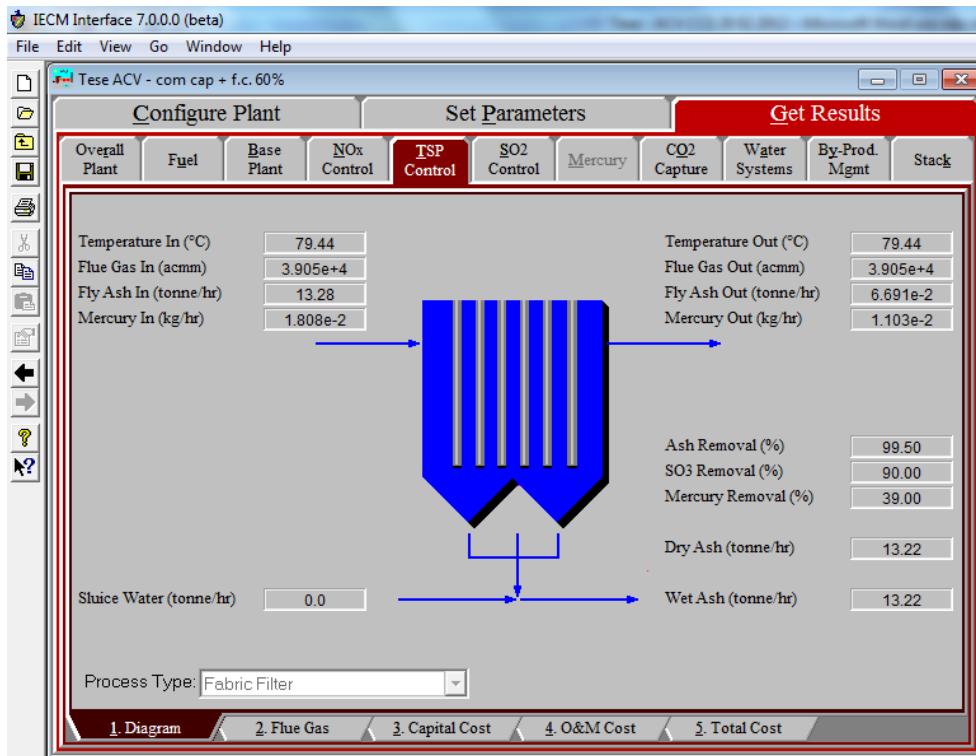


Figura 28 – Sistema do controle de material particulado - caso 2
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

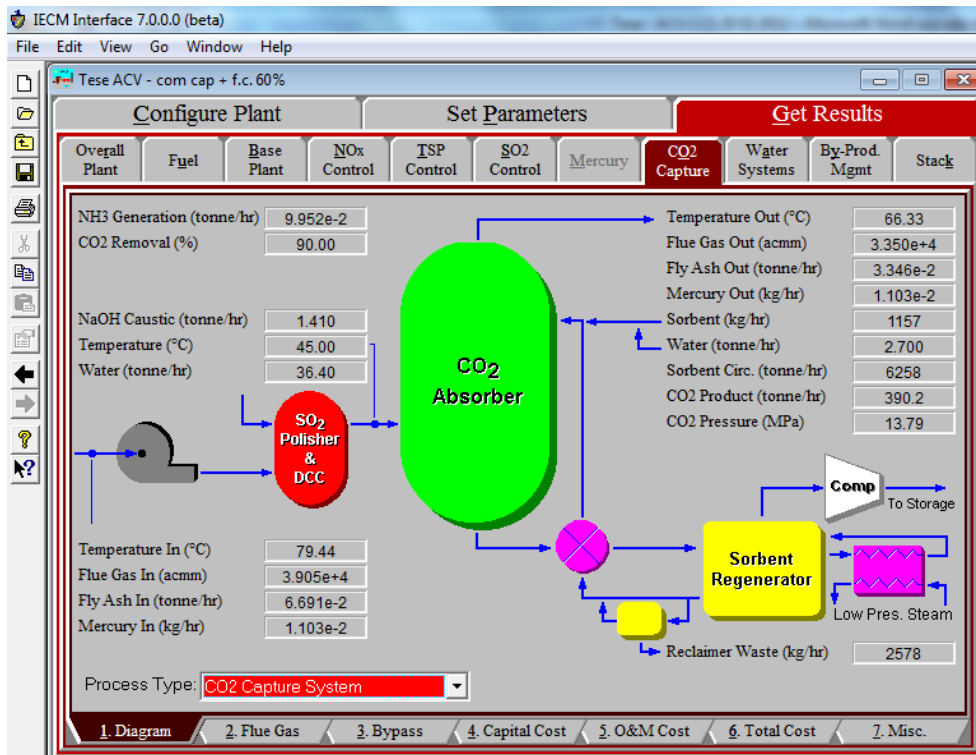


Figura 29 – Sistema de captura de CO₂ - caso 2
Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

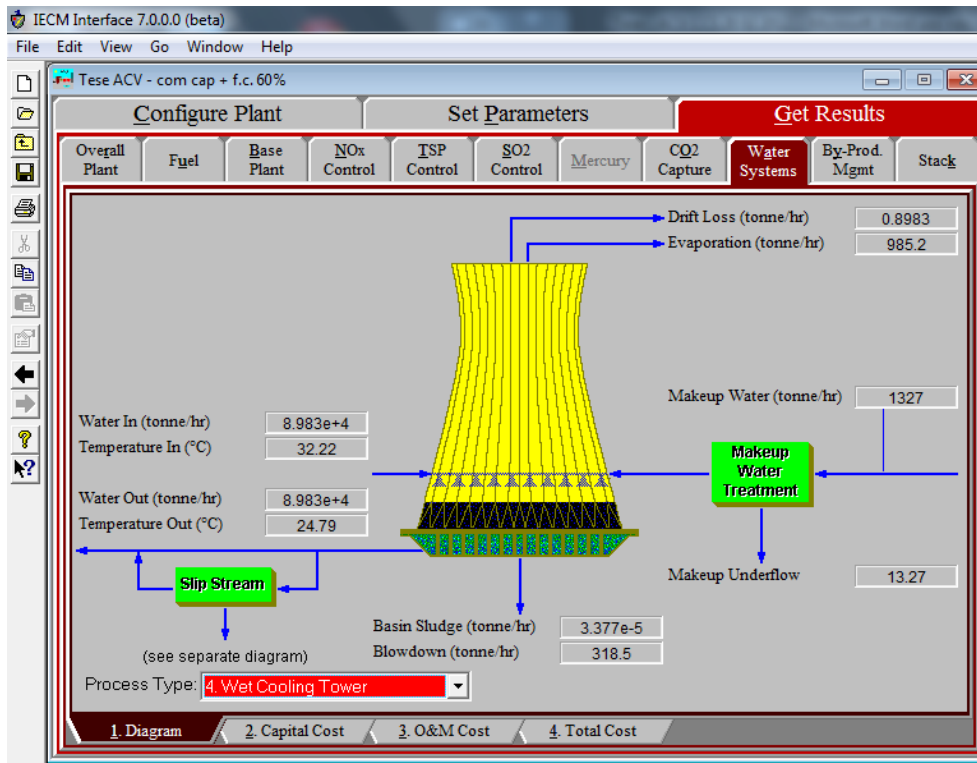


Figura 30 – Sistema de arrefecimento - caso 2
 Fonte: Simulação no IECM (CMU, 2011)

ANEXO B – Dados das simulações no CMLCA

O Anexo B apresenta os principais dados utilizados nas simulações do caso 1 e caso 2.

CASO 1 – UTE sem CCS

Tabela 55 – Matriz de tecnologia do caso 1

	Produção de carvão	Transporte marítimo de carvão	Transporte ferroviário de carvão	Mineração de calcário	Produção da cal	Transporte da cal	UTE	Produção de eletricidade
Carvão p/ transp marítimo	0	-1	1	0	0	0	0	0
Eletricidade UTE	0	0	0	0	0	0	1	0
carvão p/ transp ferroviário	1	0	-1	0	0	0	0	0
Cal para UTE	0	0	0	0	0	1	-0,00305	0
Calcário p/ calcinação	-0,0163	0	0	1	-2	0	0	0
Carvão p/ UTE	0	1	0	0	0	0	-0,46	0
Cal para transporte	0	0	0	0	1	-1	0	0
Diesel	-0,00026	0	-0,00281	-0,0099	0	-0,014	0	0
Eletricidade do grid	-0,0128	0	0	-0,469	0	0	0	1

Tabela 56 – Dados do processo [P1] produção de carvão

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G5]	Calcário para calcinação	0,0163	kg
[G13]	Diesel	0,000262	kg
[G16]	Eletricidade do grid	0,0128	kWh
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G3]	carvão para transp ferroviário	1	kg
Environmental resources			
Label	Name	Value	Unit
[E85]	coal	1,2	kg
[E1968]	Água	0,0845	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,000831	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	3,21E-07	kg
[E642]	Methane[air]	0,0132	kg

Tabela 57 – Dados do processo [P2] transporte marítimo de carvão

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G1]	Carvão para transp marítimo	1	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G6]	Carvão para UTE	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,018	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	9,53E-07	kg
[E642]	Methane[air]	1,84E-07	kg

Tabela 58 – Dados do processo [P3] transporte ferroviário de carvão

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G3]	carvão para transp ferroviário	1	kg
[G13]	Diesel	0,00281	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G1]	Carvão para transp marítimo	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,00889	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	3,43E-06	kg
[E642]	Methane[air]	4,98E-07	kg

Tabela 59 – Dados do processo [P4] mineração de calcário

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G13]	Diesel	0,0099	kg
[G16]	Eletricidade do grid	0,469	kWh
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G5]	Calcário para calcinação	1	kg
Environmental resources			
Label	Name	Value	Unit
[E1963]	calcário	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,031	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	1,20E-05	kg
[E642]	Methane[air]	1,74E-06	kg

Tabela 60 – Dados do processo [P5] produção da cal

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G5]	Calcário para calcinação	2	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G7]	Cal para transporte	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	1,01	kg

Tabela 61 – Dados do processo [P6] transporte da cal

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G7]	Cal para transporte	1	kg
[G13]	Diesel	0,014	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G4]	Cal para UTE	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,0445	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	0,0014	kg
[E642]	Methane[air]	0,00327	kg

Tabela 62 – Dados do processo [P7] UTE sem CCS

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G4]	Cal para UTE	0,00305	kg
[G6]	Carvão para UTE	0,46	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G2]	Eletricidade UTE	1	kWh
Environmental resources			
Label	Name	Value	Unit
[E1968]	Água	2,51	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E259]	ammonia[air]	1,50E-05	kg
[E410]	Carbon dioxide[air]	1,08	kg
[E685]	nitrogen[air]	3,86	kg
[E686]	nitrogen dioxide[air]	0,000102	kg
[E687]	nitrogen mono oxide[air]	0,00127	kg
[E761]	sulphur dioxide[air]	0,00577	kg
[E1964]	Bottom ash	0,0122	kg

[E1965]	Fly ash	0,0331	kg
---------	---------	--------	----

Tabela 63 – Dados do processo [P8] produção de eletricidade

Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G16]	Eletricidade do grid	1	kWh
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,211	kg

CASO 2 – UTE com CCS

Tabela 64 – Matriz de tecnologia do caso 2

	Produção de carvão	Transporte marítimo de carvão	Transporte ferroviário de carvão	Mineração de calcário	Produção da cal	Transporte da cal	UTE com CCS	Produção do solvente	Transporte do solvente	Transporte de NaOH	Produção de NaOH	Produção de eletricidade
Carvão p/ transp marítimo	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eletricidade UTE	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Carvão p/ transp ferroviário	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cal p/ UTE	0	0	0	0	0	1	-0,0037	0	0	0	0	0
Calcário p/ calcinação	-0,0163	0	0	1	-2	0	0	0	0	0	0	0
Carvão p/ UTE	0	1	0	0	0	0	-0,556	0	0	0	0	0
Cal p/ transporte	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
Solvente MEA	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0
NaOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0
Solv.MEA p/ UTE	0	0	0	0	0	0	-0,0035	0	1	0	0	0
NaOH p/ UTE	0	0	0	0	0	0	-0,0042	0	0	1	0	0
CO2 capturado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diesel	-0,0002	0	-0,0028	-0,0099	0	-0,014	0	0	-0,0312	-0,0309	0	0
Cloro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,87	0
Dicloroetano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,13	0
Eletricidade do grid	-0,0128	0	0	-0,4690	0	0	0	0	0	0	-2,94	1
Gás natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 65 – Dados do processo [P1] produção de carvão

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G5]	Calcário para calcinação	0,0163	kg
[G13]	Diesel	0,000262	kg
[G16]	Eletricidade do grid	0,0128	kWh

Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G3]	carvão para transp ferroviário	1	kg
Environmental resources			
Label	Name	Value	Unit
[E85]	coal	1,2	kg
[E1968]	Água	0,0845	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,000831	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	3,21E-07	kg
[E642]	Methane[air]	0,0132	kg

Tabela 66 – Dados do processo [P2] transporte marítimo de carvão

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G1]	Carvão para transp marítimo	1	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G6]	Carvão para UTE	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,018	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	9,53E-07	kg
[E642]	Methane[air]	1,84E-07	kg

Tabela 67 – Dados do processo [P3] transporte ferroviário de carvão

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G3]	carvão para transp ferroviário	1	kg
[G13]	Diesel	0,00281	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G1]	Carvão para transp marítimo	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,00889	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	3,43E-06	kg
[E642]	Methane[air]	4,98E-07	kg

Tabela 68 – Dados do processo [P4] mineração de calcário

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit

[G13]	Diesel	0,0099	kg
[G16]	Eletricidade do grid	0,469	kWh
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G5]	Calcário para calcinação	1	kg
Environmental resources			
Label	Name	Value	Unit
[E1963]	calcário	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,031	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	1,20E-05	kg
[E642]	Methane[air]	1,74E-06	kg

Tabela 69 – Dados do processo [P5] produção da cal

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G5]	Calcário para calcinação	2	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G7]	Cal para transporte	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	1,01	kg

Tabela 70 – Dados do processo [P6] transporte da cal

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G7]	Cal para transporte	1	kg
[G13]	Diesel	0,014	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G4]	Cal para UTE	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,0445	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	0,0014	kg
[E642]	Methane[air]	0,00327	kg

Tabela 71 – Dados do processo [P7] UTE com CCS

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G4]	Cal para UTE	0,00369	kg

[G6]	Carvão para UTE	0,556	kg
[G10]	Solvente MEA para UTE	0,0035	kg
[G11]	Soda cáustica (NaOH) para UTE	0,00426	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G2]	Eletricidade UTE	1	kWh
Environmental resources			
Label	Name	Value	Unit
[E1968]	Água	3,09	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E259]	ammonia[air]	0,000318	kg
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,131	kg
[E685]	nitrogen[air]	4,66	kg
[E686]	nitrogen dioxide[air]	9,30E-05	kg
[E687]	nitrogen mono oxide[air]	0,00153	kg
[E761]	sulphur dioxide[air]	1,00E-06	kg
[E1964]	Bottom ash	0,0147	kg
[E1965]	Fly ash	0,0399	kg
[E1966]	MEA degradado	0,00779	kg

Tabela 72 – Dados do processo [P8] produção do solvente

Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G8]	Solvente MEA	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	3,13	kg
[E412]	Carbon Monoxide[air]	0,00202	kg
[E642]	Methane[air]	0,00671	kg

Tabela 73 – Dados do processo [P9] Transporte do solvente

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G8]	Solvente MEA	1	kg
[G13]	Diesel	0,0312	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G10]	Solvente MEA para UTE	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,0986	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	5,19E-06	kg

[E642]	Methane[air]	5,19E-06	kg
--------	--------------	----------	----

Tabela 74 – Dados do processo [P10] Transporte de NaOH

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G9]	Soda cáustica (NaOH)	1	kg
[G13]	Diesel	0,0309	kg
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G11]	Soda cáustica (NaOH) para UTE	1	kg
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,0978	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	5,15E-06	kg
[E642]	Methane[air]	5,15E-06	kg

Tabela 75 – Dados do processo [P11] Produção de NaOH

Economic inflows			
Label	Name	Value	Unit
[G16]	Eletricidade do grid	2,94	kWh
Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G9]	Soda cáustica (NaOH)	1	kg
[G14]	Cloro	0,87	kg
[G15]	Dicloroetano	1,13	kg
Environmental resources			
Label	Name	Value	Unit
[E87]	natural gas	0,123	m3
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,269	kg
[E495]	Dinitrogen oxide[air]	4,80E-07	kg
[E642]	Methane[air]	4,80E-06	kg

Tabela 76 – Dados do processo [P12] produção de eletricidade

Economic outflows			
Label	Name	Value	Unit
[G16]	Eletricidade do grid	1	kWh
Environmental emissions			
Label	Name	Value	Unit
[E410]	Carbon dioxide[air]	0,211	kg