

TATIANE TOBIAS DA CRUZ

**Avaliação exergetica do ciclo de vida de um ciclo combinado a gás
natural com sistema de oxiconbustão**

Tatiane Tobias da Cruz

**Avaliação exergética do ciclo de vida de um ciclo combinado a gás
natural com sistema de oxicombustão**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na área de
Energia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ivonete Ávila
Coorientadores: Prof. Dr. José A. P. Balestieri
Prof. Dr. Mateus R. N. Vilanova

Guaratinguetá - SP
2020

C957a	Cruz, Tatiane Tobias da Avaliação exergetica do ciclo de vida de um ciclo combinado a gás natural com sistema de oxidação / Tatiane Tobias da Cruz – Guaratinguetá, 2020 203 f. : il. Bibliografia: f. 178-193 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientadora: Prof^a Dr^a Ivonete Ávila Coorientadores: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri Prof. Dr. Mateus Ricardo Nogueira Vilanova 1. Usinas termelétricas. 2. Gás natural. 3. Análise energética. 4. Seqüestro de carbono. 5. Ciclo de vida do produto – aspectos ambientais. I. Título. CDU 662.767(043)
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

TATIANE TOBIAS DA CRUZ

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof.ª. Dr.ª. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª. Dr.ª. IVONETE ÁVILA
Orientadora / UNESP/FEG



p/ Prof. Dr. MARCO ANTONIO ROSA DO NASCIMENTO
UNIFEI



p/ Prof.ª. Dr.ª. MARIA LUIZA GRILLO RENÓ
UNIFEI



Prof. Dr. OTAVIO JOSÉ DE OLIVEIRA
UNESP/FEG



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP/FEG

Março de 2020

DADOS CURRICULARES

TATIANE TOBIAS DA CRUZ

NASCIMENTO	03.06.1986 – Lorena / SP
FILIAÇÃO	Luiz Antônio da Cruz Vanda Cristina Ferreira Tobias da Cruz
2004/2010	Curso de Graduação em Engenharia de Materiais na EEL-USP
2013/2015	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Energia, Nível de Mestrado, FEG-UNESP.
2015/2020	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Energia, Nível de Doutorado, FEG-UNESP

Dedico este trabalho a todos os seres com os
quais tive a oportunidade de compartilhar esse
sopro de vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha saúde, minha família e meus amigos.

Aos meus orientadores, Profa. Dra. Ivonete Ávila, Prof. Dr. José A. P. Balestieri e Prof. Dr. Mateus R. N. Vilanova, que jamais deixaram de me incentivar. Sem essa orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos colegas, professores e funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e colaboração.

Aos meus familiares, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

A CAPES e a FAPESP, por todo o apoio financeiro, sem o qual esse trabalho não poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Processo nº 2016/15749-5.

“A vida não é sobre o que você tem, o que você veste, onde mora ou quem está ao seu redor. É sobre a profundidade de sua experiência”.

Sadhguru

RESUMO

O crescimento populacional e o progresso tecnológico têm levado a crescente demanda por recursos naturais e energia, resultando na intensificação de impactos ambientais. O setor de energia é um dos principais emissores de CO₂ antropogênico, principalmente devido a utilização de combustíveis fósseis, o que tem levado à busca por soluções tecnológicas visando a redução dos impactos ambientais associados à sua geração. Nesse contexto, esse trabalho visa realizar uma avaliação de desempenho ambiental da geração de energia elétrica das centrais termelétricas Fernando Gasparian e Piratininga com inserção da técnica de captura de CO₂ por oxidação. Essa avaliação é realizada por meio de uma proposta conceitual própria que inclui avaliação do ciclo de vida (ACV) e avaliação termodinâmica com bases exergéticas. A avaliação termodinâmica abrange a operação das termelétricas, por meio de análise energética e exergética utilizando a teoria do custo exergético e o método CExC (*cumulative exergy consumption*). A ACV abrange desde a extração dos recursos até o fim de vida das instalações, utilizando os métodos de contabilização de recursos CED (*cumulative energy demand*), CExD (*cumulative exergy demand*) e CML IA *baseline*. Os resultados da avaliação termodinâmica permitiram verificar que a câmara de combustão é a principal destruidora de exergia e a inserção da técnica de oxidação impõe maior penalidade energética por causa da inserção dos componentes de separação de ar e processamento de CO₂ para armazenamento. Por essa razão, um aumento do custo exergético unitário e consumo de recursos de mais de 15% para as UTE com oxidação foi encontrado. Do ponto de vista do ciclo de vida, os resultados demonstraram que a operação da termelétrica é responsável por cerca de 86% das emissões de GEE (GWP₁₀₀) para o cenário sem oxidação e 69% para o cenário com oxidação. A produção e transporte do gás natural foi responsável por cerca de 14% (sem oxidação) e 28% (com oxidação), sendo as emissões restantes ocorridas na construção e descomissionamento das UTE (0,22% sem oxidação e 0,32% com oxidação). O consumo de energia (CED) e exergia (CExD), de maneira geral são maiores nas etapas de extração, processamento e transporte do gás natural. Conclui-se que a proposta conceitual apresentada foi validada como forma de avaliação ambiental do ponto de vista termodinâmico e do ciclo de vida com bases exergéticas.

PALAVRAS-CHAVE: ACV. Exergia. AECV. Central termelétrica. Gás natural. Captura de carbono. Oxidação.

ABSTRACT

Population growth and technological progress have led to an increasing demand for natural resources and energy, resulting in the intensification of environmental impacts. The energy sector is one of the main emitters of anthropogenic CO₂, mainly due to the use of fossil fuels, which has led to the search for technological solutions aimed at reducing the environmental impacts associated with its generation. In this context, this work aims to carry out an environmental performance evaluation of the electric power generation at the Fernando Gasparian and Piratininga thermoelectric plants with the insertion of the CO₂ capture technique by oxy-combustion. This assessment is carried out through a conceptual proposal that includes life cycle assessment (LCA) and thermodynamic assessment with exergetic bases. Thermodynamic evaluation covers the operation of thermoelectric plants, through energy and exergetic analysis using the theory of exergetic cost and the CExC method (cumulative exergy consumption). ACV covers everything from resource extraction to the end of the facility's life, using the resource accounting methods CED (cumulative energy demand), CExD (cumulative exergy demand) and CML IA baseline. The results of the thermodynamic evaluation allowed to verify that the combustion chamber is the main destroyer of exergy and the insertion of the oxy-combustion technique imposes a greater energy penalty due to the insertion of the air separation unit and CO₂ processing unit for CO₂ storage. For this reason, an increase in the unit exergetic cost and resource consumption of more than 15% for the plant with oxy-combustion was found. From the life cycle point of view, the results showed that the operation of the thermoelectric plant is responsible for about 86% of the GHG emissions (GWP₁₀₀) for the scenario without oxy-combustion and 69% for the scenario with oxy-combustion. The production and transportation of natural gas was responsible for about 14% (without oxy-combustion) and 28% (with oxy-combustion), with the remaining emissions occurring in the construction and decommissioning of the UTE 0.22% without oxy-combustion and 0.32% with oxy-combustion. Energy (CED) and exergy (CexD) consumption, in general, are higher in the stages of extraction, processing and transportation of natural gas. It can be concluded that the conceptual proposal presented was validated as a form of environmental assessment from the point of view of thermodynamics and of the life cycle with exergetic bases.

KEYWORDS: LCA. Exergy. ELCA. Power plant. Natural gas. Carbon capture. Oxycombustion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação do Ecossistema Global	25
Figura 2 - Etapas do ciclo de vida de um produto	39
Figura 3 - Caminho do impacto.....	42
Figura 4 - Degradação de exergia em um processo real.....	43
Figura 5 - Parcelas principais de exergia.....	44
Figura 6 - Ilustração qualitativa da relação entre eficiência exergética e impacto ambiental ..	45
Figura 7 - Matriz de custos econômicos e exergéticos.....	46
Figura 8 - Tecnologias de conversão de combustíveis em energia elétrica mais utilizadas.....	49
Figura 9 - Representação esquemática dos processos de captura de CO ₂	53
Figura 10 - Técnicas de captura e armazenamento de CO ₂	54
Figura 11 - Progresso atual do desenvolvimento de técnicas de captura, armazenamento e utilização de carbono em termos de nível de maturidade tecnológica.	55
Figura 12 - Projetos de CCS em escala comercial no mundo	56
Figura 13 - Principais ciclos a base de CO ₂ aplicados a turbinas a gás.....	58
Figura 14 - Principais ciclos a base de H ₂ O e H ₂ O + CO ₂ aplicados a turbinas a gás	59
Figura 15 - Comportamento do C _p dos gases nitrogênio e dióxido de carbono	61
Figura 16 - Processo de revisão da literatura.....	63
Figura 17 - Métodos que abordam exergia e ACV.....	64
Figura 18 - Processo de seleção dos artigos para revisão bibliográfica	71
Figura 19 - Redes de palavras-chave por período	72
Figura 20 - Enquadramento metodológico da pesquisa.....	81
Figura 21 - Centrais termelétricas selecionadas para o estudo	82
Figura 22 - Esquema de operação das UTE selecionadas	83
Figura 23 - Ciclo combinado com oxidação simplificado.....	84
Figura 24 - Proposta conceitual para avaliação ambiental	87
Figura 25 - Sistema de produto e domínios dos diferentes métodos utilizados	88
Figura 26 - Esquema da natureza iterativa da ACV	97
Figura 27 - Fronteiras do sistema de produto (cenário NGCC)	102

Figura 28 - Gasodutos de transporte do Gás Natural.....	104
Figura 29 - Fronteiras do sistema de produto (cenário OCC)	111
Figura 30 - Diagrama esquemático parcial das UTE estudadas (NGCC)	132
Figura 31 - Diagrama esquemático parcial das UTE estudadas (OCC)	134
Figura 32 - Diagrama de Sankey do ciclo NGCC	139
Figura 33 - Diagrama de Grassmann do ciclo NGCC	140
Figura 34 - Diagrama de Sankey do ciclo OCC	142
Figura 35 - Diagrama de Grassmann do ciclo OCC.....	143
Figura 36 – Exergia destruída: NGCC vs OCC.....	145
Figura 37 - Exergia destruída por componente para os ciclos NGCC e OCC.....	146
Figura 38 – CExC para ambos os cenários estudados	149
Figura 39 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CED da geração de eletricidade (NGCC)	151
Figura 40 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CExD da geração de eletricidade (NGCC)	152
Figura 41 - Contribuição das etapas do ciclo de vida da geração de eletricidade as categorias de impacto do método CML IA <i>baseline</i> (NGCC).....	155
Figura 42 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CED da geração de eletricidade (OCC)	157
Figura 43 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CExD da geração de eletricidade (OCC)	158
Figura 44 - Contribuição das etapas do ciclo de vida da geração de eletricidade para as categorias de impacto do método CML IA <i>baseline</i> (OCC)	160
Figura 45 - Comparação dos resultados da AICV (CED) dos cenários NGCC e OCC	161
Figura 46 - Comparação dos resultados da AICV (CExD) dos cenários NGCC e OCC	162
Figura 47 - Comparação dos resultados da AICV (CML IA <i>baseline</i>) dos cenários NGCC e OCC	163
Figura 48 – Análise de incerteza (CML IA <i>baseline</i>) dos cenários NGCC e OCC.....	167
Figura 49 – Análise de incerteza (CED) dos cenários NGCC e OCC.....	170
Figura 50 – Análise de incerteza (CExD) dos cenários NGCC e OCC.....	171

Figura 51 – Análise de incerteza (CML IA baseline) dos cenários NGCC e OCC.....	172
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração mundial de energia elétrica por fonte em TWh.....	47
Tabela 2 - Tecnologias de geração de energia elétrica avaliadas	50
Tabela 3 - Propriedades do Gás Natural	103
Tabela 4 - Propriedades do Ar	103
Tabela 5 - Parâmetros dos conjuntos a gás.....	106
Tabela 6 - Parâmetros das turbinas a vapor	107
Tabela 7 - Propriedades do Gás de Combustão (NGCC)	108
Tabela 8 - Parâmetros das caldeiras de recuperação	108
Tabela 9 - Exergia química padrão dos fluxos	109
Tabela 10 - Parâmetros das torres de resfriamento.....	109
Tabela 11 - Parâmetros da Unidade de Separação de ar (ASU).....	110
Tabela 12 - Propriedades do gás de combustão (OCC).....	113
Tabela 13 - Parâmetros da Unidade de Processamento de CO ₂ (CPU).....	113
Tabela 14 - Dados de entrada e saída do ICV do primeiro plano (NGCC).....	126
Tabela 15 - Principais dados de entrada e saída do ICV (OCC)	128
Tabela 16 - Reações de combustão utilizadas para os cenários estudados.....	130
Tabela 17 - Resultados da análise energética e exergética (NGCC)	133
Tabela 18 - Resultados da análise energética e exergética (OCC)	135
Tabela 19 - Eficiências energética e exergética calculadas	137
Tabela 20 - Resultados da AICV (NGCC e OCC)	164
Tabela 21 - Estatísticas dos resultados da AICV (NGCC).....	173
Tabela 22 - Estatísticas dos resultados da AICV (OCC).....	174
Tabela 23 - Exergia dos fluxos não materiais (potência)	194
Tabela 24 - Exergia dos fluxos não materiais (exergia destruída)	194

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Palavras-chave e combinação dos <i>strings</i> de pesquisa selecionados	30
Quadro 2 - Aspectos metodológicos e principais resultados dos artigos selecionados	31
Quadro 3 - Comparação entre energia e exergia	44
Quadro 4 - Principais métodos de avaliação ambiental que utilizam exergia associada a ACV	69
Quadro 5 - Principais estudos de ACV de centrais termelétricas com captura de CO ₂ via oxidação.....	78
Quadro 6 - Detalhamento da metodologia ACV aplicada aos estudos selecionados	79
Quadro 7 - Categorias de impacto disponíveis para o método CML IA <i>baseline</i>	95
Quadro 8 - Custo exergético unitário de cada ponto dos ciclos NGCC e OCC	147
Quadro 9 - Dados dos estudos utilizados para comparação	165
Quadro 10 - Pontuação de cada indicador da qualidade dos dados para a análise de incerteza	169
Quadro 11 - Equações que constituem a matriz estrutural (NGCC)	196
Quadro 12 - Equações que constituem a matriz estrutural (OCC)	198
Quadro 13 - Fluxos exergéticos classificados como Insumo, Produto ou Perdas (NGCC) ...	202
Quadro 14 - Fluxos exergéticos classificados como Insumo, Produto ou Perdas (OCC)	203

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AECV	Avaliação Exergética do Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASU	<i>Air Separation Unit</i> (Unidade de separação de ar)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBA	<i>Cost-benefit Analysis</i> (Análise de custo-benefício)
CCGT	<i>Combined Cycle Gas Turbine</i> (Turbina a gás de ciclo combinado)
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> (Captura e armazenamento de carbono)
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i> (Demanda acumulada da energia)
CEENE	<i>Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment</i> (Extração cumulativa de exergia do ambiente natural)
CExD	<i>Cumulative Exergy Demand</i> (Demanda acumulada da energia)
CSP	<i>Concentrating Solar Power</i> (Concentração de energia solar)
Ed	Exergia Destruída
EEIO	<i>Environmental Extended Input – Output</i> (Entrada e saída ambiental estendida)
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ELCA	<i>Exergetic Life Cycle Assessment</i> (Avaliação exergética do ciclo de vida)
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i> (Recuperação de óleo aprimorada)
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHG	<i>Greenhouse Gases</i> (Gases do Efeito Estufa)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IGCC	<i>Integrated Coal Gasification Combined Cycle</i> (Ciclo combinado de gaseificação integrada de carvão)
IO	<i>Input-Output</i> (Entrada-Saída)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> (Avaliação do ciclo de vida)
LNG	<i>Liquefied Natural Gas</i> (Gás natural liquefeito)
NBR	Norma Brasileira

NGCC	<i>Natural Gas Combined Cycle</i> (Ciclo combinado a gás natural)
MEA	Monoetanolamina
MFA	<i>Material Flow Analysis</i> (Análise de fluxo de material)
OCC	Oxyfuel combined cycle
PA	Potencial de Acidificação
PAT	Potencial de Acidificação Terrestre
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PC	<i>Pulverized Coal</i> (Carvão pulverizado)
PCI	Poder calorífico inferior
PDCO	Potencial de Depleção da Camada de Ozônio
PDR	Potencial de Depleção de Recursos
PDRaf	Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (fóssil)
PDRAm	Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (mineral)
PE	Potencial de Eutrofização
PEAD	Potencial de Eutrofização para água doce
PEc	Potencial de Ecotoxicidade
PEcAD	Potencial de Ecotoxicidade para água doce
PEcM	Potencial de Ecotoxicidade Marinha
PEcT	Potencial de Ecotoxicidade Terrestre
PEM	Potencial de Eutrofização Marinha
PET	Potencial de Eutrofização Terrestre
PFFO	Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio
PFMP	Potencial de Formação de Material Particulado
PRI	Potencial de Radiação Ionizante
PSA	<i>Process Chain Analysis</i> (Análise da cadeia de processos)
PTH	Potencial de Toxicidade Humana
PTHC	Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Carcinogênicos
PTHNC	Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Não Carcinogênicos
RAM	<i>Resource Accounting Methods</i> (Métodos de contabilização de recursos)
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SC	<i>Simple Cycle / Semi-Closed</i> (Ciclo simples / Semi-fechado)
SCGT	<i>Simple Cycle Gas Turbine / Semi-Closed Gas Turbine</i> (Turbina a gás de ciclo simples / Turbina a gás de ciclo semi-fechado)

SCGT/CC *Semi-Closed Gas Turbine Combined Cycle* (Ciclo combinado semi-fechado de turbina a gás)

SCOC-CC *Semi-Closed Oxy-fuel Combustion Combined Cycle* (Ciclo combinado semi-fechado de turbina a gás)

SED *Solar Energy Demand* (Demanda de energia solar)

SETAC *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental)

SLCA *Social Life Cycle Assessment*

TEC *Theory of Exergetic Cost* (Teoria do custo exergético)

TRL *Technology readiness level* (Nível de maturidade tecnológica)

UF Unidade Funcional

UTE Usina Termelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Matriz estrutural do processo	-
a_k	Atividade do componente k	
a_{ij}	Quantidade acumulada do fluxo de referência i para p produto j	kg, MJ, Nm ³ , m ² a
CAT_x	Categoria de impacto x	-
CED_j	Demanda acumulada de exergia do produto j	MJ petróleo-eq
$CEENE_j$	Extração cumulativa de exergia do ambiente natural	MJ _{ex}
$CExC_j$	Consumo acumulado de exergia do produto j	MJ _{ex}
$CExD_j$	Demanda acumulada de exergia do produto j	MJ-eq
C_p	Calor específico a pressão constante	kJ/kg-K
C_v	Calor específico a volume constante	kJ/kg-K
D_i	Depleção de recursos naturais	MJ
e_j	Quantidade de energia do fluxo j	MJ
EE_j	Exergia estendida do produto j	J
Ex_K	Exergia associada ao capital	J
Ex_L	Exergia associada a mão de obra	J
Ex_O	Exergia associada a custos ambientais	J
ex	Exergia específica	kW/kg, MJ-eq/kg
ex_q^0	Exergia química padrão	kJ/mol
Ex	Exergia	kW, MJ-eq
$Ex_{ch,i}$	Exergia química por quilo da substância i	MJ-eq/kg
$Ex_{D,k}$	Impacto ambiental da destruição de exergia	mPts/s
Ex_R	Exergia dos recursos renováveis	MJ
$Ex_{T,k}$	Impacto ambiental total de um componente k	mPts/s

f_c	Fator de utilização	s/h
$F\&\ddot{O}_j$	Método de Finnveden e Östlund	-
h	Entalpia específica	kJ/kg
I_{CV}	Irreversibilidades do ciclo de vida	MJ
k	Razão de calores específicos (C_p/C_v)	-
k^*	Custo exergético unitário	kJ/kJ
$\dot{m}$	Vazão mássica	kg/s
m_i	Massa do recurso material i	kg
n_j	Número de mols da espécie de referência k	-
Q_{forn}	Calor fornecido	MJ
P	Pressão	MPa
r_{ex}	Relação exergia/energia do fluxo j	MJ-eq/MJ
R	Constante universal dos gases	kJ/kmol.K
s	Entropia específica	kJ/kg.K
T	Temperatura	°C, K
ton	Tonelada	-
x_k	Fração mássica do componente k	-
X_i	Fator exergético do fluxo de referência i	MJ _{ex} /kg, MJ _{ex} /MJ, MJ _{ex} /Nm ³ , MJ _{ex} /m ² a
y_k	Fração molar do componente k	-
Y_k	Impacto ambiental relacionado ao componente k	mPts/s
$W_{líq}$	Trabalho líquido	kW

Letras gregas

ΔG_r^0	Energia livre padrão de Gibbs da reação r	kJ/mol
η	Eficiência de primeira lei	%
ε	Eficiência de segunda lei	%

Subscritos

c	Cinética	-
D	Disposição	-

e	Entrada	-
F	Combustível	-
i	Recurso material	-
j	Fluxo de energia	-
k	Espécie de referência	-
l	Componente	-
n	Nuclear	-
p	Potencial	-
P	Produção	-
pr	Produto	
q	Química	-
r	Radiativa	-
rq	Reações químicas	-
s	Saída	-
sm	Separação de misturas	-
t	Térmica	-
U	Uso	-
v	Número de mols	-
0	Condições padrão ou condições ambientais	-

Sobrescritos

0	Padrão	-
---	--------	---

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	CONTEXTO DA PESQUISA.....	24
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	27
1.3	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	28
1.4	JUSTIFICATIVA	28
1.4.1	Relevância e contribuições	28
1.4.2	Estudos anteriores	29
1.4.3	Considerações gerais e oportunidades.....	35
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	36
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	38
2.1.1	Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	38
2.1.2	Exergia	42
2.1.3	Geração de energia elétrica.....	47
2.1.4	Captura e Armazenamento de Carbono.....	50
2.2	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E BIBLIOGRÁFICA	62
2.2.1	Exergia aplicada a ACV	62
2.2.2	ACV aplicada a centrais termelétricas com captura de CO₂.....	71
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS	80
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	80
3.2	MATERIAL	82
3.2.1	Centrais Termelétricas	82
3.2.2	Técnica de captura de CO₂: Oxidcombustão	83
3.2.3	Ferramentas computacionais utilizadas	85
3.3	PROPOSTA CONCEITUAL	85
3.4	AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA	89
3.4.1	Análise energética	89
3.4.2	Análise exérgica	89
3.5	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	91
3.5.1	Definição do objetivo e escopo	92
3.5.2	Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	92
3.5.3	Avaliação de impacto do Ciclo de Vida (AICV)	92

3.5.4	Interpretação.....	97
4	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO E INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	98
4.1	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO.....	98
4.1.1	Aplicações previstas do produto do estudo de ACV.....	98
4.1.2	Limitações do estudo	98
4.1.3	Razões do estudo	98
4.1.4	Tipo de público-alvo	99
4.1.5	Existência de comparações envolvidas.....	99
4.1.6	Comissários	99
4.1.7	Classificação do contexto decisório	99
4.2	DEFINIÇÃO DO ESCOPO	100
4.2.1	Consistência dos métodos, premissas e dados	100
4.2.2	Reprodutibilidade	100
4.2.3	Tipos de resultados	101
4.2.4	Sistema de produto	101
4.2.5	Estrutura da modelagem do ICV e tratamento da multifuncionalidade.....	114
4.2.6	Fronteiras do sistema	114
4.2.7	Categorias de impacto da AICV.....	114
4.2.8	Representatividade e adequabilidade tecnológica, geográfica e temporal	114
4.2.9	Tipos, qualidade e fontes de dados e informações necessárias	115
4.2.10	Requisitos especiais para comparação entre sistemas.....	115
4.2.11	Identificação de necessidade de revisão crítica	115
4.2.12	Planejamento de comunicação dos resultados	115
4.3	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	116
4.3.1	Extração, processamento e transporte do gás natural	116
4.3.2	Tratamento da água	119
4.3.3	Operação das UTE selecionadas (NGCC e OCC)	121
4.3.4	Captura e armazenamento de carbono.....	123
4.3.5	Dados de entrada e saída do Inventário do Ciclo de Vida para o primeiro plano	125
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	130
5.1	AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA	130
5.1.1	Análise Energética e Exergética	130

5.1.2	Custo exergético unitário (k^*) e Consumo acumulado de exergia (CExC).....	146
5.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	150
5.2.1	AICV e Interpretação dos resultados (Fases 3 e 4 da ACV).....	150
5.2.2	Análise de sensibilidade dos resultados	166
5.2.3	Análise de incerteza dos resultados (Método de Monte Carlo e Matriz de Pedigree).....	168
5.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA CONCEITUAL APRESENTADA	175
6	CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES	176
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	176
6.2	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	178
	REFERÊNCIAS	179
	APÊNDICE A – ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA	194
	APÊNDICE B – CEXC E CUSTO EXERGÉTICO UNITÁRIO	195

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

O constante crescimento populacional aliado ao progresso tecnológico focado no crescimento da economia, que por sua vez é baseada no acúmulo de capital por meio do consumo, têm levado a uma crescente demanda por recursos naturais. Associados ao consumo de recursos, estão os impactos de sua utilização, relação que começou a ser questionada a partir dos anos 1960 (FORRESTER, 1968, 1971; MEADOWS *et al.*, 1972) e culminou na Conferência de Estocolmo, na qual surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável¹ e sustentabilidade, considerando os fatores ambiental, econômico e social. Desde então, diferentes frentes de pesquisa buscam entender e relacionar as atividades humanas e o ecossistema global, com a visão de que os limites físicos do planeta devem ser respeitados para que possamos manter a capacidade de sobrevivência da humanidade.

Sabe-se que exergia² atinge a Terra por meio da luz solar (alta qualidade), que é então convertida, mantendo as condições de vida de quase todos os seres vivos na superfície da Terra, e liberada na forma de radiação de calor de baixa qualidade (Figura 1). Portanto a exergia é o combustível para todos os sistemas com a capacidade de se manter, como a biosfera³ (WALL, 1977). Logo, os fluxos de exergia do ecossistema global devem ser conhecidos para que possamos obter uma idéia mais clara de onde colocar esforços para fazer melhor uso dos recursos (WALL, 1977) e, conseqüentemente, reduzir os impactos ambientais. Sendo assim, o potencial de utilização da exergia no tratamento de questões de sustentabilidade e na solução de problemas ambientais é considerável (DINCER; ROSEN, 2004).

Visando o desenvolvimento sustentável, surgiram também outros conceitos importantes como a Ecologia Industrial⁴, que considera a interdependência homem *versus* biosfera na concepção de processos industriais, resultando na redução e no reaproveitamento dos recursos utilizados. E também a Economia Circular⁵, na qual a economia é concebida como um ciclo

¹ De acordo com a Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento da Organização das Nações Unidas, é aquele capaz de suprir as necessidades dos seres humanos da atualidade, sem comprometer a capacidade do planeta de atender as gerações futuras (BRUNDTLAND, 1987).

² Exergia é definida como parte útil da energia, que é convertida em todas as outras formas de energia, ou também pela capacidade técnica de trabalho (WALL, 1977).

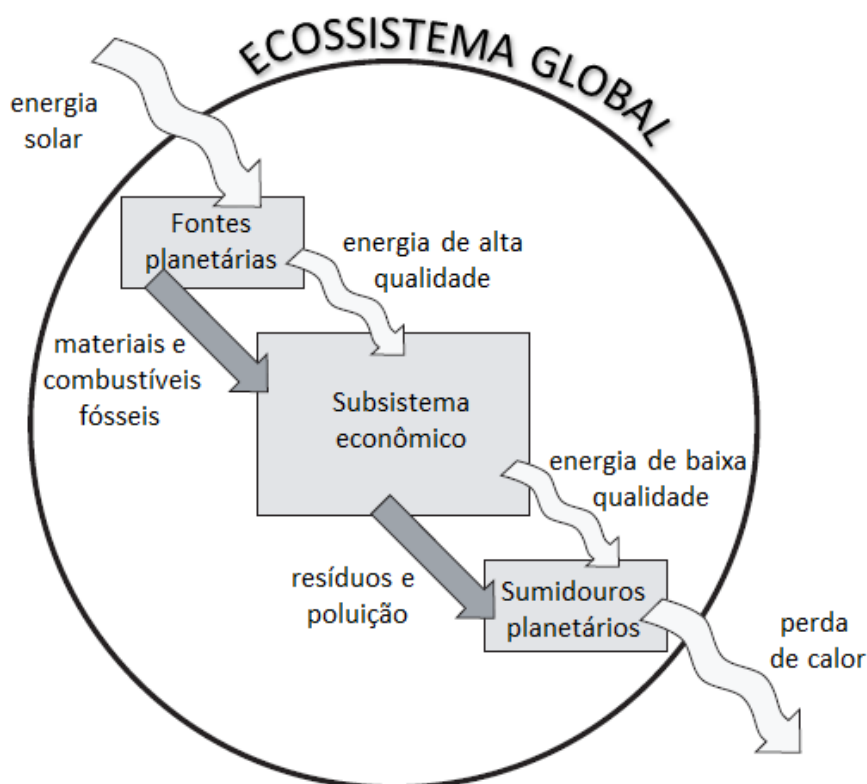
³ Também denominada ecosfera, é o conjunto dos ecossistemas da terra, também denominado ecossistema global.

⁴ Proposição do ecossistema industrial funcionar analogamente aos ecossistemas biológicos, visando o desenvolvimento econômico sem afetar o meio ambiente (FROSCH; GALLOPOULOS, 1989).

⁵ Sistema industrial restaurativo ou regenerativo, por intenção ou design (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016a).

contínuo de desenvolvimento que preserva e aprimora o capital natural, otimiza a produtividade de recursos e minimiza riscos sistêmicos por meio da gestão de estoques finitos e fluxos renováveis (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016b). Diferentes ferramentas de gestão e monitoramento do desenvolvimento sustentável também foram desenvolvidas, como a análise de fluxo de material (MFA), análise de custo-benefício (CBA), análise de entradas e saídas ambientais estendidas (EEIO) e avaliação do ciclo de vida (ACV) (LOISEAU *et al.*, 2016).

Figura 1 - Representação do Ecossistema Global



Fonte: Adaptado de Meadows, Randers, Meadows (2005)

Entre os setores que mais consomem recursos naturais está o setor de geração de energia, que, por consequência, é também um grande produtor de impactos ambientais (UNEP, 2017), pois cerca de 68% da geração de energia mundial advém dos combustíveis fósseis (IEA, 2015). De acordo com projeções da Agência Internacional de Energia (IEA), a demanda mundial por energia primária em 2040 será um terço maior do que foi no ano de 2013 (IEA, 2016). Considerando que o setor de energia foi responsável por dois terços das emissões globais de

dióxido de carbono (CO₂) em 2012 (IEA, 2015), algumas abordagens têm sido estudadas visando a mitigação das mudanças climáticas globais. Entre elas estão a melhoria da eficiência energética e promoção da conservação de energia, o aumento do uso de combustíveis de baixo carbono, o desenvolvimento das energias renováveis, a aplicação de abordagens de geoengenharia (como florestamento e reflorestamento), bem como o investimento em técnicas de captura e armazenamento de carbono (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*) (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014).

Técnicas CCS são consideradas uma parte crucial dos esforços mundiais para reduzir o aquecimento global a longo prazo, reduzindo as emissões de gases do efeito estufa (GHG, do inglês *Greenhouse Gas*) advindos principalmente do setor de energia, uma vez que permite o uso dos recursos fósseis enquanto ainda contribui para as metas de redução de emissões de CO₂. O processo de descarbonização do setor de energia prevê o monitoramento dos impactos da eficiência energética a curto prazo e a implantação de técnicas de zero ou baixo carbono, como as renováveis, nuclear e CCS a longo prazo (IEA, 2015). A oxidação é uma das principais técnicas potenciais consideradas para a captura de CO₂ na geração energia (STANGER *et al.*, 2015) por ser uma técnica confiável (BUHRE *et al.*, 2005), relativamente simples e adequada para modernização (NEMITALLAH *et al.*, 2017), além de mais ambientalmente amigável (WILBERFORCE *et al.*, 2019).

A aplicação de técnicas de captura de carbono é reconhecida mundialmente como uma das principais alternativas para a mitigação de emissões de GHG provenientes da geração de energia elétrica, dando continuidade no uso de combustíveis fósseis. Entretanto, de acordo com o IPCC (2005)⁶, a redução líquida de emissões para a atmosfera por meio de técnicas CCS depende da fração do CO₂ capturado, além do aumento da produção de CO₂ resultantes de perda na eficiência geral das usinas ou processos industriais devido à energia adicional necessária para captura, transporte e armazenamento. Assim, estudos de ACV têm sido utilizados para a verificação de seu desempenho ambiental, mesmo antes da normatização da metodologia ACV, conforme artigos publicados por Waku *et al.* (1995) e Akai *et al.* (1997).

A implantação de técnicas CCS na geração de energia tem sido amplamente avaliada na literatura por meio da metodologia ACV (ODEH; COCKERILL, 2008; KOORNNEEF *et al.*, 2008; KORRE; NIE; DURUCAN, 2010; SINGH *et al.*, 2011; SINGH; STROMMAN; HERTWICH, 2011; BRANCO *et al.*, 2013; BRANDÃO *et al.*, 2013; STRAZZA; DEL

⁶ IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

BORGHI; GALLO, 2013; TROY; SCHREIBER; ZAPP, 2016; PETRESCU *et al.*, 2017; HOPPE; THONEMANN; BRINGEZU, 2018) que fornece uma avaliação sistemática dos aspectos⁷ e dos potenciais impactos ambientais⁸ de um produto ou de um sistema de serviço ao longo da sua vida, desde a aquisição de matérias-primas, passando pela produção, utilização e destinação final (ABNT, 2014a).

Diferentes autores sugerem o uso de avaliação do ciclo de vida em termos de exergia (conceito decorrente da 2ª Lei da Termodinâmica), complementarmente à ACV, visando avaliar a eficiência da energia envolvida, bem como a contabilização da energia dos recursos materiais utilizados (MICHAELIS; JACKSON; CLIFT, 1998; WALL; GONG, 2001; DEWULF; VAN LANGENHOVE, 2002; MEESTER *et al.*, 2006). Isso conduz, então, à avaliação exergética do ciclo de vida (AECV ou ELCA, do inglês *Exergetic Life Cycle Assessment*) que é a análise em termos exergéticos utilizada para quantificar o esgotamento de recursos naturais e a eficiência no uso desses recursos (CORNELISSEN; HIRS, 2002). Diferentes abordagens utilizando exergia em estudos de ACV têm sido utilizadas (BÖSCH *et al.*, 2007; DEWULF *et al.*, 2007; DEWULF; VAN LANGENHOVE, 2002; LOMBARDI, 2001; ROCCO *et al.*, 2016; SUI *et al.*, 2014).

Portanto, diante da breve fundamentação científica exposta, a pergunta de pesquisa que neste momento se coloca é: como avaliar o desempenho ambiental com enfoque exergético de uma central termelétrica de gás natural com a inserção de um sistema de captura de carbono considerando o processo e o ciclo de vida geração de energia elétrica?

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o desempenho ambiental da geração de energia elétrica de uma central termelétrica brasileira a gás natural operando em ciclo combinado com a inserção de um sistema de captura de dióxido de carbono por oxidação, apresentando e validando uma proposta conceitual para isso. A proposta conceitual apresentada agrega conceitos consolidados como termodinâmica, avaliação do ciclo de vida e avaliação exergética do ciclo de vida, que são utilizados visando uma avaliação ambiental abrangente, contemplando

⁷ Aspecto ambiental é definido como elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização, que interage ou pode interagir com o meio ambiente (ABNT, 2014a).

⁸ Impacto ambiental é a modificação do meio ambiente, tanto adversa quanto benéfica, total ou parcialmente resultante dos aspectos ambientais de uma organização (ABNT, 2014a).

níveis de processo e de ciclo de vida da geração de eletricidade. Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Resgatar, a partir de uma análise bibliométrica e posterior análise de conteúdo da literatura, propostas conceituais que abordam exergia e ACV, descrevendo as inter-relações e relevâncias para com a sustentabilidade e eficiência dos processos de geração de energia;
- ii. Identificar, também a partir de análise bibliométrica e de conteúdo, os *hotspots*⁹ dos principais estudos de ACV de captura de CO₂ por oxidcombustão;
- iii. Conduzir o levantamento de dados da central termelétrica estudada por meio de análise crítica do processo de licenciamento ambiental do empreendimento e da literatura;
- iv. Modelar os cenários do ciclo de vida da central termelétrica selecionada com e sem captura de CO₂ por oxidcombustão;
- v. Realizar a avaliação ambiental e validar a proposta conceitual utilizando os cenários modelados no item iv.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa está restrita a avaliação de desempenho ambiental utilizando uma proposta conceitual para avaliação termodinâmica e do ciclo de vida com base exergética aplicada a sistemas de geração de energia com captura de CO₂. Os cenários de geração de energia têm escopo tecnológico restrito a tecnologias maduras (geração de energia) e emergentes (geração de energia com captura de CO₂), escopo temporal de 20 anos (2002 a 2022) e escopo geográfico restrito ao Brasil.

1.4 JUSTIFICATIVA

1.4.1 Relevância e contribuições

A crescente demanda por recursos naturais, aliada à necessidade de dissociação entre crescimento econômico e de impactos ambientais, evidencia a urgência na busca por soluções tecnológicas que permitam o desenvolvimento sustentável, considerando o panorama global

⁹ Termo da ACV que representa os pontos críticos de um estudo, como atividades, processos e etapas que mais contribuem para os impactos ambientais (SILVA, 2012).

atual. É importante que o Brasil acompanhe os esforços mundiais nesse sentido e um ponto chave é o uso de recursos na geração de energia e seus impactos sobre o ecossistema global. A avaliação de sustentabilidade ambiental de um produto ou processo permite verificar seus *hotspots* com relação a impactos ambientais ou consumo de recursos. Considerando as três dimensões da sustentabilidade, atrelar o conceito termodinâmico exergia permite expandir a avaliação de sustentabilidade para as dimensões econômica e até mesmo social, conforme evidenciado na análise bibliográfica realizada anteriormente.

Do ponto de vista acadêmico, o presente estudo justifica-se por não haver sido encontrado na literatura avaliada, nenhum estudo que tenha empregado conceitos de exergia aliados a ACV aplicados em processos de geração de energia com captura de CO₂ por oxidação para a realidade brasileira. Do ponto de vista industrial, justifica-se por meio de evidenciada ausência da aplicação da metodologia ACV com abordagem de exergia em processos de geração de energia termelétrica a gás natural.

Portanto, este estudo pretende contribuir com a sociedade e a indústria à medida que busca evidenciar os pontos de maior consumo de recursos e impactos ambientais, bem como os custos do CO₂ emitido nos sistemas de geração de energia com e sem captura de CO₂, a fim de auxiliar no processo de tomada de decisão no que se diz respeito ao planejamento energético e de recursos. Os resultados desse estudo também objetivam estimular o desenvolvimento futuro de sistemas de abastecimento sustentáveis de exergia para o setor energético brasileiro, de acordo com projeções futuras que apontam para expansão da geração termelétrica de 7% para 15% em 2030 (EPE, 2007).

Com a realização deste trabalho espera-se também contribuir com a inclusão do tema ACV na linha de pesquisa de gestão ambiental e sustentabilidade da área de Energia do mestrado/doutorado em Engenharia Mecânica da FEG/UNESP. Espera-se contribuir também com a formação, de recursos humanos (pesquisadores, doutorandos, mestrandos e alunos de iniciação científica) no tema ACV, pessoas que provavelmente serão multiplicadores da pesquisa proposta nesta tese.

1.4.2 Estudos anteriores

Visando buscar hipóteses abandonadas por pesquisas prévias e também confirmar se algum trabalho anterior respondeu adequadamente à pergunta de pesquisa proposta, foi realizada uma busca na literatura e feita uma análise crítica dos estudos encontrados sobre o tema.

As pesquisas ocorreram no período de Janeiro de 2016 a Janeiro de 2019, utilizando as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Classificou-se as palavras-chave utilizadas para conjugar o tema da tese em três subtemas principais: avaliação do ciclo de vida, captura de carbono e exergia. Realizou-se as buscas utilizando as palavras-chave selecionadas para os subtemas, cujos sinônimos e variantes terminológicas utilizados como *strings* de pesquisa bem como os operadores booleanos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Palavras-chave e combinação dos *strings* de pesquisa selecionados

Palavra-chave	Termo	Operador booleano	Termo	Operador booleano	Termo
avaliação do ciclo de vida	<i>“life cycle assessment”</i>	OR	<i>“life cycle analysis”</i>	OR	<i>lca</i>
		AND			
exergia	<i>exerg*</i>				
		AND			
captura de carbono	<i>“carbon capture”</i>	OR	<i>“co2 capture”</i>	OR	<i>“carbon dioxide capture”</i>

Fonte: Produção do próprio autor

Não se utilizou filtro adicional nas buscas e, após a busca nas bases selecionadas e a remoção de ocorrências duplicadas, foram encontrados 18 documentos publicados até o ano de 2018 (15 artigos publicados em revistas indexadas, 1 artigo de revisão e 2 artigos publicados em conferências). Desses 18 documentos, quatro foram excluídos por indisponibilidade para leitura ou incompatibilidade com os temas de pesquisa. Os 14 documentos restantes foram lidos e os aspectos metodológicos utilizados pelos autores e os principais resultados encontrados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Aspectos metodológicos e principais resultados dos artigos selecionados

(continua)

Autor / Revista	Aspectos metodológicos			Principais resultados
	ACV	Exergia	Captura de CO ₂	ACV + Exergia + Captura de CO ₂
Corrado; Fiorini; Sciubba (2006) / Energy	<i>Ecoindicator'95</i> (GWP com adequações) utilizando <i>SimaPro 5.1</i> . Abordagem do berço ao túmulo.	Análise estendida de exergia, <i>EEA</i>	Processo de gaseificação de carvão com produção de hidrogênio e captura de CO ₂ por <i>calcium looping</i> para posterior carbonatação mineral	A contabilização dos custos externos proposta pela <i>EEA</i> mostrou que a real eficiência energética do sistema diminui de 41,8% para cerca de 17% com a inclusão de captura e sequestro de CO ₂ .
Petrakopoulou <i>et al.</i> (2011) / Chem Eng Res Des	Análise exergoambiental (MEYER <i>et al.</i> , 2009) associada a ACV. <i>Ecoindicator'99</i> utilizando <i>SimaPro 7.1</i> .	Análise exergoeconômica e exergoambiental	Ciclo combinado a gás natural com inserção de 3 diferentes sistemas de captura por oxidação e 1 sistema de pós-combustão (absorção química com MEA).	As usinas com oxidação apresentaram o dobro do custo de investimento resultando em um aumento mínimo de 23% no custo da eletricidade. Porém elas se mostraram mais eficientes que usinas com captura via pós-combustão com impacto ambiental cerca de 19-27% menor.
Petrakopoulou; Tsatsaronis; Morosuk (2011) / ASME IMECE	ACV acoplada a análise exérgica em uma análise exergoambiental.	Análise exergoambiental avançada.	Ciclo combinado a gás natural com inserção de captura por oxidação utilizando reator de membrana condutora mista (MCM).	Verificou-se fortes interações entre os componentes do reator de membrana condutora mista (MCM) e os componentes que constituem a unidade de compressão de CO ₂ . Resultados valiosos na busca pela melhoria do desempenho ambiental da planta.
Tock; Marechal (2012) / Energy	ACV do berço ao portão com foco no método de avaliação de impacto <i>GWP₁₀₀</i> .	Eficiência exérgica e uso de modelos termo-econômicos.	Conversão de madeira por processo termoquímico (gaseificação) para produção de calor, eletricidade e H ₂ com captura de CO ₂ via absorção química com aminas.	Por meio de otimização multi-objetivo foram alcançadas eficiências energéticas na faixa de 60% para a produção de H ₂ e cerca de 39% para a produção de eletricidade com captura de CO ₂ , sendo desta forma alternativas competitivas.

Quadro 2 - Aspectos metodológicos e principais resultados dos artigos selecionados

(continuação)

Autor / Revista	Aspectos metodológicos			Principais resultados
	ACV	Exergia	Captura de CO ₂	ACV + Exergia + Captura de CO ₂
Nduagu; Bergerson; Zevenhoven (2012) / <i>Energ Convers Manage</i>	ACV do berço ao túmulo com foco no método de avaliação de impacto <i>GWP</i> .	Análise exergética	Termelétricas a carvão e gás natural com inserção de captura via carbonatação mineral utilizando silicato de magnésio por meio do método de mineralização da Universidade <i>Åbo Akademi</i> (ÅAU). Os resultados são comparados com o processo desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Tecnologia de Energia (NETL).	Os resultados das análises evidenciaram que mineralização de 1 t-CO ₂ requer 3,6 GJ/t-CO ₂ (ÅAU), e 3,4 GJ/t-CO ₂ (NETL) e ambos emitem 517 (ÅAU) e 683 kg CO ₂ e (NETL) de gases de efeito estufa para cada tonelada de CO ₂ mineralizada em serpentinito.
Benhelal <i>et al.</i> (2013) / <i>J Clean Prod</i>	Artigo de revisão que aborda dois estudos que utilizaram ACV para avaliação de processos e materiais alternativos.	Entre os artigos revisados, quatro efetuaram análise exergética dos processos.	Entre os artigos revisados, dois consideram captura de CO ₂ (oxicombustão e pós-combustão) na produção de cimento.	De três estratégias de redução de CO ₂ , a economia de energia mostrou melhores resultados do que captura e armazenamento de carbono ou utilização de materiais alternativos como resíduos.
Iribarren; Petrakopoulou; Dufour (2013) / <i>Energy</i>	ACV do portão ao portão com foco no método demanda acumulada de energia (CED).	Análise exergética	Quatro usinas a carvão com diferentes tipos de captura de CO ₂ foram avaliadas: absorção química com MEA, separação por membranas, separação criogênica e adsorção (PSA).	A demanda acumulada de energia mostrou que a integração de estratégias aprimoradas de recuperação de recursos foi necessária para obter balanços favoráveis de energia no ciclo de vida.

Quadro 2 - Aspectos metodológicos e principais resultados dos artigos selecionados

(continuação)

Autor / Revista	Aspectos metodológicos e principais resultados			Principais resultados
	ACV	Exergia	Captura de CO ₂	ACV + Exergia + Captura de CO ₂
Gładysz, Ziebiak (2015) / Energy	Análise de entradas e saídas (IO), ACV do berço ao túmulo com <i>Ecoindicator'99</i> .	Avaliação do custo termoecológico do ciclo de vida (TEC_{LCA}).	Usina a carvão com captura de CO ₂ por oxidcombustão.	A etapa de operação da usina a carvão predominou os impactos considerando o <i>TEC</i> . Foi sugerido também dedicar mais atenção à avaliação adequada do <i>TEC</i> do suprimento de carvão.
Jana; De (2016) / Bioresource Technol	ACV do berço ao portão, uso do Software SimaPro e foco no método de avaliação de impacto GWP_{100} .	Análise exergética e alocação ¹⁰ baseada em exergia.	Poligeração a partir de palha de arroz com captura de CO ₂ por meio da reação de síntese do etanol.	Fatores como a densidade de distribuição de biomassa, a taxa de produção de etanol e a distância de transporte de CO ₂ afetaram a emissão líquida de GEE.
Jana; De (2017) / Bioresource Technol	ACV do berço ao portão e método AICV de ponto médio <i>CML 2001</i> e ponto final <i>Eco-indicator 99</i> .	Análise exergética e alocação baseada em exergia.	Poligeração a partir de palha de arroz com captura de CO ₂ por absorção química com MEA.	A logística da biomassa causou impactos ambientais significativos nos processos unitários da poligeração. O impacto ambiental do ciclo de vida também foi afetado pelo catalisador e pela densidade de distribuição da biomassa.
Yang et al. (2018) / Renew Energ	Abordagem do berço ao túmulo e uso de inventários do ciclo de vida.	Análise de Consumo cumulativo ecológico de exergia, <i>ECEC (Ecological Cumulative Exergy Consumption)</i>	Não considerado.	A substituição de petróleo reduziu as emissões de CO ₂ para <i>BTL (biomass-to-liquid)</i> e aumenta para <i>CTL (coal-to-liquid)</i> . O método <i>ECEC</i> forneceu uma maneira significativa de integrar os recursos do ciclo de vida, os fatores econômicos e ambientais.

¹⁰ Distribuição proporcional das entradas e saídas de um processo ou sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas de produto (ANDERER et al., 2014).

Quadro 2 - Aspectos metodológicos e principais resultados dos artigos selecionados

Autor / Revista	Aspectos metodológicos e principais resultados			(conclusão)
	ACV	Exergia	Captura de CO ₂	ACV + Exergia + Captura de CO ₂
Kanbur <i>et al.</i> (2018) / J Clean Prod	Avaliação do custo ambiental total baseado no ciclo de vida (TEP_{LC}) com foco em emissões de CO ₂ .	Não considerado.	Sistema combinado de utilização de GNL a frio é (motor Stirling e microturbina) com captura criogênica de CO ₂ .	O sistema de dióxido de carbono criogênico para captura de CO ₂ em pequena escala aplicado a microturbinas se mostrou viável do ponto de vista termodinâmico.
Groesbeck; Pearce (2018) / Sci Rep-UK	Abordagem do berço ao túmulo, uso do Software SimaPro v.8 e métodos de avaliação de impacto $CExD$ v.1.03 e $GWP_{100..}$.	Avaliação exérgica do ciclo de vida por meio do método de demanda acumulada de exergia ($CExD$).	Usina a carvão com bio-sequestro de CO ₂ por <i>switchgrass</i> e com captura de CO ₂ por absorção química com MEA.	Usinas fotovoltaicas se mostraram uma solução melhor que geração de eletricidade a carvão considerando o conceito de clima neutro (no qual as emissões de GEE são eliminadas) e os parâmetros exergia, emissões de GEE e uso da terra.
Wu <i>et al.</i> (2018) / Appl Energ	Abordagem do berço ao portão, uso do Software SimaPro v.8.2 e método de avaliação de impacto $GWP_{100..}$.	Avaliação exérgica com determinação do fator de impacto ambiental ($EIFc$) e do índice de sustentabilidade exérgica ($ESIC$).	Usina a carvão com captura de CO ₂ via pós-combustão.	A diminuição de empresas de coqueificação independentes na China pode auxiliar na melhoria da utilização de energia e redução de emissões. Potenciais de melhoria na rede de coqueificação também foram identificados.

Fonte: Produção do próprio autor

1.4.3 Considerações gerais e oportunidades

A partir da análise dos artigos encontrados, é possível inferir que a questão de pesquisa proposta ainda não foi respondida. A pesquisa permitiu constatar que novos métodos, aliando exergia a avaliação do ciclo de vida, têm sido concebidos com o intuito de verificar a eficiência exergética do ciclo de vida de diferentes processos visando sua sustentabilidade.

Com relação a metodologia ACV, a maioria dos estudos, apesar de analisar diferentes categorias de impacto¹¹, vê como prioridade a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) utilizando o método de categoria única potencial de aquecimento global (*GWP*), indicador que está diretamente ligado aos impactos do aspecto ambiental emissões de GEE. Outro método de AICV bastante utilizado é o Eco-Indicator, que apresenta os impactos ambientais por um único indicador de pontuação, requerendo a ponderação de diferentes impactos. Os métodos CML2001, CED e CexD também foram utilizados, visto o enfoque exergético desses estudos.

Métodos de análise exergética foram acoplados a métodos de avaliação do ciclo de vida, abordando a dimensão ambiental da sustentabilidade e resultando nos seguintes métodos: Demanda acumulada de exergia (*CExD*) e Análise exergoambiental avançada. Métodos de análise exergética foram acoplados a métodos exergoeconômicos e de avaliação do ciclo de vida, abordando duas dimensões da sustentabilidade (ambiental e econômica) resultando nos seguintes métodos: Análise exergoeconômica em conjunto com Análise exergoambiental; Avaliação do custo termoecológico do ciclo de vida (*TEC_{LCA}*); Consumo cumulativo ecológico de exergia (*ECEC*); Avaliação exergética com determinação do fator de impacto ambiental (*EIFc*) e do índice de sustentabilidade exergética (*ESIc*). Encontrou-se um único método abordando as três dimensões da sustentabilidade (ambiental, econômica e social): Análise estendida de exergia, *EEA*.

Processos de geração de energia (eletricidade e vapor), hidrogênio, combustíveis líquidos, biocombustíveis, coque e cimento foram abordados pelos estudos selecionados. Técnicas de captura de CO₂ têm sido investigadas visando a descarbonização não só do setor de energia, mas também de outros setores como o de produção do coque na China. Entre as técnicas de captura de CO₂ abordadas, as mais utilizadas foram a pós-combustão com absorção química utilizando aminas e a oxicomustão.

Nota-se um esforço recente na utilização do conceito de exergia aliada a avaliação do ciclo de vida visando a sustentabilidade ambiental de processos que incluem a captura de CO₂

¹¹ Classe que representa questões ambientais relevantes que podem ser associadas aos resultados da análise do inventário do ciclo de vida

como solução para a descarbonização de processos. A tentativa de unificar análises de custo exergético e ACV também demonstram o esforço na utilização da exergia como um indicador de sustentabilidade abordando mais uma de suas dimensões (econômica). A utilização da exergia como indicador de sustentabilidade considerando suas três dimensões (ambiental, econômica e social) também foi considerada em estudos de processos que incluem captura de CO₂.

Observou-se então a possibilidade de estudos de exergia aplicada ao ciclo de vida e a avaliação de sustentabilidade ambiental utilizando exergia e ACV em usinas de energia com captura de CO₂ no contexto brasileiro do setor, visando atender as metas de descarbonização do setor de energia nacional.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese está estruturada em seis capítulos. No capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais sobre avaliação ambiental por meio a ACV, exergia e seus aspectos ambientais e econômicos com destaque para avaliação exergética com abordagem do ciclo de vida e teoria do custo exergético, sistemas de geração de energia e técnicas de captura de CO₂ com enfoque em oxidação em ciclo combinado a gás natural. São apresentadas ainda neste capítulo duas revisões bibliométricas e análise de conteúdo abrangendo os seguintes temas: (1) Exergia e ACV visando embasar a proposta conceitual, bem como explicitar o ineditismo desta proposta e (2) ACV e captura de CO₂ com o intuito de caracterizar as principais propostas conceituais e objetos de estudos avaliados na literatura científica a respeito de captura de CO₂. Posteriormente são apresentados os principais estudos que contribuíram para embasar os cenários selecionados para validar a proposta conceitual.

No capítulo 3 são descritos os aspectos metodológicos com destaque para o tipo de pesquisa adotado para a tese. Os materiais e métodos adotados para atingir os objetivos da tese são descritos em seguida.

No capítulo 4 são apresentadas as duas primeiras fases do estudo de ACV: Definição de objetivo e escopo e Inventário do Ciclo de Vida (ICV). A definição de objetivo e escopo (primeira fase da ACV) apresenta a abrangência, limitações e aplicação do produto obtido pelo estudo. O ICV (segunda fase) fornece as informações necessárias para permitir a realização da ACV dos cenários propostos e, conseqüentemente da proposta conceitual, por meio da realização de coleta de dados.

No capítulo 5 são descritos o desenvolvimento da avaliação energética e exergética e avaliação de impacto do ciclo de vida (fase 3 da ACV). Os resultados obtidos por meio da proposta conceitual são apresentados, interpretados, avaliados e discutidos.

No capítulo 6 encerra-se a tese com a apresentação de suas principais contribuições, considerações finais, oportunidades de pesquisa identificadas e sugestões de trabalhos futuros. Apresenta-se no anexo da tese as informações suplementares da análise energética e exergética (Apêndice A) e das análises CExC e TEC (Apêndice B).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi realizada a revisão bibliográfica a fim de satisfazer os objetivos específicos (i) e (ii). Primeiramente são apresentadas a fundamentação teórica, contemplando os conceitos e definições. Posteriormente, por meio de análise bibliométrica e bibliográfica, são apresentadas as relações estabelecidas entre: (1) Exergia e ACV e (2) ACV e captura de CO₂, sendo descritos os principais estudos que serviram como embasamento teórico para a tese.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Os primeiros estudos de quantificação de uso de recursos naturais e emissões de poluentes foram realizados na década de 1960 e nos anos 1990 o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida foi padronizado¹² e normatizado¹³ como metodologia de avaliação ambiental. Desde então o interesse em pesquisas nessa linha tem se intensificado, visto que o método fornece dados quantitativos de desempenho ambiental para a verificação de atendimento de critérios ambientais estabelecidos e por essa razão é amplamente utilizado nos setores industrial e governamental.

Ao comparar a ACV com diferentes métodos de contabilidade ambiental (entre eles: análise energética (EA), análise emergética (EmA), análise ambiental de entrada-saída (EIO), Pegada Ecológica (EF) e Pegada de Carbono (CF)), Patterson, McDonald e Hardy (2017) destacam que a ACV possui a metodologia mais sistemática e amplamente aceita entre eles.

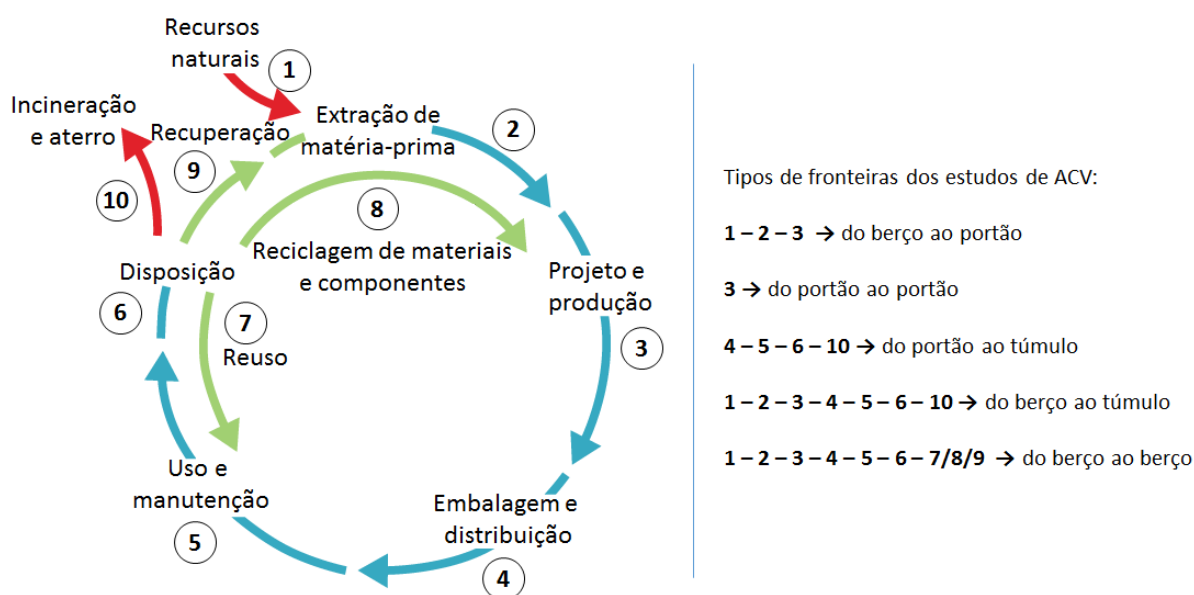
A ACV difere dos outros métodos de contabilidade ambiental com relação ao foco em "produtos" ou "serviços", sendo definida como uma ferramenta de compilação e avaliação de entradas e saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT, 2014a). Conforme ilustrado na Figura 2, ao utilizar a ferramenta ACV, diferentes fronteiras podem ser consideradas para o sistema em estudo EC-JRC (2010). Um estudo de todo o ciclo de vida, desde a extração dos recursos até a disposição final do produto, é denominado do berço ao túmulo (do inglês *cradle-to-grave*), abordagem para a qual

¹² Por meio do Código de Prática que foi elaborado pela Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química (SETAC, 1994)

¹³ Normas 14040, 14044 e 14047 da série ABNT NBR ISO 14040, que descrevem práticas e condutas para a realização de estudos de ACV. Atualmente as normas vigentes de ACV são: ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a) 14044 (ABNT, 2014b) e 14049 (ABNT, 2014c).

a metodologia ACV foi criada (SETAC, 1994). Se for considerada somente a etapa de produção do produto em estudo, este pode ser designado do portão ao portão (do inglês *gate-to-gate*), uma alternativa viável e plausível quando informações de inventário não estão disponíveis para todo o ciclo de vida (JIMÉNEZ-GONZÁLEZ; KIM; OVERCASH, 2000). Alcançar a sustentabilidade requer uma transição de um processo linear para um processo cíclico de representação do ciclo de vida dos materiais (MIYATAKE, 1996). Se o processo de produção passa a ser considerado circular, estudos de ACV do berço ao berço (do inglês *cradle-to-cradle*) podem ser realizados. O conceito *cradle-to-cradle* (C2C) é descrito como um processo circular que modela o processo natural pelo qual os nutrientes da natureza circulam e nunca terminam em sua vida (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2002). A utilização do conceito C2C na ferramenta ACV introduz conceitos como metabolismo técnico, biomimético, regenerativo, ecossistemas, sintético e orgânico (LANFANG *et al.*, 2015).

Figura 2 - Etapas do ciclo de vida de um produto



Fonte: Adaptado de UNEP (2007)

Surgiram então a abordagem econômica, denominada avaliação ambiental de custos do ciclo de vida (*Environmental Life Cycle Costing* - LCC) (SWARR *et al.*, 2011) e social, denominada avaliação social do ciclo de vida (*Social Life Cycle Assessment* - SLCA) (JØRGENSEN *et al.*, 2008), visando abordar os três pilares da sustentabilidade. Desde então a

metodologia ACV tem sido amplamente utilizada para determinar o desempenho ambiental de produtos e processos (FINNVEDEN *et al.*, 2009). Guinée *et al.* (2011) constataram que entre 2010 e 2020 o desafio para a comunidade científica global e órgãos governamentais em relação à ACV seria a implantação da avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida (*Life Cycle Sustainability Assessment* – LCSA) que abrange as dimensões ambiental (LCA), econômica (LCC) e social (SLCA) (KLOEPFFER, 2008).

Um estudo de ACV é composto por quatro fases que se relacionam de maneira iterativa: (1) Definição de objetivo e escopo, (2) Análise do inventário do ciclo de vida (ICV), (3) Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e (4) Interpretação dos resultados (ABNT, 2014a). Na primeira etapa são definidas as razões, aplicações previstas, limitações do estudo e público-alvo. São definidos também o sistema de produto (função, unidade funcional (UF) e fluxo de referência), delimitadas suas fronteiras e solucionadas as questões de multifuncionalidade¹⁴ (por meio de alocação, subdivisão, expansão ou substituição). Outros pontos importantes nesta etapa são a escolha da metodologia AICV, os requisitos de qualidade dos dados a serem utilizados (fontes de dados e cobertura temporal, geográfica e tecnológica), pressupostos e limitações, tipo de revisão crítica e planejamento da comunicação dos resultados.

No ICV, etapa de análise do inventário, é realizada a coleta, tratamento e agregação dos dados de entrada e saída, bem como processos de alocação. A primeira definição importante nessa etapa é a modelagem do estudo, que pode ser atribucional (na qual o sistema é incorporado a uma tecnosfera¹⁵ estática) ou consequential (na qual o sistema é incorporado a uma tecnosfera dinâmica) EC-JRC (2010). Os dados podem ser coletados diretamente no processo (dados primários) ou obtidos por meio da literatura ou em bases de dados (dados secundários). Dentre as 16 bases de dados listadas por Silva (2016), a mais utilizada atualmente é a base de dados suíça Ecoinvent e uma delas é brasileira (SICV Brasil).

A AICV tem como objetivo estudar a significância e entender os potenciais impactos ambientais a partir dos resultados do ICV. Esse processo é realizado por meio da associação dos dados de inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria¹⁶. Na AICV primeiramente são selecionadas as categorias de impacto, indicadores de categoria e

¹⁴ Característica de um processo ou sistema multifuncional, que executa mais de uma função e tem mais de um produto como saída (EC- JRC, 2010).

¹⁵ Parte do planeta constituída por sistemas nos quais ocorrem transformações humanas para a fabricação de produtos (SILVA, 2016).

¹⁶ Representação quantificável de uma categoria de impacto (ABNT, 2014b).

modelos de caracterização¹⁷, posteriormente é realizada a correlação dos resultados do ICV com as categorias de impacto às quais eles contribuem potencialmente (etapa denominada classificação) (ANDERI *et al.*, 2014) e então calculados os resultados dos indicadores de categoria (etapa denominada caracterização) (ABNT, 2014a). Outros procedimentos como normalização¹⁸, agrupamento¹⁹ e ponderação²⁰ são opcionais (ABNT, 2014b). Entre as categorias de impacto utilizadas destacam-se o potencial de acidificação (PA), potencial de aquecimento global (PAG), potencial de depleção da camada de ozônio (PDCO), potencial de depleção de recursos (PDR), potencial de ecotoxicidade (PEc), potencial de formação fotoquímica de ozônio (PFFO), potencial de radiação ionizante (PRI) e potencial de toxicidade humana (PTH) (SILVA, 2016). Os denominados métodos de AICV são um agrupamento de categorias de impacto e podem ser categorizados por método de contabilização de recursos (*Resource Accounting Methods* – RAM) de ponto médio (*Midpoint*) ou método de ponto final (*Endpoint*) (Figura 3). Escolher o mais adequado ao estudo torna-se imprescindível para torná-lo mais confiável e mais próximo da realidade. Entre os métodos de abrangência global estão: CML, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI e USEtox (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

Apesar de haver muitos métodos de AICV ainda não existe nenhum método que leve em consideração a realidade brasileira (SILVA, 2012). Devido à grande quantidade de dados que são gerados e o tempo requerido nos cálculos durante o ICV, houve a necessidade de desenvolvimento de softwares que auxiliam na AICV. Atualmente existem muitos softwares que realizam estes serviços, entre os principais estão o BEES 3.0®, o GaBi®, o Umberto®, o SimaPro®, dentre outros (CAMPOLINA, 2015).

¹⁷ Simulação matemática do mecanismo ambiental de determinada categoria de impacto que possibilita converter os resultados do ICV ao resultado do indicador de categoria (ANDERI *et al.*, 2014).

¹⁸ Procedimento que consiste na conversão dos valores de categoria de impacto a uma mesma unidade (ANDERI *et al.*, 2014).

¹⁹ Correlação das categorias de impacto em um ou mais conjuntos, conforme critérios estabelecidos na definição de objetivo e escopo (ANDERI *et al.*, 2014).

²⁰ Atribuição de pesos aos valores dos resultados dos indicadores de impacto ambiental normalizados (ANDERI *et al.*, 2014).

Figura 3 - Caminho do impacto



Fonte: Adaptado de EC- JRC (2010)

A última etapa da ACV, denominada Interpretação do Ciclo de Vida, deve conter: (i) identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de ICV e AICV; (ii) avaliação do estudo, considerando verificações de completeza, sensibilidade e consistência e (iii) conclusões, limitações e recomendações. Uma avaliação criteriosa dos resultados deve ser realizada, visando detectar a influência de incertezas nos resultados obtidos. De acordo com Lloyd e Ries (2007), existem três categorias de incerteza em estudos de ACV: (i) parâmetro: erros de medição, variabilidade ou escassez de dados (ICV); (ii) cenário: associada as escolhas metodológicas (alocação, unidade funcional, etc); e (iii) modelo: uso de modelos matemáticos e fatores de caracterização (AICV) (SILVA *et al.*, 2016).

A partir dos resultados encontrados, deve-se efetuar análise de sensibilidade para determinar o quanto as incertezas de cenário afetaram os resultados da AICV. A análise de sensibilidade é importante pois evidencia os principais impactos que alterações nos diversos processos têm sobre o resultado final (ABNT, 2014a). Pode ser conduzida também uma simulação de Monte Carlo, para analisar a incerteza total associada às entradas e saídas dos processos do sistema de produto.

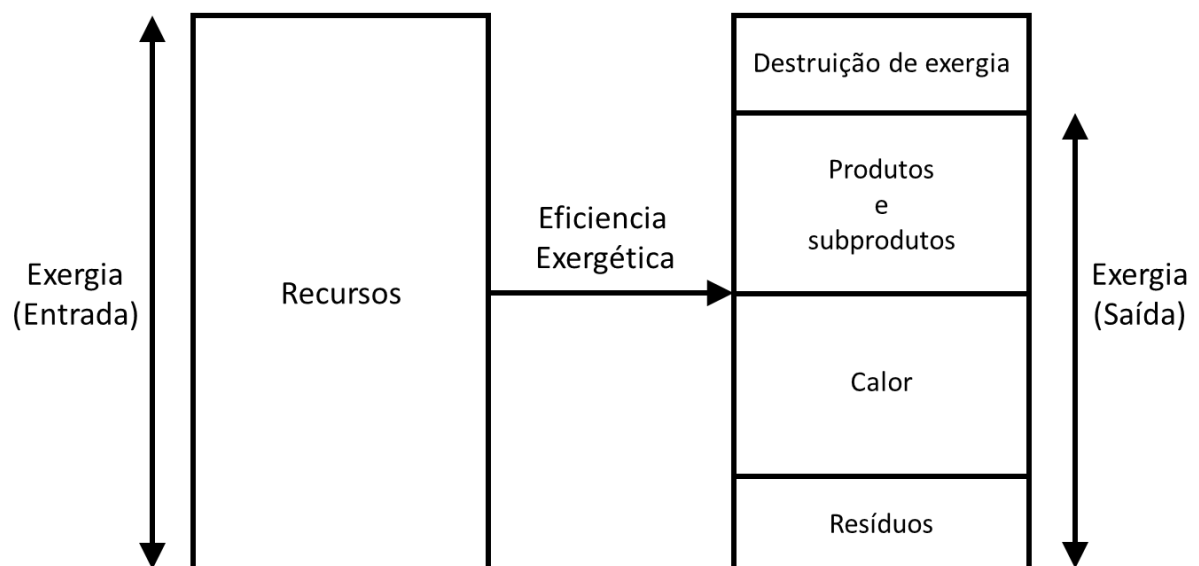
2.1.2 Exergia

De acordo com Sciubba e Wall (2007), exergia pode ser definida como o máximo trabalho útil teórico obtido de um sistema colocado em equilíbrio termodinâmico com o ambiente por meio de processos nos quais esse sistema interage somente com este ambiente. Essa é a

definição moderna de exergia, que tem suas bases nos estudos de Carnot e Gibbs realizados no século 19. O uso de análises em termos de exergia tem vantagem sobre análises em termos de energia pois utiliza a primeira e segunda leis da Termodinâmica e permite uma análise não só quantitativa, mas também qualitativa (HARTONO; HEIDEBRECHT; SUNDMACHER, 2012) (Quadro 3).

Sabe-se que as ideias de Clausius sobre irreversibilidade associada ao conceito de entropia conduziram à segunda lei de Termodinâmica, que dita que as irreversibilidades produzem uma degradação contínua de energia (Figura 4). A entropia pode ser definida como uma medida do caos ou de desordem enquanto a exergia como uma medida de ordem (ROSEN; DINCER, 1997). Portanto, irreversibilidades como atrito, mistura, reações químicas, transferência de calor com diferença finita de temperaturas e expansão não resistida sempre geram entropia, e consequentemente destroem exergia e, então, a exergia destruída é proporcional à entropia gerada (CENGEL; BOLES, 2002).

Figura 4 - Degradação de exergia em um processo real



Fonte: Adaptado de Dewulf *et al.* (2008)

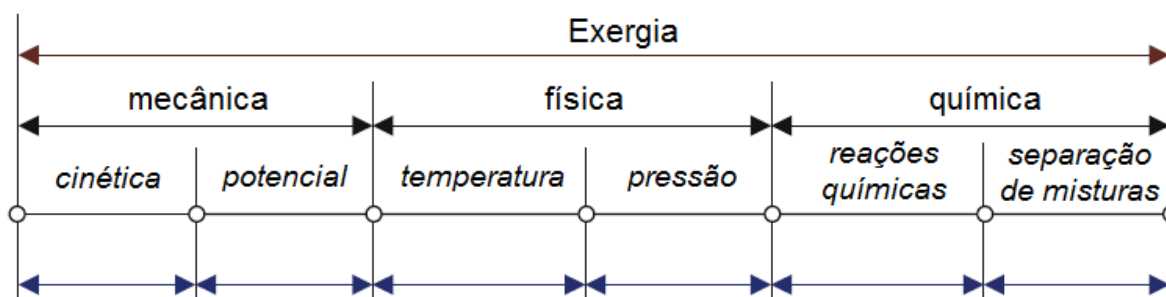
Quadro 3 - Comparação entre energia e exergia

Energia	Exergia
Depende das propriedades de apenas matéria ou fluxo de energia, e independente das propriedades do ambiente.	Depende das propriedades da matéria ou fluxo de energia e do meio ambiente.
Tem valores diferentes de zero quando em equilíbrio com o ambiente.	Igual a zero quando no estado morto ²¹ em virtude de estar em equilíbrio completo com o meio ambiente.
Conservada para todos os processos, com base na Primeira Lei da Termodinâmica.	Conservada para processos reversíveis e não conservada para processos reais (onde é parcial ou completamente destruída devido a irreversibilidades), com base na Segunda Lei da Termodinâmica.
Não pode ser destruída nem produzida.	Não pode ser destruída nem produzida em um processo reversível, mas é sempre destruída (consumida) em um processo irreversível.
Aparece de várias formas (por exemplo, energia cinética, energia potencial, trabalho e calor) e é medida dessa forma.	Aparece de várias formas (por exemplo, exergia cinética, exergia potencial, exergia térmica) e é medida com base no trabalho realizado ou capacidade de produzir trabalho.
Uma medida apenas da quantidade.	Uma medida de quantidade e qualidade.

Fonte: Adaptado de Dincer e Rosen (2013)

Existem várias formas correspondentes de exergia para os fluxos de energia. De acordo com Szargut, Morris e Steward (1988), a exergia de uma corrente de fluido pode ser expressa como a soma das exergias potencial, cinética, física e química desconsiderando efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e de interface (Figura 5).

Figura 5 - Parcelas principais de exergia



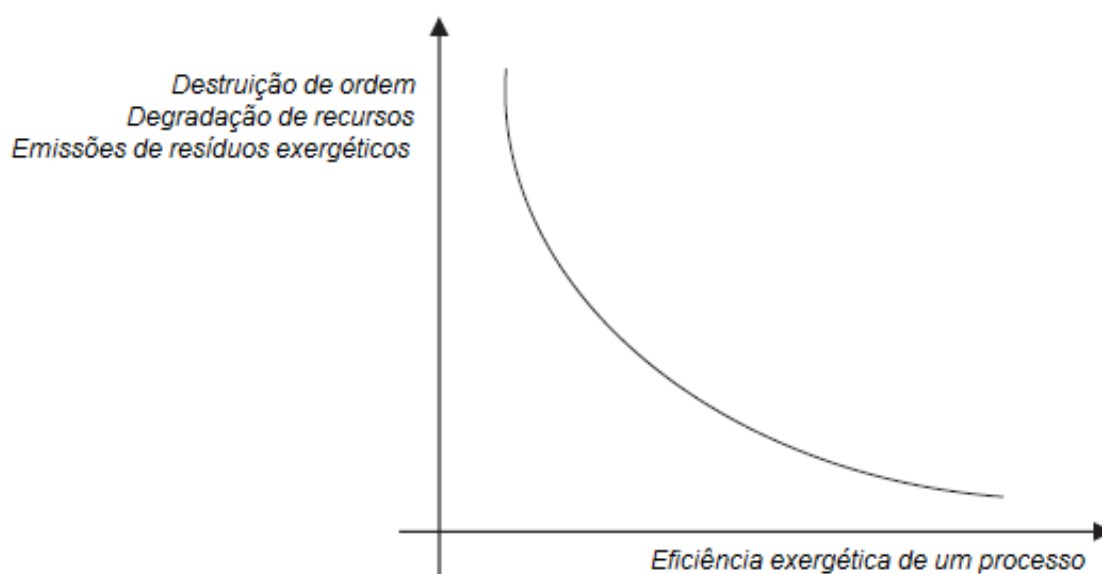
Fonte: Adaptado de Stanek (2017)

²¹ Refere-se ao estado ambiente com energia cinética zero, tomado como referência.

2.1.2.1 Aspectos ambientais da Exergia

Além de sua aplicação para análises de processos industriais, a exergia pode ser considerada uma espécie de indicador termodinâmico de impacto ambiental de um processo. A redução da eficiência exergética de um processo causa um aumento no impacto ambiental associado a esse processo, conforme ilustrado na Figura 6. Esse tema vem sendo intensamente pesquisado e, apesar da sustentabilidade não ser um conceito termodinâmico, diversos pesquisadores tentam encontrar um uso funcional da exergia na análise de questões ambientais (SCIUBBA; WALL, 2007). Diferentes métodos de avaliação ambiental com base no conceito de exergia têm sido estudados e são apresentados na seção 2.2.1.

Figura 6 - Ilustração qualitativa da relação entre eficiência exergética e impacto ambiental



Fonte: Adaptado de Dincer e Rosen (2013)

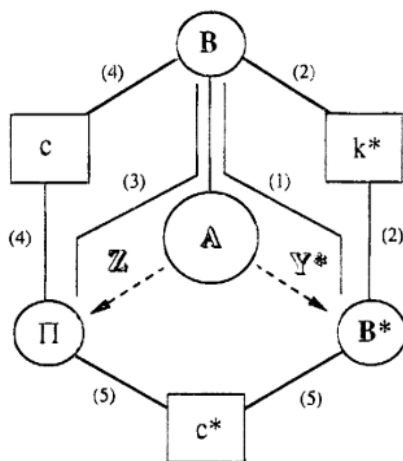
2.1.2.2 Aspectos econômicos da Exergia

Por se tratar de energia útil ou trabalho útil, a exergia é também um indicador econômico. O ramo da engenharia que combina análise exergética e princípios econômicos é denominado termoeconomia ou exergoeconomia e um de seus objetivos é determinar a base teórica da

economia de energia (LOZANO; VALERO, 1993). Baseando-se na noção de que a exergia é a única base racional para atribuir custos às fontes de ineficiências de um sistema térmico e suas interações com seu entorno, cujo conceito é denominado custo exergético, a termoeconomia fornece ao projetista ou operador do sistema informações não disponíveis por meio da análise de energia convencional e avaliação econômica, mas crucial para seu projeto e operação (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996).

O custo exergético é a quantidade de recursos necessários para produzir um fluxo. Portanto, a teoria do custo exergético (do inglês *TEC*), fornece uma justificativa para avaliação do custo de produção em sistemas de energia e ajuda a diagnosticar e otimizar sistemas de energia complexos (STANEK, 2017). Essa teoria postula que o processo de formação de custos exergéticos dos produtos é paralelo ao processo contínuo de degradação de recursos em energia. Como resultado tem-se um procedimento rigoroso de cálculo dos custos de todos os fluxos de processos de sistema com base em sua matriz de custos (Figura 7) que define as interações do sistema do ponto de vista termoeconômico (LOZANO; VALERO, 1993). Na seção 2.2.1 são apresentados diferentes métodos de avaliação econômica utilizando o conceito de exergia. As proposições da teoria do custo exergético serão apresentadas no capítulo 3.

Figura 7 - Matriz de custos econômicos e exergéticos



$$(1) \quad B^* = A^{-1} \times Y^*$$

$$(2) \quad k_i^* = B_i^* / B_i$$

$$(3) \quad \Pi = A^{-1} \times Z$$

$$(4) \quad c_i = \Pi_i / B_i$$

$$(5) \quad c_i^* = \Pi_i / B_i^*$$

A: matriz de custos

B: fluxo exergético

B*: custo exergético de um fluxo

Y*: vetor de avaliação externa

k*: custo exergético unitário

Π : vetor de custo

exergoeconômico

Z: vetor de avaliação externa

c: consumo exergoeconômico unitário

c*: custo exergoeconômico unitário

Fonte: Adaptado de Lozano e Valero (1993)

2.1.3 Geração de energia elétrica

A indústria de geração de energia é um dos maiores e mais importantes setores industriais atualmente. Essencial à vida moderna, o acesso à eletricidade tem sido um indicador de prosperidade econômica de um país. No século 19 as centrais geradoras eram baseadas em hidrelétricas e termelétricas a óleo ou carvão, com adição de centrais térmicas nucleares e a gás no século 20. Apesar de terem seu desenvolvimento iniciado no século 20, novas tecnologias de geração renováveis (solar e eólica) só se tornaram economicamente competitivas no século 21 (BREEZE, 2017). A evolução da geração de energia elétrica por tipo de fonte de 1973 para 2015 pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Geração mundial de energia elétrica por fonte em TWh

Fonte	1973	2015
Carvão, turfa e xisto	2348	9532
Óleo	1521	995
Hidráulica	1281	3881
Gás Natural	742	5554
Nuclear	202	2571
Renováveis*	37	1722
Total	6131	24255

Nota: *inclui geotérmica, solar, eólica, dos oceanos, biocombustíveis e resíduos domésticos e industriais.

Fonte: Adaptado de IEA (2017)

A conversão de energia primária em energia elétrica se dá por meio de diferentes processos de transformação: (i) de trabalho gerado por energia mecânica (por meio de turbinas hidráulicas acionadas por quedas d'água, marés ou pelo vento), (ii) da energia solar (por meio de células fotovoltaicas), (iii) de trabalho resultante de reações químicas (por meio de células a combustível) e também (iv) de trabalho resultante de aplicação de calor gerado pelo sol, por combustão (energia química), fissão nuclear ou energia geotérmica (por meio da aplicação de máquinas térmicas) (REIS, 2011).

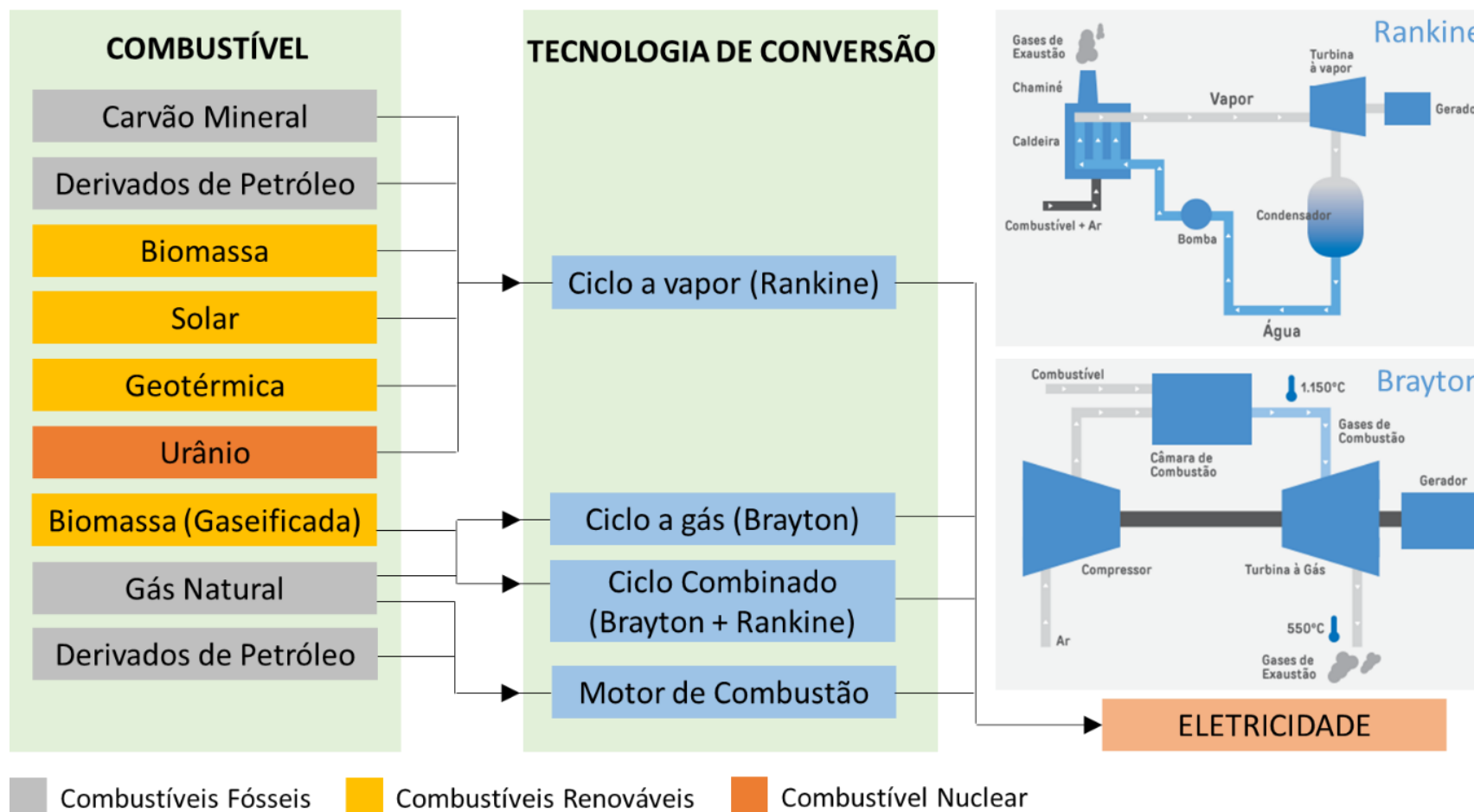
As configurações de máquinas térmicas mais utilizadas na geração de energia elétrica são Rankine (caldeira que alimenta uma turbina a vapor), Brayton (câmara de combustão que alimenta uma turbina a gás) e o ciclo combinado (Brayton-Rankine). Observa-se na Figura 8 as

tecnologias de conversão (ciclos termodinâmicos) mais apropriados para cada combustível utilizado para geração de energia elétrica atualmente.

Em uma avaliação de 19 tecnologias de geração de energia elétrica disponíveis no mundo atualmente (Tabela 2), sob uma perspectiva energético-econômica, ambiental e laboral, Kis, Pandya e Koppelaar (2018) demonstraram a sensibilidade dessas tecnologias a condições locais. Os autores também avaliaram a viabilidade da implantação futura dessas tecnologias, sendo viáveis a solar fotovoltaica na Espanha e Chile, eólica em terra e mar, geotérmica-hidrotérmica e pequenas centrais hidrelétricas; e inviáveis o gás natural liquefeito em ciclo combinado e ciclo simples a gás, óleo combustível pesado, centrais térmicas de *pellets* de biomassa, resíduos sólidos urbanos e solar fotovoltaica no Reino Unido.

Para atender as políticas de descarbonização, no máximo 10% da energia elétrica gerada poderá vir de gás natural, com centrais térmicas 50% mais eficientes ou então técnicas de captura de carbono deverão ser aplicadas (KIS; PANDYA; KOPPELAAR, 2018).

Figura 8 - Tecnologias de conversão de combustíveis em energia elétrica mais utilizadas



Fonte: Adaptado de IEMA (2016)

Tabela 2 - Tecnologias de geração de energia elétrica avaliadas

Tecnologia	Fator de carga mín. (%)	Eficiência (%)	Poder calorífico inferior do combustível (GJ/ton)	Tempo de vida (anos)
Carvão Pulverizado	62	42	22	40
IGCC (carvão pulverizado)	62	42	22	40
Carvão linhito	62	38	9	40
CCGT (carga de base)	62	50	48	34
CCGT (contínua)	44	46	48	34
SCGT (carga de pico)	8	32	48	34
SC c/ Óleo Pesado (carga de pico)	24	29	42,8	34
Biomassa (RSU)	53	20	9,3	45
Biomassa (<i>pellets</i>)	62	32	17,3	40
Nuclear	40	33	5014000	40
Geotérmica-hidrotérmica	41	n.i.	n.i.	30
Geotérmica avançada	41	n.i.	n.i.	30
Eólica em terra	14	n.i.	n.i.	25
Eólica no mar	20	n.i.	n.i.	25
Hidrelétrica (barragem)	11	n.i.	n.i.	60
Hidrelétrica (queda d'água)	30	n.i.	n.i.	60
Solar fotovoltaica	13,6	n.i.	17	25
Solar Concentrada (CSP)	15	n.i.	n.i.	30
Solar Concentrada (CSP:12h)	30	n.i.	n.i.	30

Nota: IGCC (Ciclo combinado com gaseificação integrada), CCGT (Ciclo combinado com turbina a gás), SCGT (Semi-closed gas turbine), SC (Simple cycle), n.i. (não informado).

Fonte: Adaptado de Kis, Pandya e Koppelaar (2018)

2.1.4 Captura e Armazenamento de Carbono

Técnicas de captura de carbono têm sido utilizadas desde 1920 para separar CO₂ do metano em reservatórios de gás natural. Em 1970 esse CO₂ foi canalizado e injetado para impulsionar a produção de petróleo nos EUA, processo conhecido como recuperação avançada de petróleo (EOR – *Enhanced Oil Recovered*) (IEAGHG, 2013). A princípio a técnica era utilizada na tentativa de recuperar o CO₂ antropogênico²² para fins comerciais, e posteriormente se tornou atrativa para redução de emissões de GHG e consequente mitigação das mudanças climáticas. Nos anos 1980, Baes *et al.* (1980) publicaram um capítulo de livro no qual discutem a captura, disposição e armazenamento de CO₂, com ênfase para processos de captura utilizando

²² Advindo da atividade humana.

processos de absorção química²³ e oxidação²⁴ e posterior disposição do CO₂ em água profundas do oceano.

A partir dos anos 1990 foram publicados artigos sobre processos de captura e armazenamento de CO₂ em revistas especializadas com destaque para os trabalhos de Dunsmore (1992) que propõe a remoção de CO₂ por meio de sua reação com água salina rica em cálcio, produzindo carbonato de cálcio e ácido clorídrico; e Silaban e Harrison (1995) que realizaram um estudo experimental avaliando a reação entre óxido de cálcio (CaO) e CO₂ como alternativa para sua captura, técnica posteriormente denominada *Calcium Looping*. Ainda em 1995, foi publicado um artigo avaliando o balanço energético do ciclo de vida e as emissões de CO₂ de dois ciclos combinados (LNG e IGCC) utilizando captura de CO₂ por absorção química e armazenamento no oceano (caso 1) e absorção física e armazenamento subterrâneo (caso 2). Os resultados mostraram uma redução na taxa de energia líquida em 16 a 38% (caso 1) e 24 a 61% (caso 2) e redução de emissão específica de CO₂ na faixa de 61 a 69% no caso 1 e 65 a 76% no caso 2 (WAKU *et al.*, 1995).

Em um artigo publicado por Riemer (1996), os resultados dos três primeiros anos de pesquisas do programa de Pesquisa e Desenvolvimento de Gases do Efeito estufa da IEA foram avaliados. Ao analisar as diferentes formas de geração termelétrica e os diferentes processos de captura e armazenamento de CO₂ disponíveis, concluiu-se que a seleção da técnica de captura de CO₂ mais apropriada depende do tipo de central termelétrica, e sua inserção eleva o custo da geração de energia e diminui a eficiência da instalação. Quanto ao armazenamento, apesar das técnicas propostas ainda não haverem sido provadas, os custos estimados seriam baixos. Meisen e Shuai (1997) revisaram as principais técnicas de captura de CO₂ existentes na época (absorção química e física²⁵, adsorção²⁶, separação por membranas²⁷, separação criogênica²⁸ e ciclos de combustão com CO₂/O₂ ou oxidação) e concluíram que os processos de absorção eram considerados os mais praticáveis devido ao seu desenvolvimento.

²³ Processo de transferência de um componente em fase gasosa para uma fase líquida na qual este é solúvel, onde ocorre uma reação química entre ambas as fases (KOHL; NIELSEN, 1997).

²⁴ Processo no qual o nitrogênio é removido do ar antes da combustão, gerando produtos de combustão com até 90% de CO₂ (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2012).

²⁵ Processo de transferência de um componente em fase gasosa para uma fase líquida na qual este é solúvel, no qual as fases não reagem quimicamente (KOHL; NIELSEN, 1997).

²⁶ Processo que permite a concentração seletiva de um ou mais componentes na superfície de um sólido microporoso quando aplicado à purificação de um gás (KOHL; NIELSEN, 1997).

²⁷ Processo que, quando aplicado a gases, envolve a separação de componentes individuais por meio de uma fina barreira de membrana com base na diferença de taxa de permeação (KOHL; NIELSEN, 1997).

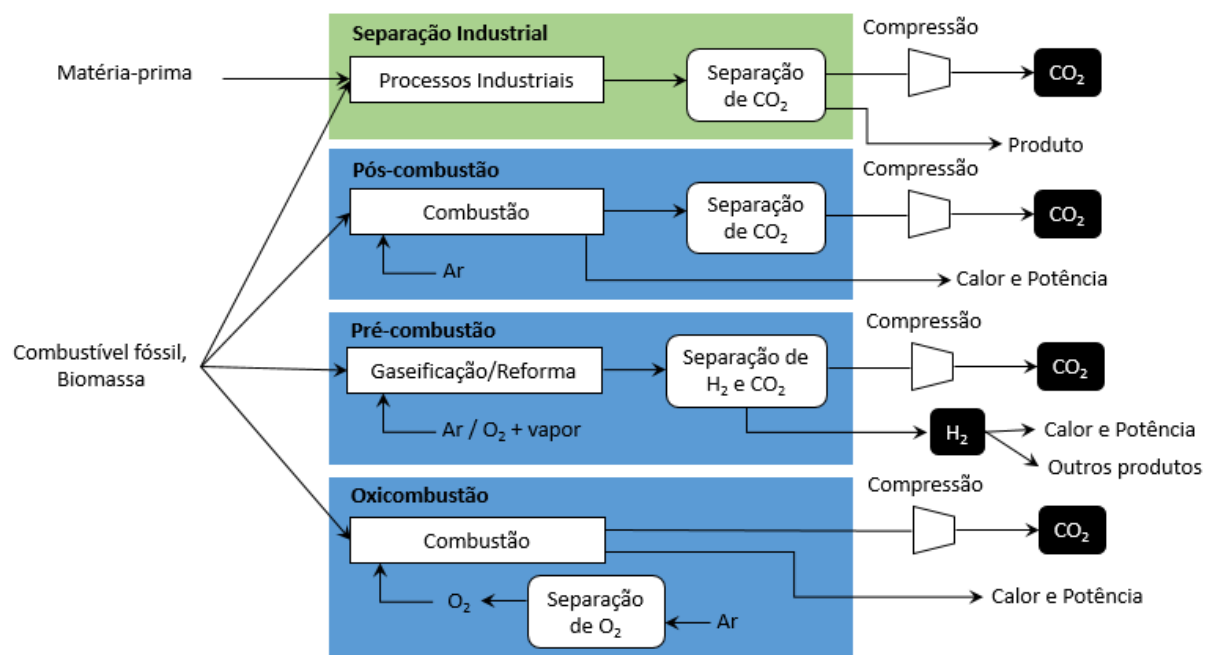
²⁸ Processo físico no qual componentes de misturas gasosas são separados por uma série de etapas de compressão, refrigeração e separação (XU *et al.*, 2014).

Com o crescente interesse sobre o tema, as técnicas de captura de CO₂ passam a ser classificadas em pré-combustão (é realizada a remoção de CO₂ do combustível antes de sua queima), pós-combustão (o CO₂ é separado dos gases de combustão após a queima do combustível) e oxidação (no qual o combustível é queimado na presença de O₂ e CO₂ é obtido como produto da combustão) ou em processos industriais (captura que ocorre em processos industriais produtores de CO₂).

Ilustra-se na Figura 9 a representação esquemática dos processos de captura carbono. Em uma comparação entre essas técnicas, realizada em 2006, concluiu-se que existe conhecimento técnico na academia e na indústria para sua implantação em fontes estacionárias de CO₂, porém os altos custos ainda se constituem um impedimento e, nenhuma das técnicas se destaca como potencial para a redução de custos necessária (STEENEVELDT; BERGER; TORP, 2006).

Entre os estudos sobre captura que mais se destacaram na literatura estão o de Rochelle (2009) sobre absorção de CO₂ em soluções de aminas, processo no qual o CO₂ é absorvido de um gás combustível ou um gás de combustão por uma solução aquosa de amina com baixa volatilidade em temperatura próxima a ambiente. O estudo conclui que essa técnica é a mais robusta e está pronta para ser usada em centrais termelétricas à carvão e biomassa e na indústria de cimento e aço. Outro estudo importante é o de D'Alessandro, Smit e Long (2010) no qual estudaram novos materiais para captura de CO₂ via pré-combustão, pós-combustão e dessulfurização do gás natural com destaque para sólidos porosos cristalinos e estruturas metal-orgânicas²⁹ e destacam a importância do desenvolvimento de novos materiais que permitam controle molecular. Sumida *et al.* (2012) também publicaram um artigo de investigação de estruturas metal-orgânicas para captura de CO₂ e destacaram que estas podem levar a redução da energia utilizada em processos de captura, e isso deve ser demonstrado utilizando estudos de ciclo de vida.

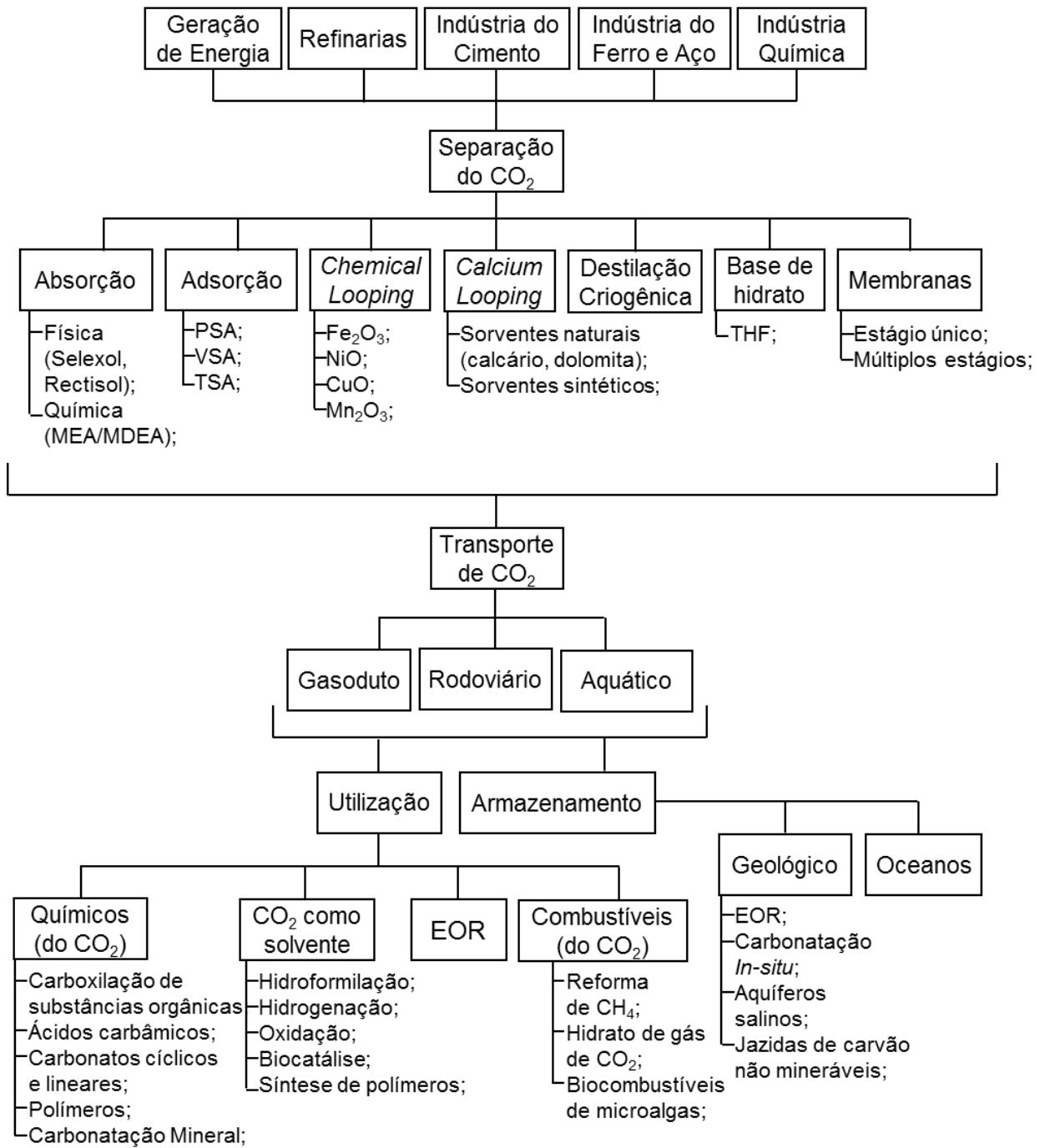
²⁹ São materiais constituídos por uma extensa rede de íons ou agrupamentos metálicos, coordenados a moléculas orgânicas multidentadas, culminando em dimensões porosas bem definidas (FÉREY *et al.*, 2011).

Figura 9 - Representação esquemática dos processos de captura de CO₂

Fonte: Adaptado de IPCC (2005)

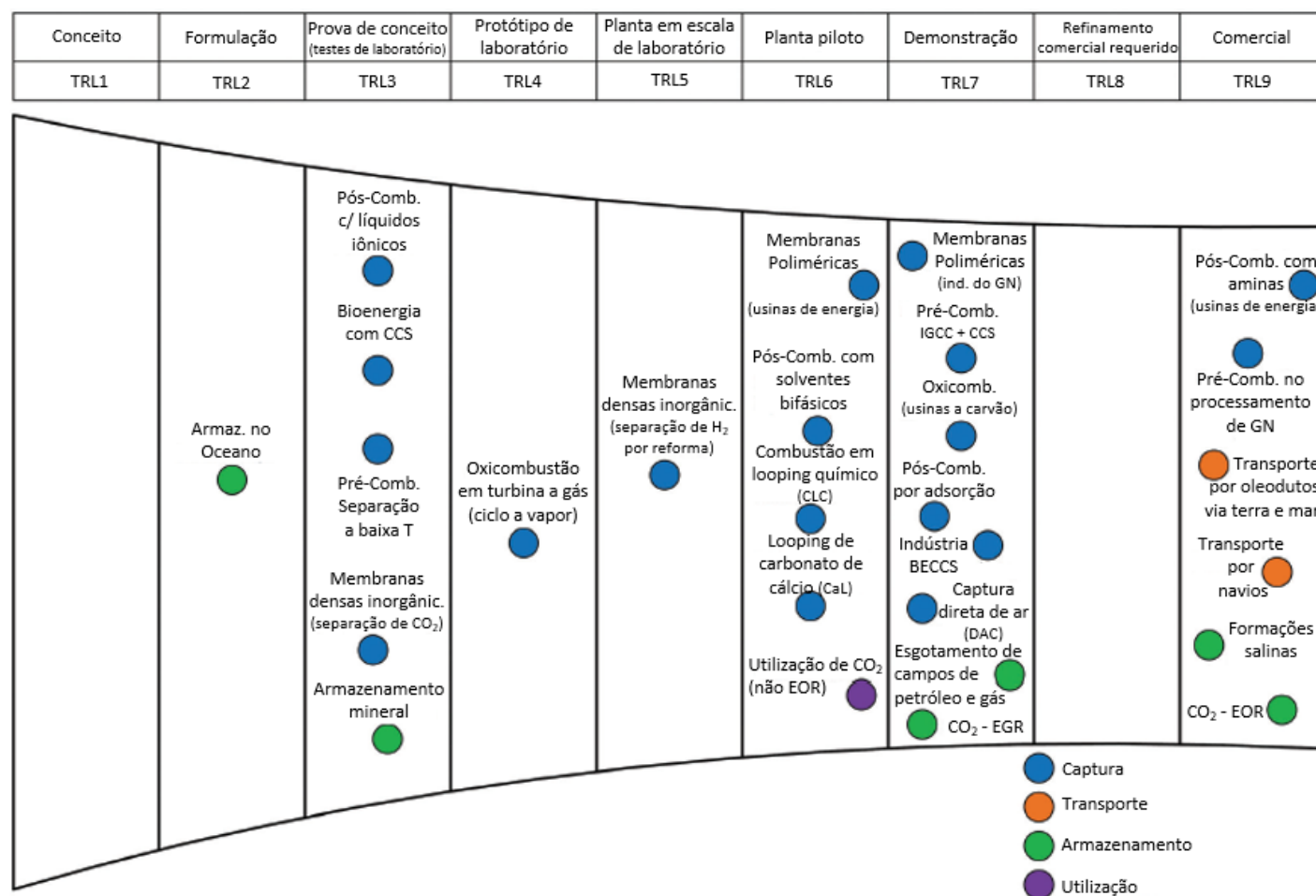
As metas climáticas mundiais atuais (IPCC, 2014) têm levado ao avanço de pesquisas na área de captura e armazenamento de carbono e, portanto, diferentes processos têm sido estudados. Na Figura 10 é possível observar as técnicas de separação, transporte, armazenamento e também as opções de utilização de CO₂ obtido dos principais setores geradores de CO₂ antropogênico.

O que determina a escolha dos métodos de captura e armazenamento é o processo no qual o CO₂ é gerado, bem como os custos de sua implementação e a possibilidade de armazenamento ou uso no local ou em regiões próximas. Outro quesito fundamental para a implantação de uma técnica de captura é sua maturidade tecnológica (TRL – *Technology readiness level*). Tipicamente, o desenvolvimento de uma tecnologia passa por uma série de etapas desde a escala de laboratório (TRL 1) até sua escala comercial (TRL 9) (BUI *et al.*, 2018). O amadurecimento tecnológico das técnicas de captura e armazenamento de CO₂ pode ser observado na Figura 11, na qual é possível observar a necessidade de investimento em pesquisas (TRL 3) e interesse comercial (TRL 7). Apesar do esforço mundial em pesquisas visando a maturidade tecnológica dos processos de captura, esses processos ainda não foram largamente implantados em escala comercial (Figura 12) como necessário para atender às metas do IPCC.

Figura 10 - Técnicas de captura e armazenamento de CO₂

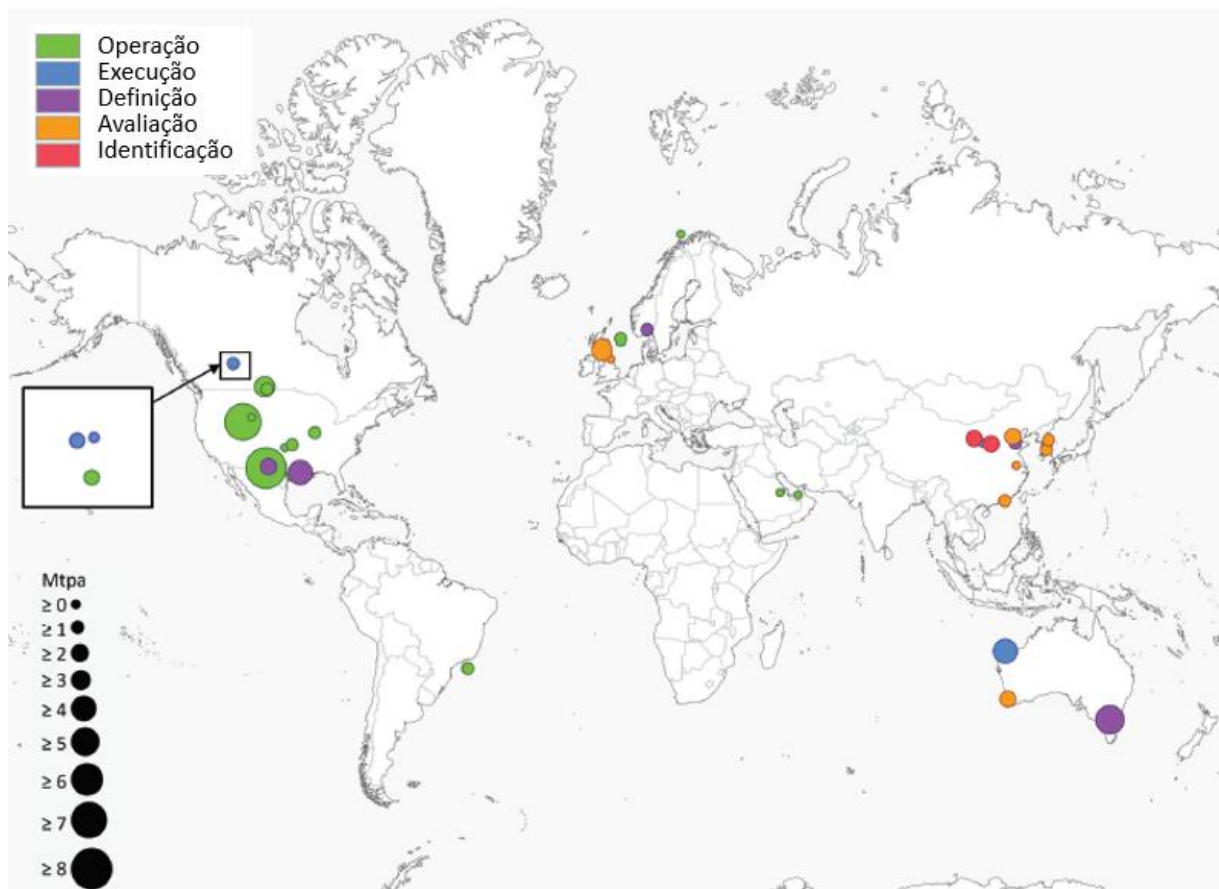
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 11 - Progresso atual do desenvolvimento de técnicas de captura, armazenamento e utilização de carbono em termos de nível de maturidade tecnológica.



Fonte: Adaptado de Bui *et al.* (2018).

Figura 12 - Projetos de CCS em escala comercial no mundo



Legenda: O tamanho do círculo é proporcional à capacidade de captura de CO₂ do projeto e a cor indica seu estágio.

Fonte: Adaptado de Bui *et al.* (2018)

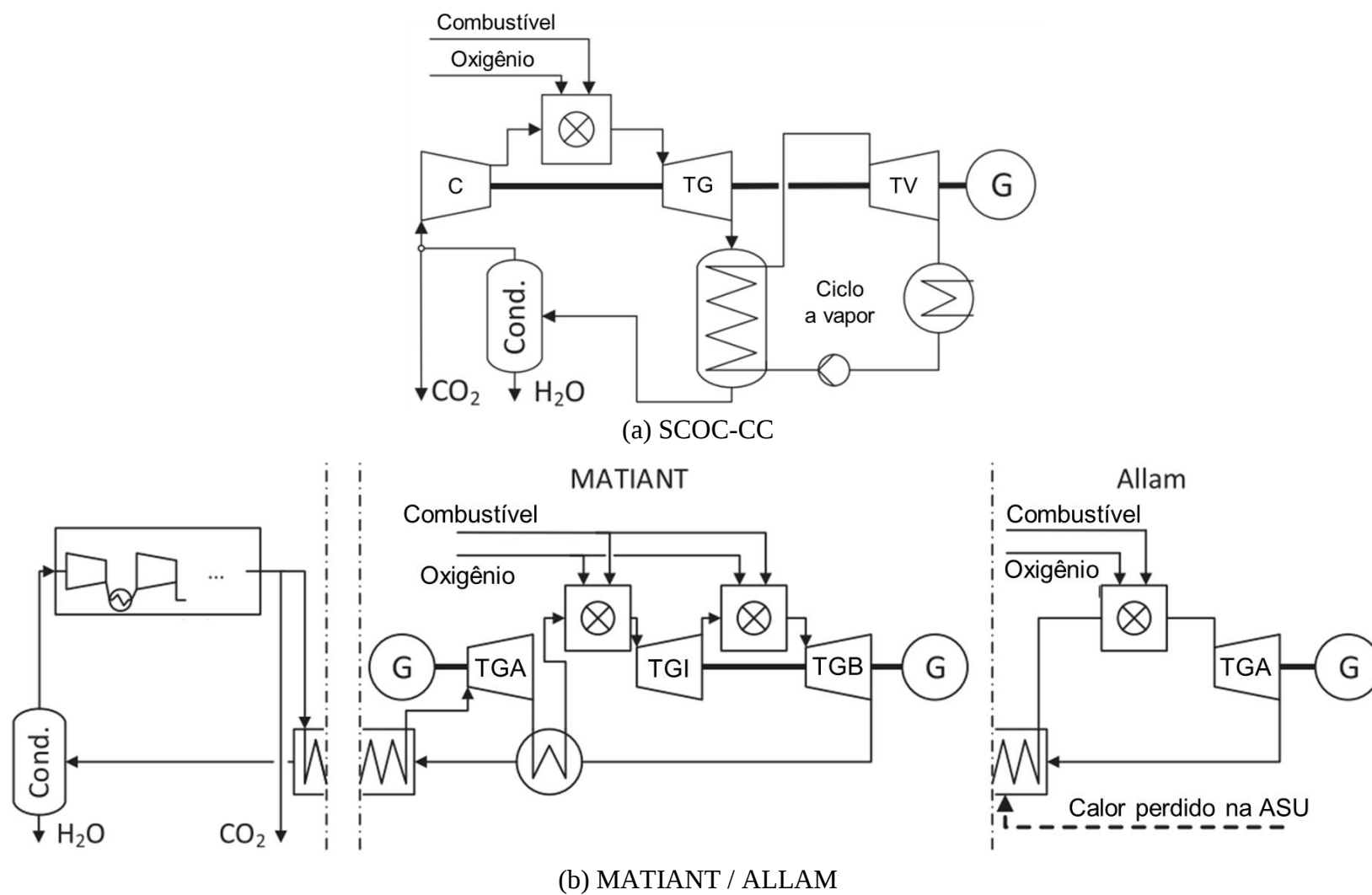
2.1.4.1 Oxicombustão em turbinas a gás

Neste tipo de aplicação o processo de oxicombustão acontece em um ambiente livre ou de baixa concentração de nitrogênio para que se possa obter um gás de combustão composto principalmente por CO₂ e H₂O e com baixa concentração de impurezas como argônio e oxigênio (NEMITALLAH; HABIB; BADR, 2019). Esse gás de combustão, por sua vez, é utilizado para a manutenção da temperatura de entrada da turbina, que é realizada por meio da recirculação de CO₂ (denominados ciclo a base de CO₂) ou H₂O (denominados ciclos a base de água) (STANGER *et al.*, 2015). Para o suprimento de oxigênio utilizado na combustão são utilizadas diferentes abordagens como unidades de separação de ar (realizada por meio de separação criogênica ou por membrana) que são grandes consumidoras de energia ou então reatores com membrana de transporte de íons no qual a separação e a combustão são realizadas

simultaneamente, sem necessidade adicional de energia (NEMITALLAH *et al.*, 2017). Devido à alta penalidade energética da separação do oxigênio do ar, geralmente realizada por meio de unidades de separação de ar (ASU, *air separation unit*), a oxidação é realizada próxima às condições estequiométricas (DAHLQUIST; GENRUP, 2013; IEAGHG, 2015; SOUNDARARAJAN, 2011). Por sua vez, o gás de combustão gerado é utilizado para a manutenção da temperatura de entrada da turbina (cerca de 90% da massa do gás é recirculada) e portanto 100% do carbono é capturado (CLIMENT BARBA *et al.*, 2016; SANZ *et al.*, 2008). Para promover a captura do CO₂ outra unidade é adicionada ao ciclo, um sistema de condensação de água, remoção de impurezas e compressão do CO₂, comumente denominado CPU (*CO₂ processing unit*) (LIMITED, 2011). Essa unidade também consome quantidade considerável de energia e penaliza a eficiência do ciclo (STANGER *et al.*, 2015).

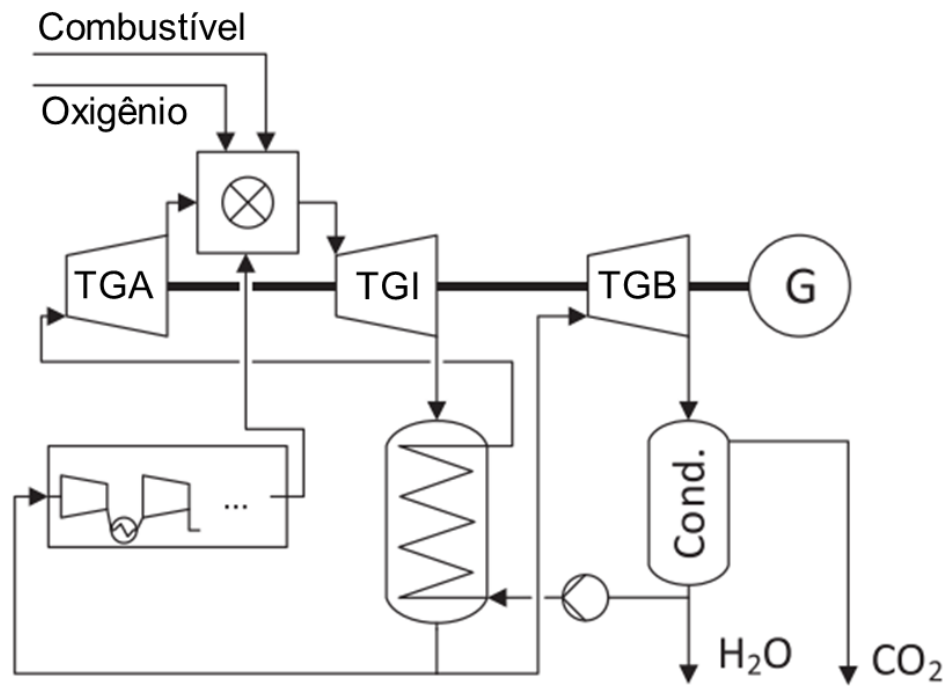
Diferentes configurações têm sido propostas para utilização da técnica de oxidação em ciclos com turbinas a gás. Os principais ciclos a base de CO₂, também denominados ciclos semi-fechados (SCOF-CC, *semi-closed oxy-fuel combustion combined cycles*), são o ciclo O₂/CO₂ ou SCOC-CC (*semi-closed oxygen combustion-combined cycle*) (BOLLAND; SAETHER, 1992; DILLON *et al.*, 2005), o ciclo COOLENERG (STAICOVICI, 2002), o ciclo COOPERATE (YANTOVSKI, 1996), o ciclo MATIANT (MATHIEU; NIHART, 1999) e o ciclo ALLAM (ALLAM *et al.*, 2017). Com relação aos ciclos a base de água, destacam-se o ciclo CES (desenvolvido pela *Clean Energy Systems*) (ANDERSON *et al.*, 2008) e o ciclo GRAZ (JERICHIA; SANZ; GÖTTLICH, 2008), que também pode ter a recirculação de CO₂ além de água (CLIMENT BARBA *et al.*, 2016; STANGER *et al.*, 2015). Os principais ciclos propostos na literatura são apresentados na Figura 13 (a base de CO₂) e Figura 14 (a base de água). Entre os ciclos que são apontados como promissores estão o ciclo de GRAZ devido à sua alta eficiência e o ciclo SCOC-CC devido à sua complexidade relativamente baixa, porém com uma eficiência um pouco menor (FRANCO *et al.*, 2006; SANZ *et al.*, 2008).

Figura 13 - Principais ciclos a base de CO₂ aplicados a turbinas a gás

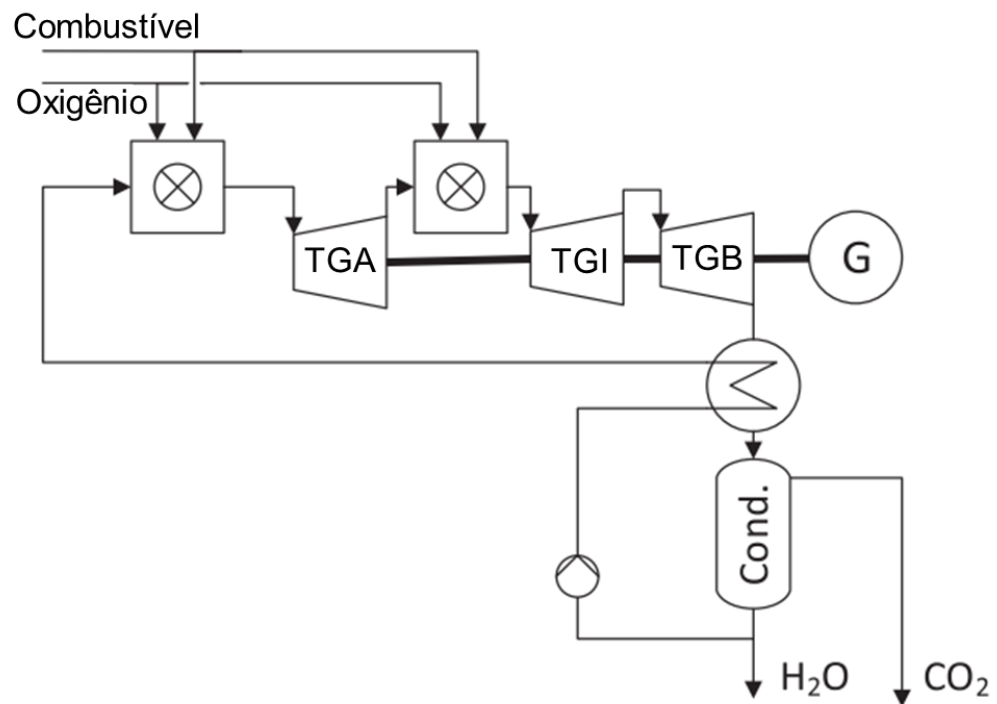


Fonte: Adaptado de Stanger *et al.* (2015)

Figura 14 - Principais ciclos a base de H_2O e $H_2O + CO_2$ aplicados a turbinas a gás



(a) GRAZ

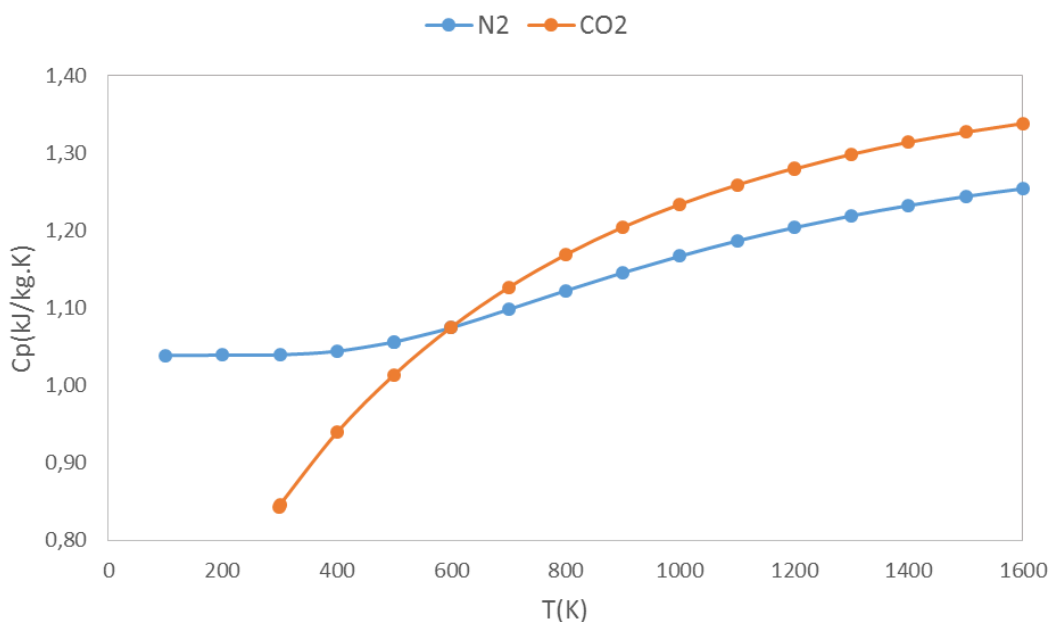


(b) CES

Fonte: Adaptado de Stanger *et al.* (2015)

Para a conversão de um ciclo combinado a gás natural (NGCC) para um ciclo com oxidação são necessárias algumas alterações em seus componentes. O ciclo SCOC-CC é indicado na literatura devida a sua baixa complexidade, conforme citado anteriormente. Basicamente, o ciclo NGCC difere do ciclo SCOC-CC pelo oxigênio que alimenta o combustor e o CO₂ recirculado que alimenta o compressor da turbina a gás ao invés de ar (STANGER *et al.*, 2015). De acordo com um estudo realizado por Franco *et al.* (2006), para a conversão de um ciclo NGCC em um ciclo SCOC-CC, um dos componentes que mais necessita de ajustes é o conjunto a gás (compressor, câmara de combustão e turbina a gás), devido a característica do fluido de trabalho ser diferente (o gás de combustão é rico em CO₂ ao invés de N₂). Portanto o peso molecular do gás no ciclo SCOC-CC é maior, bem como os calores específicos são diferentes (vide comportamento do C_p na Figura 15) e também a razão de calores específicos (k), resultando na necessidade de alterações no design desses componentes. Devido ao k para o CO₂ ser menor que para o ar isso afeta diretamente a relação de pressão da turbina a gás. Visando atingir temperatura de saída da turbina e eficiência do ciclo similares ao ciclo NGCC essa relação de pressão é aumentada (DAHLQUIST; GENRUP, 2013; STANGER *et al.*, 2015). A relação de pressão para ciclos SCOC-CC tem sido considerada entre 30 e 90 para temperaturas de entrada da turbina (TIT) entre 1300 e 1600°C (BOLLAND; SAETHER, 1992; STANGER *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2012). Para turbinas com TIT de 1400°C, a eficiência do ciclo SCOC-CC têm sido estimada entre 46 e 49% (DAHLQUIST; GENRUP, 2013; DILLON *et al.*, 2005; KVAMSDAL; JORDAL; BOLLAND, 2007; THORBERGSSON *et al.*, 2012). O gás de combustão rico em CO₂ também requer o resfriamento das palhetas das turbinas, de acordo com diferentes autores (DAHLQUIST; GENRUP, 2013; THORBERGSSON *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2012).

Figura 15 - Comportamento do C_p dos gases nitrogênio e dióxido de carbono



Fonte: Produção do próprio autor

O aumento na relação de pressão na turbina a gás, visando o aumento da eficiência do ciclo combinado, resulta na redução da eficiência no ciclo a vapor. Essa é uma escolha de projeto que deve ser feita de acordo com a aplicação do ciclo. Para o ciclo a vapor SCOC-CC (turbina a vapor, caldeira de recuperação e condensador) podem ser utilizados componentes com características similares a dos ciclos NGCC. Alguns autores sugerem alterações em diferentes componentes do ciclo SCOC-CC, como podem ser vistos nos trabalhos de (DAHLQUIST; GENRUP, 2013; IEAGHG, 2015; STANGER *et al.*, 2015).

Dois componentes necessitam ser incluídos na transição do ciclo NGCC para SCOC-CC, são eles: ASU e CPU. A penalidade energética de cada um desses componentes tem sido investigada na literatura, e está associada ao tipo de tecnologia utilizada para a purificação, bem como ao nível de pureza desejado do oxigênio (ASU), geralmente entre 95 e 99% (BURDYN; STRUCHTRUP, 2010; FU; GUNDERSEN, 2012; JONES *et al.*, 2011) e do dióxido de carbono (CPU) entre 88 e 99% (DARDE *et al.*, 2009; PIPITONE; BOLLAND, 2009). De acordo com Climent Barba *et al.* (2016) o consumo de energia para separação do oxigênio do ar variou de 0,24 a 0,28 kWh/kg de O_2 enquanto Soundararajan (2011) considerou 0,20 kWh/ kg de O_2 com 95% de pureza (0,720 MJ/kg) e Sanz *et al.* (2008) 0,25 kWh/ kg de O_2 com 99% de pureza e 0,30 kWh/ kg de O_2 com 95% de pureza. O consumo de energia para purificação do CO_2 variou

de 0,10 a 0,14 kWh/kg de CO₂ capturado para ciclos a carvão (DARDE *et al.*, 2009) e de 0,09 a 0,13 kWh/kg de CO₂ armazenado para ciclos operando a gás natural (PIPITONE; BOLLAND, 2009).

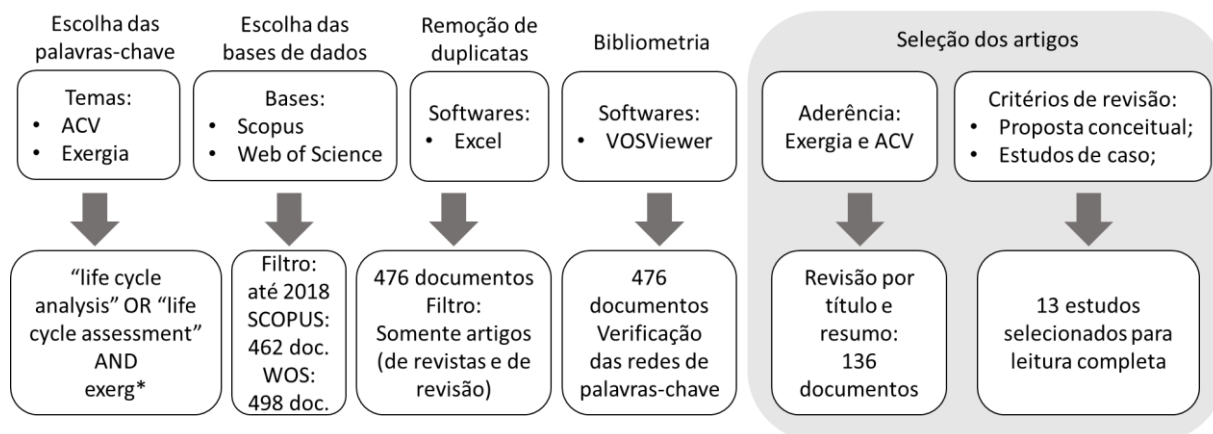
2.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E BIBLIOGRÁFICA

De toda energia elétrica gerada mundialmente, grande parte advém da conversão de combustíveis fósseis em centrais termelétricas e, portanto, o estudo de centrais térmicas de geração de energia elétrica é de grande interesse mundial. Verificando as principais bases de dados de publicações científicas (*Scopus e Web of Science*), observa-se o número crescente de publicações sobre esse tema, especialmente a partir do ano de 2005. Dentre as áreas que mais publicam sobre o tema se destacam a área de Energia, Ciências ambientais e Engenharia com estudos sobre otimização de processos, desenvolvimento de materiais e equipamentos, caracterização de combustíveis (fósseis e renováveis), controle de poluição e energias renováveis.

2.2.1 Exergia aplicada a ACV

O processo de revisão da literatura foi realizado conforme descrito na Figura 16, por meio da inserção dos temas de pesquisa (representados por palavras-chave) nas principais bases de dados de publicações científicas e posterior busca de documentos contendo as palavras-chave selecionadas em seus títulos, resumos ou palavras-chave. Na sequência foram selecionados artigos de revistas (incluindo artigos de revisão) em inglês e removidas as duplicatas. A partir desses documentos foi efetuada a análise bibliométrica por meio do software VOSViewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010) e posteriormente feita a seleção dos principais artigos com aderência à presente tese, por meio da leitura dos resumos e seleção dos artigos para leitura completa.

Figura 16 - Processo de revisão da literatura



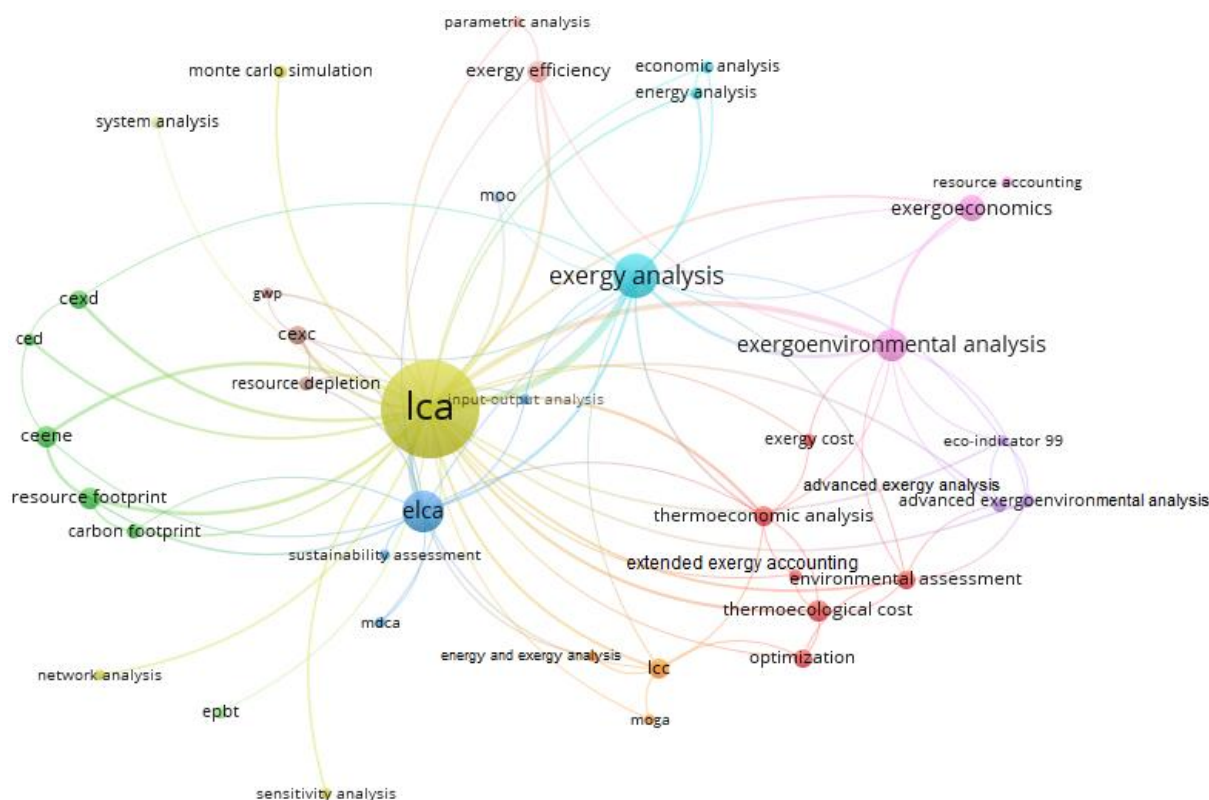
Fonte: Produção do próprio autor

Para a análise bibliométrica foi considerada a coocorrência das palavras-chave definidas pelos autores. A coocorrência de palavras-chave é uma indicação de que duas palavras-chave ocorrem juntas na lista de palavras-chave em um artigo (KARIMI; KHALILPOUR, 2015). Essa análise permitiu a obtenção de um mapa de rede de co-ocorrência das palavras-chave (sendo que a partir delas foram selecionadas somente palavras que representassem métodos) apresentado na Figura 17. Nesta figura cada círculo representa uma palavra-chave e seu diâmetro o número de co-ocorrências. A distância entre dois círculos indica a força de co-ocorrência ou força de associação entre eles, calculada pelo método de força de associação (VAN ECK; WALTMAN, 2009) e ponderada por contagem completa³⁰.

Verificou-se que a metodologia ACV tem sido utilizada juntamente com métodos consolidados de avaliação exergética (*exergoeconomics* ou *thermoeconomic analysis* e *thermoecological cost*) proporcionando a criação de novos métodos de avaliação exergética com enfoque no ciclo de vida (*advanced exergy analysis*, *advanced exergoenvironmental analysis* e *exergoenvironmental analysis*), como também a criação de novos métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida com enfoque exergético, como o CEENE.

³⁰ Na qual cada ligação tem o mesmo peso na ponderação.

Figura 17 - Métodos que abordam exergia e ACV



Fonte: Produção do próprio autor por meio do software VOSViewer

Descreve-se na sequência os estudos selecionados para compor a revisão bibliográfica da tese a respeito do tema Exergia e ACV, de acordo com as etapas apresentadas previamente na Figura 16. Para introduzir os trabalhos nos quais a exergia é relacionada à ACV é importante primeiramente descrever os conceitos de Consumo Acumulado de Exergia (CExC, do inglês *Cumulative Exergy Consumption*) e de Grau Cumulativo de Perfeição (CDP, do inglês *Cumulative Degree of Perfection*) descritos por Szargut e Morris (1987). O consumo acumulado de exergia é descrito como a soma da exergia dos recursos naturais consumidos em todos os passos de um processo de produção de determinado produto e o CDP como um indicador do desvio de todo o processo de produção da perfeição termodinâmica (SZARGUT; MORRIS, 1987).

Finnveden e Östlund (1997) discutiram a aplicabilidade dos conceitos de exergia e entropia na metodologia ACV. Uma observação importante é com relação à fronteira considerada nas análises puramente exergéticas, que geralmente são diferentes das consideradas em estudos de ACV. As exergias químicas de diferentes compostos foram calculadas e concluiu-se que o consumo exergético pode ser utilizado como parâmetro de caracterização em

estudos de ACV, porém o consumo exergético não atende a todos os aspectos relevantes ao esgotamento de recursos, como o impacto do uso de recursos bióticos³¹ na diversidade biológica. Entre as abordagens para a obtenção do fator de caracterização com relação ao esgotamento de recursos em ACV, as seguintes foram destacadas: (1) agregação de energia e materiais em uma base de energia e massa; (2) agregação baseada em reservas estimadas e consumo corrente; (3) agregação de impactos energéticos com base em cenários futuros; e (4) agregação de produção de exergia e/ou entropia.

Gong e Wall (1997) introduziram o conceito de Análise de Exergia do Ciclo de Vida (LCEA, do inglês *Life Cycle Exergy Analysis*) como um conceito importante no desenvolvimento da Engenharia Sustentável. Nesse trabalho, tanto o conceito de exergia é definido (com a diferenciação entre exergia destruída³² e exergia residual³³), como também métodos ambientais e econômicos utilizando exergia são abordados, com destaque para o método CExC. Ao aplicar o conceito de LCEA a sistemas de geração de energia, três estágios são considerados: construção, operação e descomissionamento. De acordo com os autores, a exergia utilizada nas etapas de construção, manutenção e descomissionamento é denominada exergia indireta, enquanto a exergia utilizada durante a operação para geração de energia elétrica é denominada exergia direta. Maiores detalhamentos a respeito da proposta conceitual, com equacionamento do método, não são abordados no artigo.

Ayres, Ayres e Martina (1998) descreveram a importância do uso da exergia não somente para estimar os recursos, mas também para calcular o conteúdo exergético de resíduos e conseqüentemente tentar reduzir essas perdas. Os métodos abordados foram obtenção da exergia dos fluxos de resíduos a partir da energia livre de Gibbs (exergia química) ou do uso de balanço exergético. Foi sugerida também a utilização da exergia como uma medida comum de insumos e produtos em estudos de ACV, com um conjunto equilibrado de vazões de massa.

Cornelissen e Hirs (2002), publicaram um artigo no qual desenvolveram um método denominado Avaliação Exergética do Ciclo de Vida (ELCA, do inglês *Exergetic Life Cycle Assessment*) para quantificar o esgotamento de recursos naturais e também avaliar a eficiência no uso desses recursos utilizando ACV. Esse método utilizou a mesma estrutura que a ACV, porém com critério único de irreversibilidade ou perda exergética durante o ciclo de vida. Um estudo de caso foi realizado para o tratamento térmico de resíduos de madeira na Holanda e a proposta conceitual de Szargut, Morris e Steward (1988) foi utilizada para o cálculo da exergia

³¹ Relativo ou pertencente à vida ou aos seres vivos.

³² Exergia destruída por irreversibilidades.

³³ Exergia não utilizada, denominada exergia perdida por Benjan, Tsatsaronis e Moran (1996).

da madeira. Ao notar que as irreversibilidades eram maiores ao utilizar madeira verde ao invés do carvão (pois as mesmas deveriam passar por um processo de secagem), notou-se que a irreversibilidade não pode ser usada como um critério para o esgotamento de recursos quando se trata de recursos renováveis. No entanto, pode ser utilizada como medida de eficiência do uso desses recursos. Deste modo, foi determinado que a depleção de recursos naturais deveria neste caso, ser calculada como a diferença entre as irreversibilidades e a exergia dos recursos renováveis.

Meester *et al.* (2006) utilizaram três bancos de dados termoquímicos para avaliar a exergia química de 85 elementos e 73 minerais, dos quais 21 tiveram sua exergia determinada pela primeira vez na literatura e alguns tiveram seus valores atualizados. O conjunto de dados obtidos no trabalho visaram proporcionar a avaliação direta do consumo de recursos por meio da ACV exergética.

Bösch *et al.* (2007) combinaram o conceito de exergia com os conjuntos de dados de inventário disponíveis na Ecoinvent, visando fornecer um indicador de categoria de impacto adicional. Foi criado então o indicador de Demanda Acumulada de Exergia (CExD, do inglês *Cumulative Exergy Demand*), que descreveu a remoção total de exergia da natureza (somando a exergia de todos os recursos necessários) para fornecer determinado produto. Esse indicador de categoria de impacto, que equivale a definição de CExC, foi então agrupado em oito categorias de recursos: fóssil, nuclear, hidrelétrica, biomassa, outras fontes renováveis, água, minerais e metais, com fatores de caracterização para 112 diferentes recursos.

Dewulf *et al.* (2007) esboçou um método de AICV que quantifica o uso de recursos em escala única, sem fatores de ponderação. O método é denominado Extração de Exergia Acumulada do Ambiente Natural (CEENE, do inglês *Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment*) e quantificou a exergia retirada dos ecossistemas naturais por meio da distinção quantitativa de oito categorias de recurso: recursos renováveis, combustíveis fósseis, energia nuclear, minérios metálicos, minerais não metálicos, recursos hídricos, recursos terrestres e recursos atmosféricos. O método CEENE foi desenvolvido de acordo com os bancos de dados de ciclo de vida existentes e agregou uma categoria de recursos adicional: o uso da terra. Categoria adicionada visando atribuir um valor exergético à terra, seguindo a idéia de que a ocupação da terra priva a exergia da irradiação solar que poderia ser usada para a fotossíntese no crescimento das plantas. Posteriormente, Alvarenga *et al.* (2013) implementaram um novo fator de caracterização para utilização no método CEENE, permitindo uma contabilização consistente da terra como recurso.

Meyer *et al.* (2009) conduziram uma análise denominada análise exergoambiental (do inglês *Exergoenvironmental Analysis*) aplicada a sistemas de conversão de energia. A análise é realizada em três etapas: uma análise exergética detalhada do sistema, seguida da ACV para determinação dos impactos ambientais com o uso do método AICV Eco-Indicator 99 e por fim o impacto ambiental associado a cada componente é atribuído aos seus fluxos de exergia permitindo o cálculo de variáveis exergoambientais para a realização da análise exergoambiental. Sugeriu-se nesse estudo o uso da análise exergoambiental para a melhoria sistemática do desempenho ambiental dos sistemas de conversão de energia e também sua interconexão com métodos exergoeconômicos visando obter uma ferramenta de apoio ao desenvolvimento de processos com desempenho termodinâmico, econômico e ambiental melhorados.

Victoria (2012) utilizou a proposta conceitual de Meyer *et al.* (2009) de avaliação exergoambiental em uma central termelétrica brasileira operando em combustão combinada (carvão-biomassa). Neste trabalho foi proposto um parâmetro de desempenho para o sistema denominado fator exergoambiental global, que considerou a variável exergia e o impacto para categoria de mudanças climáticas. Este parâmetro se mostrou efetivo ao mensurar o grau de melhoramento do sistema para os diferentes cenários avaliados.

Rocco, Colombo e Sciubba (2014) fizeram uma reavaliação teórica do método denominado Contabilização de Exergia Estendida (EEA, do inglês *Extended Exergy Accounting*). Para a elaboração da proposta conceitual, três pontos foram levados em consideração: o uso de recursos naturais, externalidades (inclusão de custos de mão de obra, de capital e ambientais junto aos recursos) e extensão de tempo e espaço do sistema (consideração do sistema da construção ao descomissionamento visando a sustentabilidade). Se comparado ao método de CexC, nesse método foi incluída a contabilização exergética dos componentes de custos de mão de obra, capital e ambientais, considerando todo o ciclo de vida do sistema em análise.

Gładysz e Ziebiak (2015), realizaram análise de entradas e saídas (IO) e ACV do berço ao túmulo de uma usina a carvão com captura de CO₂ por oxidação utilizando o método *Ecoindicator'99*. Juntamente com esse estudo foi realizada avaliação do custo termoecológico do ciclo de vida (*TEC_{LCA}*). Como principais resultados encontrados se destacaram a etapa de operação da usina a carvão como predominante dos impactos ambientais considerando o *TEC*. Os autores apontam a necessidade de uma melhor avaliação do *TEC* do suprimento de carvão.

Finnveden, Arushanyan e Brandão (2016), analisaram a exergia como uma medida do uso de recursos em ACV e outras ferramentas de avaliação de sustentabilidade. Nesse estudo

dois métodos de ACV com base exergética (CexD e o método publicado por Finnveden e Östlund (1997)) foram aplicados a dois estudos de caso (reciclagem de resíduos ferrosos e produção e uso de um *laptop*), juntamente com outros métodos de ACV comumente utilizados. A diferença entre os resultados encontrados para os dois métodos se deu principalmente para metais, devido às diferentes formas de modelar os minérios metálicos, que resultaram exergias químicas diferentes. Os autores concluem que os diferentes métodos existentes de ACV com base exergética são relevantes e devem ser estudados em busca de melhorias.

Diferentes métodos abrangendo conceitos de energia³⁴ (ex. EmLCA, ECEC e SED) e exergia aplicada a recursos não renováveis (EC, TEC, etc.) não são abordados por não estarem vinculados ao escopo da tese.

Verifica-se no Quadro 4 os principais métodos que abordam exergia aplicada a ACV (considerando recursos renováveis e não renováveis), contendo as fronteiras de aplicação, as parcelas exergéticas contabilizadas e os referidos autores. Os métodos selecionados compor a proposta conceitual para esta tese serão detalhados no capítulo 3.

³⁴ Definida como a energia (solar) incorporada ou memória de energia em um produto ou serviço. Descrita também como a quantidade total de energia necessária (direta/indiretamente) para fazer qualquer produto ou serviço (BAKSHI, 2000).

Quadro 4 - Principais métodos de avaliação ambiental que utilizam exergia associada a ACV

(continua)

Método	Principais características	Equacionamento	Referência
CExC	O método permite calcular o somatório das exergias (Ex) para a produção do produto (j) de diferentes recursos naturais (i). Aplicado a metodologia ACV, permite o ICV e resultados em termos de exergia do berço ao portão.	$CExC_j = \sum_{i=1}^n Ex_{ij} \text{ [MJ}_{\text{ex}}]$	(SZARGUT, 1987)
Exergy and LCA	Utilizando o método de Szargut como referência, as principais diferenças do método são a proposta do uso da exergia como indicador de categoria de impacto e a forma de contabilização da exergia química dos materiais.	$F\&\ddot{O}_j = \sum_{i=1}^n Ex_{ij} = \sum_{i=1}^n (X_i a_{ij})$	(FINNVEDEN; ÖSTLUND, 1997)
CExD	Baseado no método de Szargut, a soma das exergias é dada utilizando um fator exergético (X) do fluxo de referência (i) multiplicado pela quantidade acumulada do fluxo de referência (a_{ij}) para o produto (j). Os fluxos de referência são dados para 112 recursos encontrados na base de dados Ecoinvent, permitindo um novo indicador de categoria de impacto de um produto do berço ao túmulo.	$CExD_j = \sum_{i=1}^{112} (X_i a_{ij}) \text{ [MJ}_{\text{eq}}]$	(BÖSCH <i>et al.</i> , 2007)
CEENE	Apesar da similaridade com o método CExD, o método CEENE contabiliza a exergia total da qual o sistema natural é privado, enquanto o CExD avalia a exergia que é removida da natureza e transferida para o processo de produção. Os recursos extraídos do sistema são dados em 184 fluxos de referência da base de dados Ecoinvent. As principais diferenças em relação ao CExD: contabilização do uso da terra e da exergia de metais.	$CEENE_j = \sum_{i=1}^{184} (X_i a_{ij}) \text{ [MJ}_{\text{ex}}]$	(DEWULF <i>et al.</i> , 2007)
ELCA	Nesse método, o cálculo da depleção de recursos naturais (D_i) é dado pela diferença entre as irreversibilidades do ciclo de vida (I_{cv}) e a exergia dos recursos renováveis (B_R). A entrada exergética do sol e a irreversibilidade na transformação da energia do sol em combustíveis renováveis não é contabilizada, de modo a simplificar os cálculos.	$\dot{D}_i = \dot{I}_{cv} - \dot{E}x_R \text{ [MJ]}$	(CORNELISSE N; HIRS, 2002)

Quadro 4 - Principais métodos de avaliação ambiental que utilizam exergia associada a ACV

(conclusão)			
Método	Principais características	Formulação	Referência
Análise Exergo-ambiental 1	Proposta conceitual complementar a ACV, busca relacionar exergia e ACV por meio da utilização do método Eco-indicator. O impacto ambiental total de um componente (k), ($Ex_{T,k}$) é dado pela soma do impacto ambiental da destruição de exergia ($Ex_{D,k}$) e do impacto ambiental relacionado ao componente (Y_k). O fator Y_k é a soma dos impactos desde a construção, operação e manutenção até a disposição do componente.	$Ex_{T,k} = Y_k + Ex_{D,k} \text{ [mPts/s]}$	(MEYER <i>et al.</i> , 2009)
EEA	Além de fluxos de materiais e energia, o método converte externalidades (custos de mão de obra (L), de capital (K) e ambientais (O)) em fluxo de exergia primária equivalente visando aplicação na ACV. Os autores destacam porém, a necessidade de melhorias como padronização, refinamento e ampliação da base de dados do método CExC e no modelo socioeconômico para equivalência exergética de mão de obra e capital).	$EE_j = CExC_j + Ex_L + Ex_K + Ex_O \text{ [J]}$	(ROCCO; COLOMBO; SCIUBBA, 2014)

Fonte: Produção do próprio autor

2.2.2 ACV aplicada a centrais termelétricas com captura de CO₂

A aplicação de técnicas de captura de CO₂ está elencada como uma das principais alternativas para redução de emissões de GHG na geração de energia elétrica utilizando combustíveis fósseis, visando atender as metas globais. Conforme citado na seção 2.1.4, desde o princípio das pesquisas em técnicas de captura de CO₂, estudos de ACV têm sido utilizados para a verificação de seu desempenho ambiental, mesmo antes da normatização da metodologia ACV, conforme artigos publicados por Waku *et al.* (1995) e Akai *et al.* (1997).

Realizou-se o processo de seleção de artigos de acordo com a Figura 18 por meio da seleção das palavras-chave de forma a propiciar uma visão abrangente dos temas relacionados à pesquisa a partir da análise bibliométrica. Posteriormente, foram selecionados os artigos que abordavam avaliação do ciclo de vida em processos de geração de energia com captura de carbono por oxidação para leitura dos resumos e posterior leitura completa dos artigos selecionados.

A análise bibliométrica de co-ocorrência de palavras-chave por meio do Software SciMAT (COBO *et al.*, 2012) permitiu a visualização da relação de co-ocorrência das principais áreas de pesquisa relacionados a ACV e CCS. Realizou-se a análise por meio da divisão dos documentos em três períodos de tempo para verificar a evolução das redes de clusters da palavra-chave ACV. Essas redes são apresentadas na Figura 19, nas quais as esferas representam as palavras-chave (áreas de pesquisa) e seu tamanho, o número de documentos publicados no período.

Figura 18 - Processo de seleção dos artigos para revisão bibliográfica

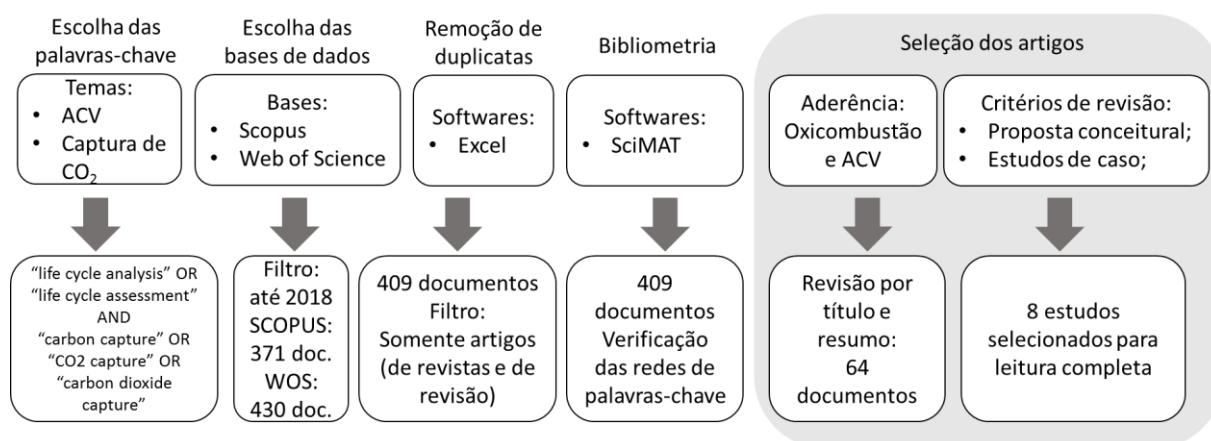
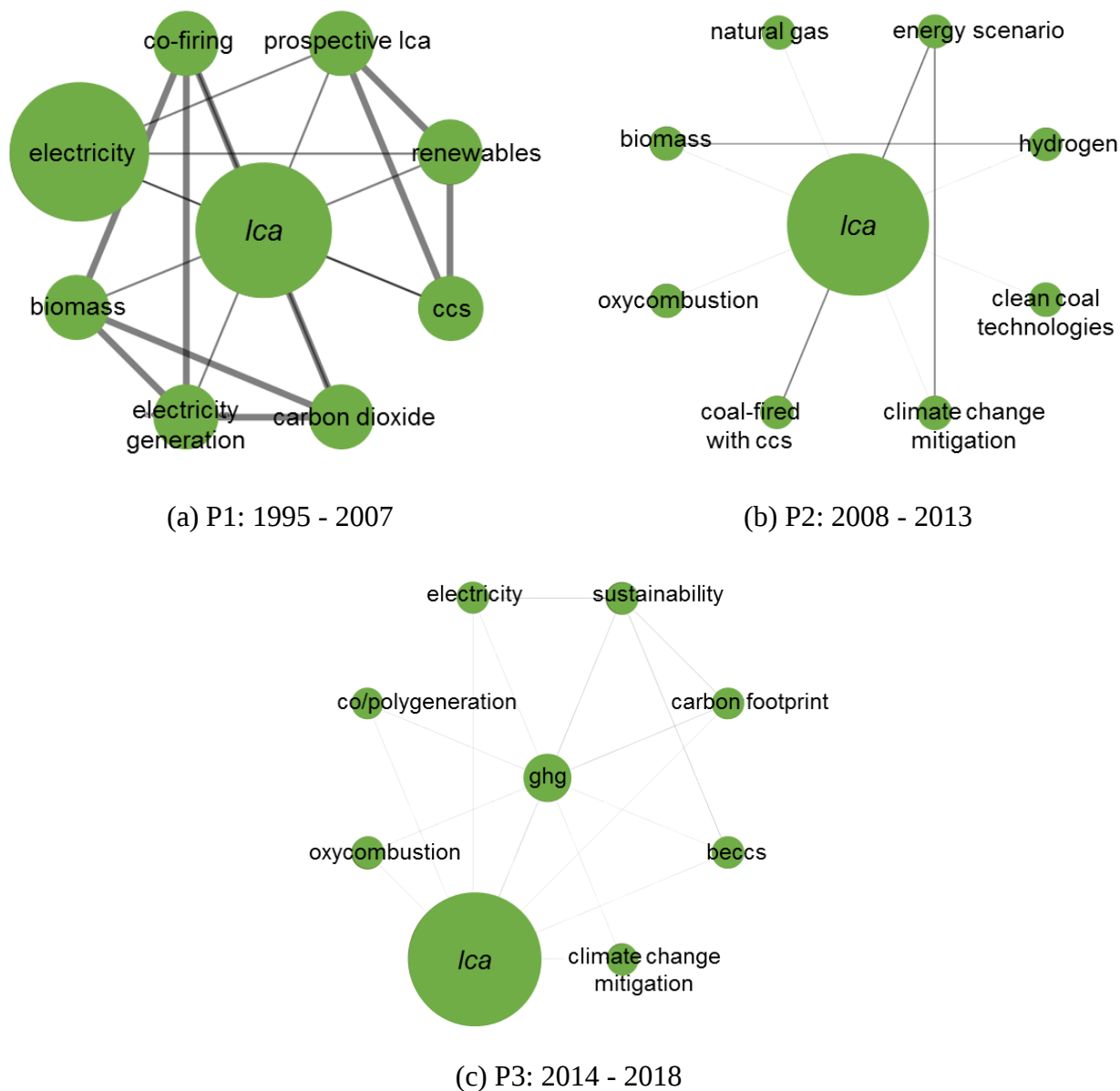


Figura 19 - Redes de palavras-chave por período



Fonte: Produção do próprio autor por meio do software SciMAT

Notou-se que o cluster denominado CCS no período 1, passa a ser representado pelo cluster oxícombustão no período 2 e pelos clusters oxícombustão e beccs (*bionergy carbon capture and storage*) no período 3. A partir dessa análise foi verificada a relevância do processo de captura de CO₂ por oxícombustão e o crescente interesse da comunidade científica na avaliação ambiental desta técnica por meio da ACV. Na sequência são descritos os estudos selecionados para compor a revisão bibliográfica da tese a respeito deste tema (ACV e Captura de CO₂).

Lombardi (2003) realizou um estudo de ACV (método Eco-Indicator 95 e UF: 1 MJ de potência gerada) considerando três centrais termelétricas com diferentes técnicas de CCS (SCGT/CC a gás natural e pós-combustão com aminas, IGCC a carvão com pré-combustão e NGCC com oxidação) durante seu ciclo de vida desde a construção, operação até seu descomissionamento. Uma análise complementar de ELCA, dada em exergia destruída por UF durante o ciclo de vida dessas centrais termelétricas também foi realizada, de acordo com o método desenvolvido por Cornelissen (1997). Foi verificado que o ciclo com oxidação teve a menor contribuição em emissões de GHG (PAG), e consequentemente a menor destruição de exergia. Como resultado da análise exergética observaram que a destruição de exergia dada em MJ/UF, que acontece durante a etapa de operação da central termelétrica, é muito maior que a destruição da exergia nas etapas de construção, manutenção e descomissionamento.

Weisser (2007) publicou um estudo em que analisou as emissões de GHG do ciclo de vida de cadeias de geração de energia elétrica (renováveis e não renováveis, incluindo a implantação de técnicas CCS) publicados entre meados dos anos 1990 e 2006. Como resultados foram obtidos os parâmetros específicos que alteram os resultados dos estudos de ACV (método híbrido PSA/IO sem definição de UF), por tipo de central térmica geradora de energia. A partir desses resultados destacou-se que, em centrais termelétricas que operam utilizando combustíveis fósseis, os principais fatores influentes são: o tipo de combustível (característica energética, local, método de extração e transporte); eficiência de sua conversão; origem da energia elétrica associada ao suprimento de combustível; comissionamento, descomissionamento e tempo de vida da central termelétrica e; eficiência dos dispositivos de controle de emissões. Neste estudo também foi sugerido o uso de técnicas CCS como uma solução tecnológica intermediária necessária na transição para uma matriz mais renovável.

Viebahn *et al.* (2007) efetuaram um estudo comparando energias renováveis e CCS com foco em aspectos estruturais, ecológicos (ACV) e econômicos considerando a realidade da Alemanha. Considerando o ano de 2020 (previsto para implantação de técnicas CCS), em um estudo de ACV (método UBA- Verfahren e UF: 1 kWh de eletricidade gerada) prospectivo, as eficiências das centrais termelétricas foram consideradas mais altas do que as correntes (entre 46 e 60%). Os resultados demonstraram que a técnica de captura por oxidação foi a que mais reduziu as emissões de GHG (PAG) (em sua maioria advindas da operação da central termelétrica) e, mesmo assim, essas emissões foram maiores para o ciclo de vida de centrais termelétricas operando a combustíveis fósseis do que em renováveis solares e eólicas. Por outro lado, na comparação de diferentes categorias de impacto de uma central termelétrica a carvão

sem e com CCS, os resultados obtidos demonstraram que para todas as categorias avaliadas (PFFO, PE, PA, PTH e CED) os impactos nessas categorias aumentam com a inserção da CCS.

Pehnt e Henkel (2009) avaliaram diferentes técnicas de captura de CO₂ incorporadas à geração de energia elétrica pela conversão de linhito³⁵. Nesse estudo de ACV (categorias de impacto: PAG, CED, PFFO, PA, PE, PTH e UF: 1 kWh de eletricidade gerada) foi considerado o horizonte de tempo de 2020, a região da Alemanha e centrais termelétricas entre 500 e 800 MW. Diferentes tipos de centrais termelétricas foram selecionadas: carvão pulverizado com e sem captura por MEA, ciclo combinado com gaseificação integrada com e sem captura de CO₂ utilizando Selexol e oxidcombustão. O ciclo de vida dessas centrais termelétricas foi dividido em (1) suprimento de combustível, (2) infraestrutura e (3) operação da central térmica, (4) produção e MEA e (5) transporte e armazenamento de CO₂. O estudo concluiu que para todos os casos, a inserção de CCS nas centrais termelétricas eleva o consumo de combustível, devido ao consumo de energia da técnica. As maiores reduções de CO₂ foram obtidas para IGCC, PC e oxidcombustão, foram de 80, 84 e 86% respectivamente. Com relação aos demais impactos, a pós-combustão (MEA) eleva a maioria dos impactos, enquanto a pré-combustão com gaseificação integrada diminui a maioria. A oxidcombustão precisa ser avaliada quanto a capacidade de cocaptura de outros poluentes, pois gera impactos menores que a pré-combustão com cocaptura e maiores que a pós-combustão sem captura. Entre as etapas do ciclo de vida, a que mais gera impactos é a operação da central térmica (considerando que a compressão do CO₂ é realizada no local), seguida da etapa de suprimento de combustível.

Czyperek *et al.* (2010) aplicaram a tecnologia de membranas para a captura de CO₂ em centrais termelétricas com pré-combustão, pós-combustão e oxidcombustão. Foram simuladas centrais termelétricas convencionais sem CCS com queima de carvão e linhito com potência de 1,2GW e centrais de gaseificação com eficiência de 50%. Na pós-combustão foi considerada uma central térmica de 600 MW com membranas poliméricas, na pré-combustão uma central térmica IGCC com membranas de cerâmica e, na oxidcombustão, a central térmica da pós-combustão modificada e com o uso de membranas de cerâmica. O estudo de ACV (UF: 1 kWh de eletricidade gerada) foi realizado somente para a técnica de captura via oxidcombustão e os resultados demonstraram que o uso de um sistema de membranas ao invés de separação criogênica do ar permite uma redução ainda maior tanto do PAG quanto das demais categorias de impacto analisadas (PA, PE, PTH e PDR).

³⁵ Rocha sedimentar combustível formada pela compressão da turfa, também considerado um carvão de baixo poder calorífico.

Singh, Stromman e Hertwich (2011a, 2011b) avaliaram centrais termelétricas de 400 MW operando a carvão e gás natural com a inserção de pré, pós e oxidação quanto ao desempenho ambiental utilizando ACV (método Recipe, UF: 1 kWh de eletricidade gerada). Os resultados demonstraram que, para ambos os combustíveis, houve redução de impacto na categoria PAG, porém aumento nas demais categorias (PAT, PEAD, PTH, PEcT, PEcAD e PEcM). As técnicas CCS com melhores resultados foram pré-combustão, oxidação e pós-combustão respectivamente, tanto para o carvão quanto para o gás natural. Ao observar os resultados a ACV para a central termelétrica operando a gás natural com oxidação, nota-se que grande parte dos impactos ambientais nas categorias (PEAD, PTH, PEcT, PEcAD e PEcM) advém da infraestrutura (da central térmica, da produção de combustível e de transporte e armazenamento), enquanto os impactos nas categorias PAG e PAT são originados na produção do combustível.

Corsten *et al.* (2013) realizaram uma avaliação da literatura de ACV de centrais termelétricas a combustíveis fósseis utilizando CCS no período de 1997 a 2012. Os seguintes itens da ACV foram primeiramente discutidos, por sua relevância nos resultados, para posterior comparação entre os estudos: sistema de referência, unidade funcional, fronteiras do sistema, método de avaliação de impacto e categorias de avaliação de impacto, tipos de tecnologia estudados e horizonte temporal. O sistema de referência escolhido foi uma central termelétrica a carvão pulverizado e a unidade funcional de 1 kWh de eletricidade gerada, pois é a unidade da maioria dos artigos publicados. Com relação as fronteiras do sistema, a maioria dos estudos abrangeu todo o ciclo de vida, desde a extração do combustível e demais matérias primas até o armazenamento do CO₂. Nesse ponto algumas definições importantes são dadas: emissões de primeiro³⁶ e segundo³⁷ nível e emissões diretas³⁸ e indiretas³⁹. Outros autores tem diferentes definições para emissões diretas e indiretas, como por exemplo Odeh e Cockerill (2008) e Gong e Wall (1997) que definem emissões diretas como aquelas que ocorrem com a queima do combustível na central termelétrica e indiretas como as emissões a montante, jusante e para construção e descomissionamento da central termelétrica.

No estudo de revisão de Corsten *et al.* (2013), as categorias de impacto mais utilizadas nos estudos selecionados foram PAG, PA, PE e CED. Os tipos de centrais termelétricas avaliadas nos estudos foram PC, IGCC e NGCC com captura de carbono por pré-combustão,

³⁶ Emissões desde a extração do combustível ao armazenamento do CO₂.

³⁷ Emissões advindas da infraestrutura e extração de matéria-prima.

³⁸ Emissões da central termelétrica (inclui captura, transporte e armazenamento de CO₂).

³⁹ Emissões advindas do suprimento de combustíveis e matéria-prima e também do gerenciamento de resíduos e coprodutos.

pós-combustão e oxícombustão, sendo a maioria dos estudos realizados com pós-combustão utilizando MEA. O transporte de CO₂ foi considerado por gasoduto e o armazenamento em campos de óleo e gás ou aquíferos e o horizonte temporal abrangendo o período de 2020 a 2050. A comparação dos resultados por etapa do ciclo de vida ou por emissões diretas e indiretas foi dificultada devido a diferentes considerações feitas por cada autor. Entre os resultados foi evidenciado que a penalidade energética devido a inserção dos processos de captura (que consiste na redução da eficiência da central térmica) é maior para os processos de pós-combustão do que para processos de pré-combustão, com aumento de CED de até 44%. Processos a gás natural tem menores aumentos de CED, porém impactos significativos a montante, devido ao vazamento de metano durante a extração e distribuição do gás natural. Outros fatores que influenciam as emissões são o uso de solventes como MEA ou Selexol e também a qualidade do carvão e seu transporte até a central termelétrica.

Por fim, conclui-se que a inserção de técnicas CCS em centrais termelétricas pode reduzir as emissões de CO₂ de 47 a 97%, de acordo com a técnica utilizada. Porém, essa inserção tende a aumentar o consumo de energia primária, diminuir a eficiência das centrais termelétricas e mudar as características de emissões diretas e indiretas do ciclo de vida. Destacou-se que para captura via oxícombustão poucos estudos estão disponíveis, entretanto, esta é a técnica com maior potencial de redução de PAG e também com menor aumento relativo nas categorias de impacto, com algumas discordâncias para as categorias PA, PFFO e PTH. Por fim, os autores destacaram a importância da ACV como ferramenta para a avaliação de desempenho ambiental de novas tecnologias, a necessidade de disponibilidade de dados provenientes de plantas piloto ou de demonstração e a necessidade de transparência como fator limitante para uso da metodologia ACV.

Cuéllar-Franca e Azapagic (2015), publicaram o primeiro artigo comparando estudos de ACV de técnicas de captura e armazenamento de CO₂ e técnicas de captura e utilização de CO₂ (CCU, do inglês *Carbon Capture and Utilisation*). Um total de 27 estudos foram avaliados, entre eles 16 com foco em CCS e 11 com foco em CCU. Com relação aos estudos de CCS, foram analisadas três diferentes tecnologias de geração de energia elétrica: Carvão pulverizado (PC), Ciclo combinado com turbina a gás (CCGT) e ciclo combinado com gaseificação integrada (IGCC) de carvão. Essas diferentes tecnologias foram avaliadas com a inserção das técnicas de captura via pré-combustão, pós-combustão e oxícombustão por alguns autores e os resultados dos estudos de ACV (UF: 1 kWh e 1 MWh de eletricidade gerada) foram comparados para diferentes categorias de impacto (PTH, PA, PAG, PDCO, PDR, PE, PEc e PFFO). Notou-se que a técnica mais madura e amplamente utilizada é a de captura via pós-combustão

utilizando MEA e também o armazenamento geológico como o mais viável. As maiores reduções de PAG foram obtidas em centrais termelétricas tipo PC e IGCC com oxidação (até 82%) e as menores em centrais do tipo CCGT com pós-combustão (63%). Quando comparadas as técnicas CCS e CCU, a última tem um potencial muito maior de redução de emissões de CO₂, porém dependendo do processo utilizado as emissões de CO₂ podem dobrar (ex. produção de produtos químicos como o dimetilcarbonato). Os autores sugerem a definição de limites do sistema e unidade funcional para estudos de ACV de sistemas CCS e CCU. Outra sugestão foi considerar critérios de alocação e avaliação de incertezas de dados e resultados em estudos de ACV aplicados a CCS, premissas da metodologia ACV.

Os estudos de ACV aplicados à captura de CO₂ por oxidação que serão usados como fonte comparativa para este estudo são apresentados nos Quadro 5 e Quadro 6.

Quadro 5 - Principais estudos de ACV de centrais termelétricas com captura de CO₂ via oxidação

Referência	Tipo de Termelétrica	Tempo de operação (anos)	Potência (MW)	Eficiência da UTE (cc) (%)	Combustível	Captura de CO ₂	Transporte de CO ₂	Armaz. de CO ₂
(LOMBARDI, 2003)	Ciclo combinado	15	10	43,7	Metano	n.i.	n.i.	n.i.
(VIEBAHN <i>et al.</i> , 2007)	Rankine	25	543	38	Carvão Pulverizado	n.i.	Gasoduto (300 km)	Geológico
(PEHNT; HENKEL, 2009)	Rankine	n.i.	500 - 800	33,4	Carvão Pulverizado	Criogênica	Gasoduto (325 km)	Geológico
(NIE; KORRE; DURUCAN, 2011)	Rankine	n.i.	500	45	Carvão Pulverizado	Criogênica	Gasoduto (300 km)	Geológico
(SINGH; STROMMAN; HERTWICH, 2011b)	Ciclo combinado	25	400	58,1	Gás natural	n.i.	Gasoduto (500 km)	Geológico
(MARKEWITZ <i>et al.</i> , 2013)	Rankine	40	440,9 -510,5	36,4 - 42,2	Carvão	Criogênica/ Membrana	Gasoduto (400 km)	Geológico
(SCHREIBER; MARX; ZAPP, 2013)	Rankine	40	440,9 – 479,5	36,4 – 39,6	Carvão	Criogênica/ Membrana	Gasoduto (400 km)	Geológico

Nota: n.i. (Não informado).cc (Com captura).

Quadro 6 - Detalhamento da metodologia ACV aplicada aos estudos selecionados

Referência	Fronteiras (Ciclo de Vida)	Fronteiras (Infraestrutura)	Horizonte de tempo	UF	ICV	Método AICV	Categorias de Impacto	Software
(LOMBARDI, 2003)	B-P	C/O/D	n.i.	1 MJ _{el}	S	Ecoindicator-95	PAG, Ed	SimaPro
(VIEBAHN <i>et al.</i> , 2007)	B-T	C/O/D	2020	1 kWh _{el}	S	UBA-Verfahren	PAG, PFFO, PA, PE, PTH, CED	Umberto
(PEHNT; HENKEL, 2009)	B-T	C/O/D	2020	1 kWh _{el}	S	CML 1992	PAG, CED, PA, PFFO, PE, PTH	Umberto
(NIE; KORRE; DURUCAN, 2011)	B-P	C/O	n.i.	1 MWh _{el}	S	CML 2001	PAG, PDCO, PFFO, PA, PE, PE _c , PTH, PDR	Gabi v.4
(SINGH; STROMMAN; HERTWICH, 2011b)	B-T	C/O/D	n.i.	1 kWh _{el}	S	Recipe 2008 v 1.02	PAG, PA, PEAD, PEM, PFFO, PFMP, PTH, PE _c T, PE _c AD, PE _c M	n.i.
(MARKEWITZ <i>et al.</i> , 2013)	B-T	n.i.	n.i.	1 kWh _{el}	S	n.i.	PAG, PA, PE, PFFO, PTH, PE _c	Gabi v.5
(SCHREIBER; MARX; ZAPP, 2013)	B-T	n.i.	n.i.	1 kWh _{el}	P/S	CML 2001	PAG, PA, PE, PFFO, PTH	Gabi v.5

Nota: n.i. (Não informado). Fronteiras (CV): B-P (berço ao portão), B-T (berço ao túmulo). Fronteiras (Infra): C (construção), O (operação), D (descomissionamento). ICV: P (Dados primários), S (Dados secundários).

Fonte: Produção do próprio autor

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

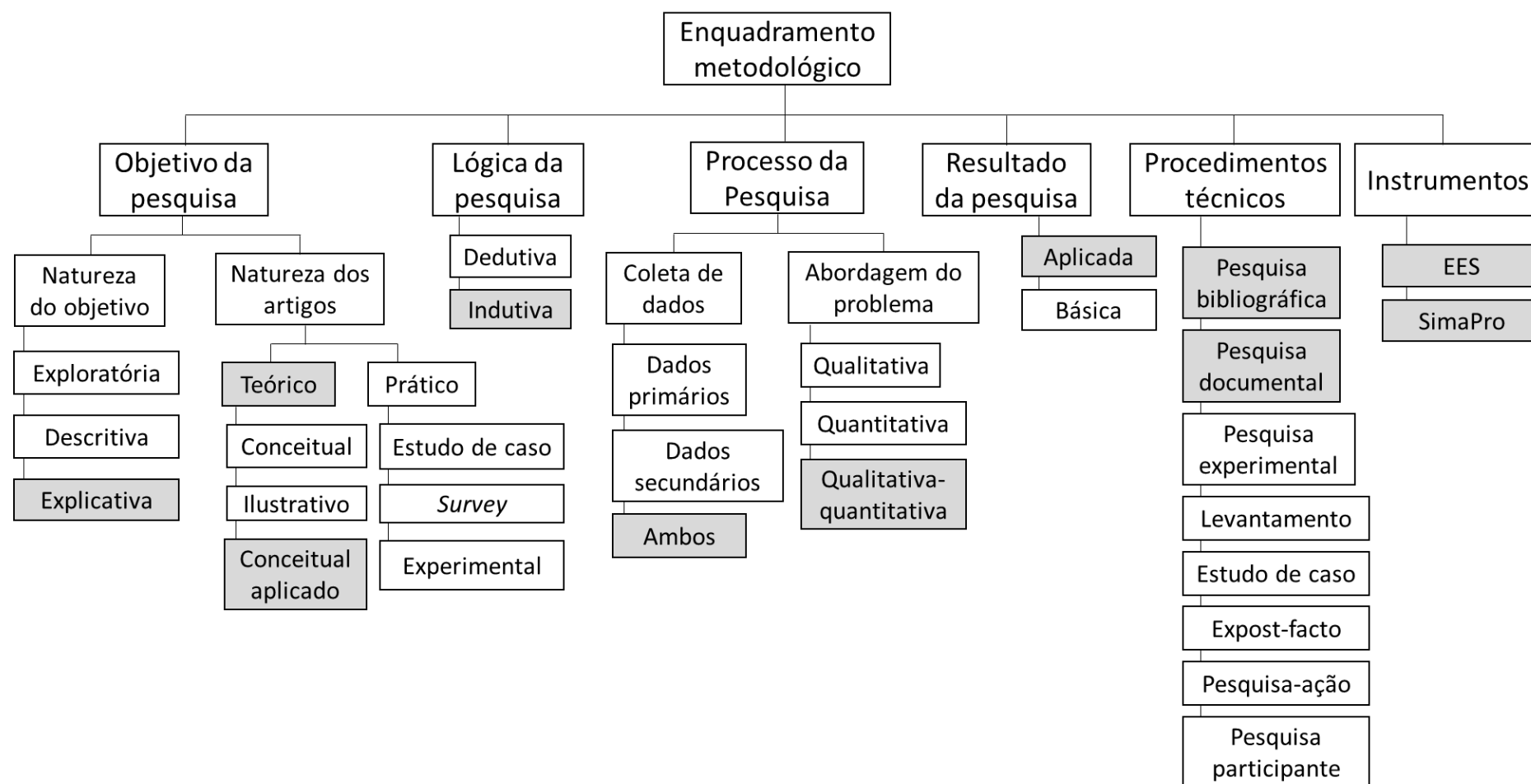
Apresenta-se neste capítulo a caracterização da pesquisa, o objeto da análise realizada nesta tese (material), ferramentas computacionais utilizadas e também a proposta conceitual para realizar a avaliação ambiental por meio das avaliações termodinâmica e do ciclo de vida da geração de energia elétrica com base exergética.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente tese pode ser caracterizada de acordo com o enquadramento metodológico apresentado na Figura 20. Quanto a natureza do objetivo desta pesquisa, a mesma pode ser classificada como explicativa, pois tem como preocupação central identificar os fatores que determinam ou contribuem para o desempenho ambiental de termelétricas a gás natural com captura de CO₂ por oxidação (GIL, 2008). Quanto a natureza dos artigos publicados a partir dessa pesquisa, estes têm carácter teórico (conceitual aplicado), pois visam demonstrar os *hotspots* do ciclo de vida da geração de eletricidade com a inserção de captura de CO₂ por oxidação. A lógica da pesquisa pode ser descrita como indutiva, pois parte do particular e coloca a generalização como um produto posterior do trabalho de coleta de dados particulares (GIL, 2008).

O processo de pesquisa é baseado em coleta de dados primários e secundários por meio de análise bibliográfica e inventário do ciclo de vida. Os dados primários foram obtidos a partir dos estudos de impacto ambiental feitos pelos responsáveis pelas termelétricas selecionadas (EMAE, 2002) e os dados secundários obtidos a partir de bases de dados como a Ecoinvent (ECOINVENT, 2020a), NETL (NETL, 2020) e também a partir de artigos publicados sobre o tema. A abordagem do problema pode ser descrita como qualitativa-quantitativa, característica de estudos termodinâmicos e de avaliação do ciclo de vida com abordagem exergética. Portanto, os procedimentos técnicos realizados durante a pesquisa podem ser classificados como pesquisa bibliográfica e documental. Quanto aos instrumentos para o processamento dos dados, foram utilizados os softwares EES (para avaliação termodinâmica) e SimaPro (para avaliação do ciclo de vida). Por fim, quanto ao resultado da pesquisa, esta pode ser classificada como aplicada, ou seja, aquela em que a metodologia de pesquisa é aplicada para coletar informações sobre vários aspectos de uma situação, para que as informações coletadas possam ser utilizadas para outros fins, estabelecendo causalidade e resultados, identificando necessidades e desenvolvendo estratégias (KUMAR, 2011).

Figura 20 - Enquadramento metodológico da pesquisa

Fonte: Adaptado de Tasca *et al.* (2010)

3.2 MATERIAL

3.2.1 Centrais Termelétricas

A geração termelétrica no Brasil é majoritariamente obtida por meio da conversão de gás natural e bagaço de cana de açúcar, seguidos por óleo diesel, óleo combustível e carvão mineral (ANEEL, 2018). O estado de São Paulo é o maior consumidor brasileiro e segundo maior gerador de energia elétrica sendo que, em 2016, importou mais de 110.000 GWh de eletricidade (SEM-GESP, 2017). Por essa razão, foram selecionados para cenários da tese duas termelétricas paulistas que operam em conjunto formando um ciclo combinado a gás natural, localizadas na cidade de São Paulo. Trata-se da UTE Fernando Gasparian (também denominada Nova Piratininga) e a UTE Piratininga, com potências fiscalizadas de 386 MW e 190 MW, respectivamente (ANEEL, 2018) (Figura 21).

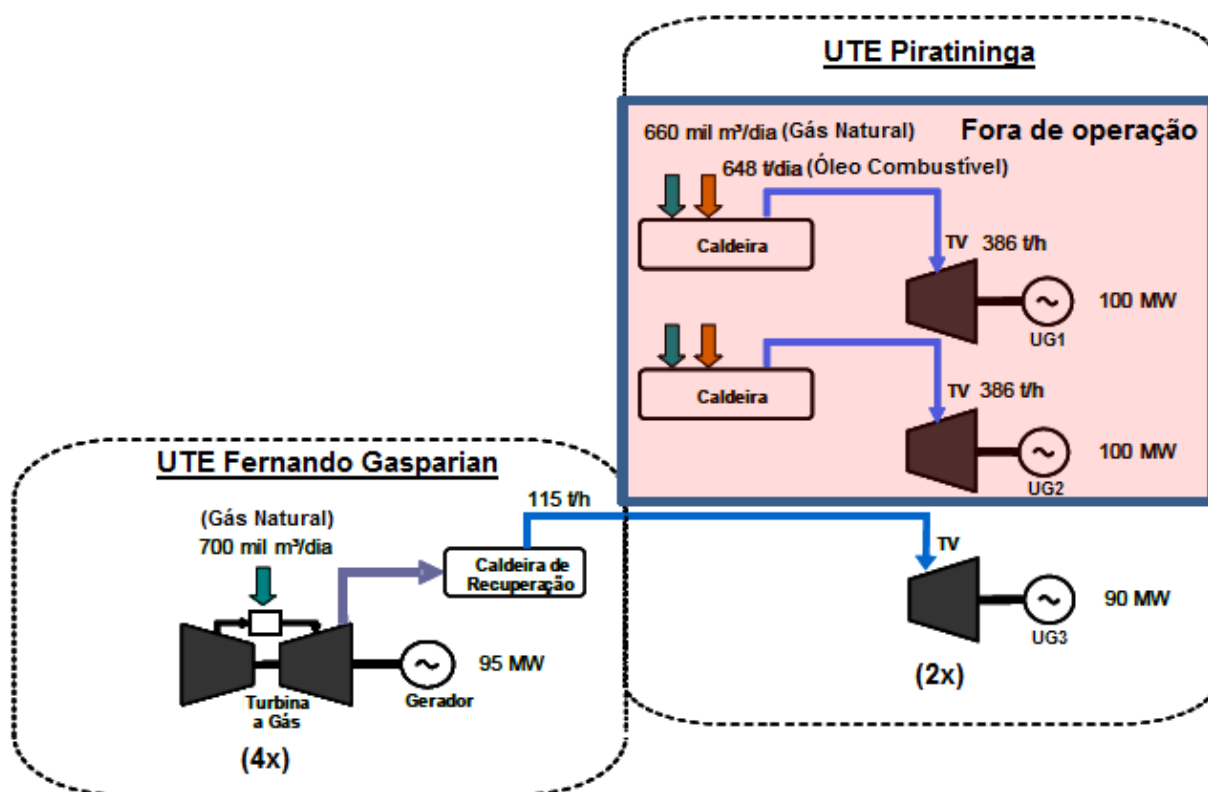
Figura 21 - Centrais termelétricas selecionadas para o estudo



Fonte: Adaptado de Meirelles (2017)

A central termelétrica Piratininga foi inaugurada em 1954 com quatro turbinas a vapor operando com óleo combustível. Em 2001 a central termelétrica Nova Piratininga foi inaugurada e em 2007 rebatizada como Fernando Gasparian com potência de 386 MW, utilizando 4 conjuntos de turbina a gás. Atualmente, as UTE Fernando Gasparian e Piratininga operam em ciclo combinado, com 4 conjuntos a gás e 2 turbinas a vapor, utilizando gás natural como combustível, conforme ilustrado na Figura 22. De acordo com Meirelles (2017), existe a previsão de instalação de uma nova UTE no local, denominada UTE Pedreira, com potência estimada de 1,6 GW. Informações mais detalhadas a respeito dos componentes das termelétricas selecionadas são apresentadas no capítulo 4.

Figura 22 - Esquema de operação das UTE selecionadas



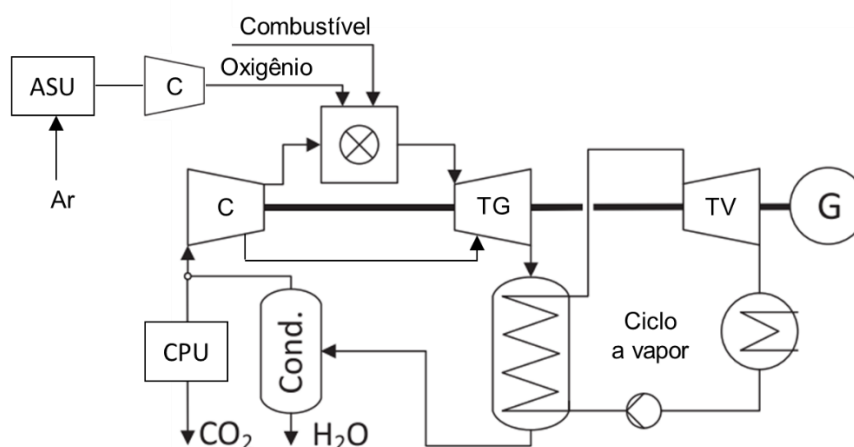
Fonte: Adaptado de EMAE (2017)

3.2.2 Técnica de captura de CO₂: Oxidcombustão

Conforme citado na seção 2.1.4.1, o oxidcombustão é uma das técnicas mais promissoras para captura de carbono, principalmente por sua baixa complexidade. Nesta tese foram

utilizados como modelo o ciclo SCOC-CC, aqui denominado OCC (do inglês *Oxyfuel Combined Cycle*) originalmente proposto por Bolland e Saether (1992), cuja configuração simplificada é ilustrada na Figura 23. Destaca-se que o ciclo OCC considerado nesta tese é apresentado de forma detalhada no capítulo 5 e, informações complementares a respeito da tecnologia OCC, como composição dos fluidos de trabalho e configuração das unidades ASU e CPU são apresentadas no capítulo 4. A unidade de separação de ar, realiza a separação do oxigênio por destilação criogênica do ar atmosférico, para que este atinja 95% de O_2 , de acordo com o estudo de Belaissaoui *et al.* (2014). Depois de separado, o oxigênio é comprimido para que seja injetado na câmara de combustão, juntamente com o gás natural e o gás rico em CO_2 que é recirculado no processo. Esse gás rico em CO_2 advém do gás de combustão, que, após seu resfriamento na caldeira de recuperação, passa por um sistema de condensação para retirada de excesso de água. Parte do CO_2 advindo do condensador é recirculado (utilizado na câmara de combustão e também para o resfriamento da turbina) e outra parte é enviada para a unidade de processamento de CO_2 (CPU), para que este seja purificado visando sua captura, de acordo com a tecnologia apresentada por Pipitone e Bolland (2009), descrita naquele estudo como caso 1. O calor trocado pelo gás de combustão na caldeira de recuperação permite a produção de potência por um ciclo a vapor. Depois de ser capturado, o CO_2 é transportado via gasoduto para depósitos geológicos. Todas as etapas, desde a captura do CO_2 , transporte e armazenamento serão incluídas neste estudo, bem como a infraestrutura necessária para sua operação.

Figura 23 - Ciclo combinado com oxicombustão simplificado



Nota: ASU (*Air Separation Unit*), C (*Compressor*), CPU (*CO₂ processing unit*), TG (*turbina a gás*), TV (*turbina a vapor*) e Cond (*Condensador*)

Fonte: Adaptado de Stanger *et al.* (2015)

3.2.3 Ferramentas computacionais utilizadas

Durante a realização deste trabalho foram utilizados o software EES (do inglês *Engineering Equation Solver*) para a modelagem das centrais termelétricas e posterior análise energética e exergética. O EES, desenvolvido pela empresa F-Chart Software, é um programa que permite a resolução de equações algébricas e diferenciais não-lineares acopladas, equações diferenciais e integrais. Permite também otimizar, fornecer análises de incerteza, executar regressão linear e não linear e gerar gráficos de qualidade de publicação. Uma característica importante do EES é o banco de dados de propriedades termodinâmicas e de transporte de alta precisão, fornecido para centenas de substâncias (EES, 2020a).

O software SimaPro (SIMAPRO, 2020) v.8.5.2, juntamente com a base de dados Ecoinvent (ECOINVENT, 2020a) v.3.4 foram utilizados para a avaliação do ciclo de vida da geração de energia elétrica das centrais termelétricas selecionadas. O software SimaPro, desenvolvido pela empresa holandesa PRé Sustainability, reúne os principais bancos de dados e métodos de AICV e proporciona fácil criação e edição de novos processos para inserção no sistema de produto, como também a adaptação de métodos de AICV. Atualmente é o software mais utilizado no mundo, permitindo análises em cada um dos fluxos de matéria e energia e a identificação precisa da origem dos impactos ambientais.

A base de dados suíça Ecoinvent, pertencente à associação sem fins lucrativos de mesmo nome fundada em 2013, e fornece dados de processos bem documentados para milhares de produtos. Atualmente, essa é a mais completa base de dados do mundo, com mais de 14.700 conjuntos de dados de ICV em diferentes áreas como fornecimento de energia, agricultura, transporte, biocombustíveis e biomateriais, materiais de construção, etc. (ECOINVENT, 2020b).

3.3 PROPOSTA CONCEITUAL

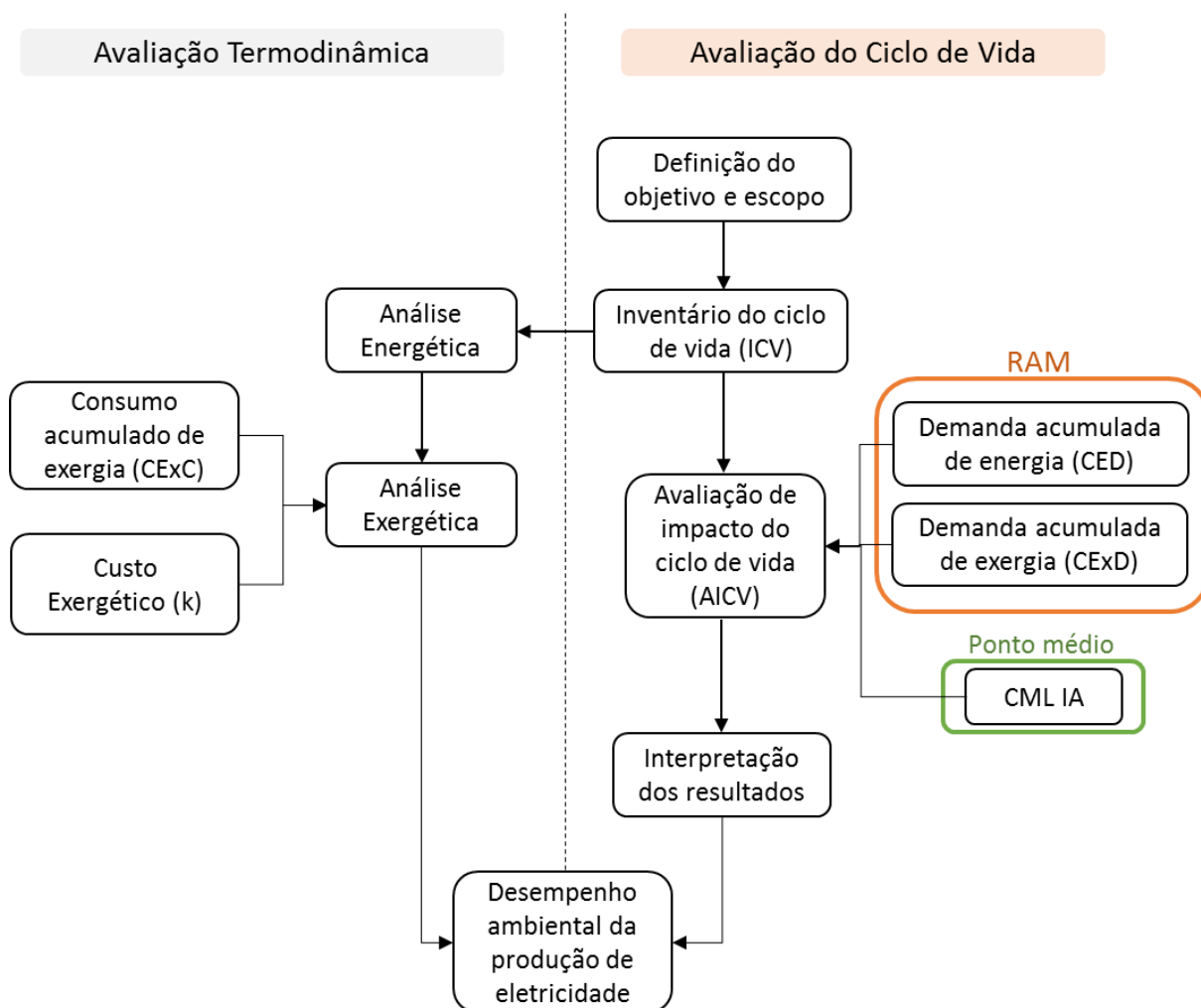
Com a finalidade de sistematizar as avaliações termodinâmica e ambiental propostas utilizando bases exergéticas, apresenta-se a proposta conceitual por meio do fluxograma da Figura 24. O primeiro passo é a definição do objetivo e escopo do estudo, conforme exige a metodologia ACV, para que as fronteiras do estudo sejam definidas, bem como o objetivo a ser atingido e o modo de apresentação dos resultados. O próximo passo é o planejamento e realização do inventário, a partir do qual se obtém dados para realização da análise energética e da avaliação de impacto do ciclo de vida. Fez-se então as modelagens e simulações do

processo de geração de energia, utilizando o software EES para executar os balanços de massa, energia e exergia. Feita a análise energética, foi iniciada a análise exergética por meio dos métodos de consumo acumulado de exergia e custo exergético, visando obter a performance ambiental em nível de processo utilizando o conceito de exergia. Essas análises permitem avaliar a eficiência da conversão de energia, identificar os principais pontos de irreversibilidade da central termelétrica e também a penalização advinda das emissões de CO₂, em uma abrangência do portão ao portão.

A avaliação de impacto do ciclo de vida permite a obtenção da performance ambiental em nível do ciclo de vida da geração de eletricidade, incluindo toda a infraestrutura necessária para a construção, operação e descomissionamento da central termelétrica, da unidade de separação de ar, do processo de compressão do CO₂ e do gasoduto. Essa avaliação foi realizada a partir de dois métodos de contabilização de recursos: demanda acumulada de energia e exergia; e de um método de ponto médio, o método CML IA *baseline*, que permite a avaliação das demais categorias de impacto (PDRAf, PDRAm, PAG, PDCO, PFFO, PTH, PA, PE, PEcAD, PEcM e PEcT visando permitir uma análise mais abrangente e necessária dos impactos ambientais, conforme descrito na seção 2.2.2. A partir da interpretação dos resultados da AICV, juntamente com os dados da avaliação termodinâmica (análise energética e exergética) é possível obter o desempenho ambiental da geração de energia elétrica para ambos os cenários avaliados.

Inicialmente um cenário NGCC, que compreende a central termelétrica a gás natural selecionada e, posteriormente, um cenário OCC, que corresponde a mesma central termelétrica avaliada no cenário NGCC, porém com a inserção da captura de CO₂ via oxidação, e posterior transporte e armazenamento do CO₂. Portanto, na presente tese, por meio da validação da proposta conceitual apresentada, foi determinado o desempenho ambiental com base exergética resultando na apresentação de *hotspots* tanto em nível de processo, como em nível do ciclo de vida.

Figura 24 - Proposta conceitual para avaliação ambiental

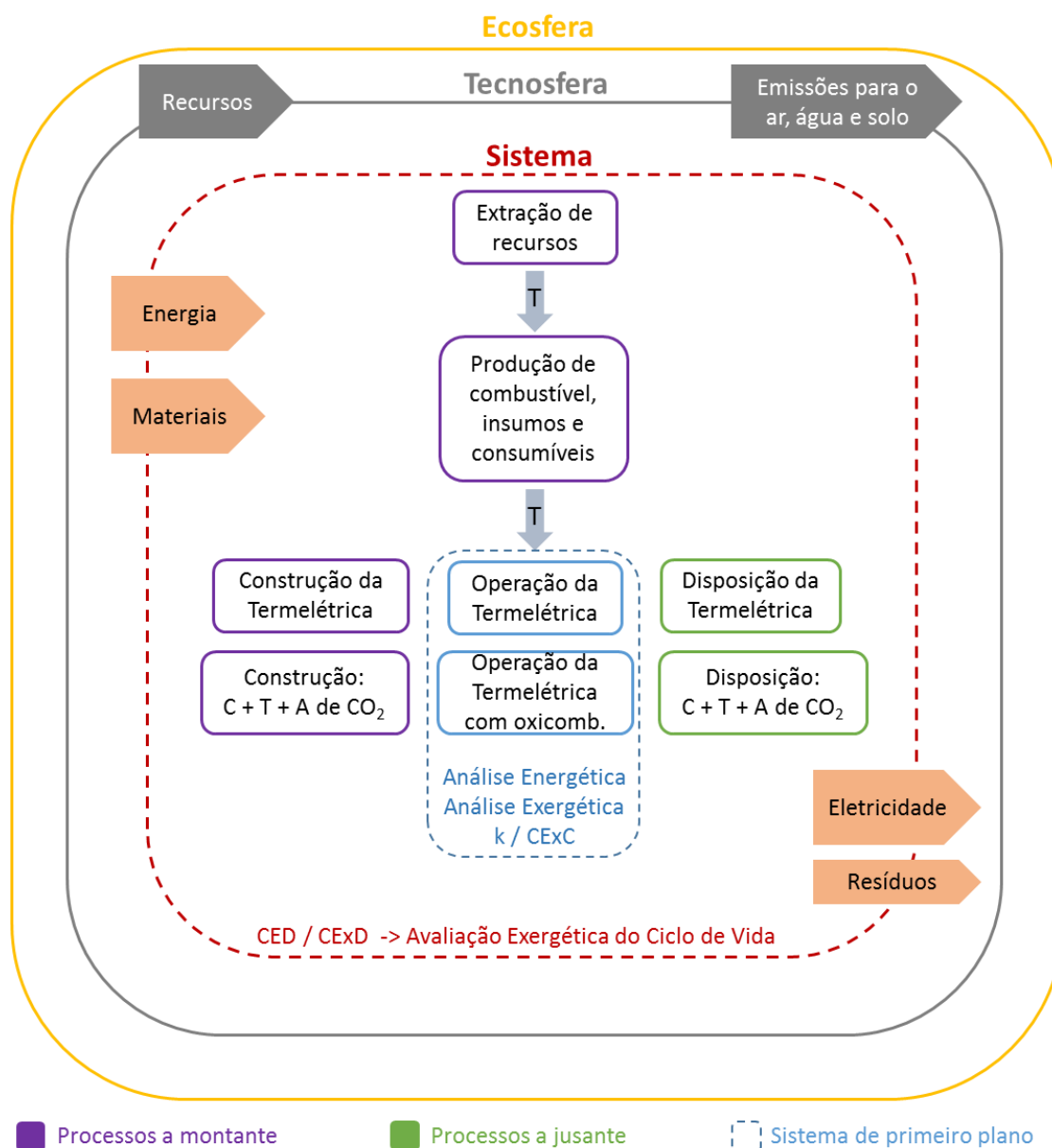


Fonte: Produção do próprio autor

A abrangência dos diferentes métodos termodinâmicos e de ACV utilizados para avaliação dos cenários propostos pode ser observada na Figura 25. A análise energética, bem como os métodos de consumo acumulado de exergia e custo exergético tem abrangência do portão ao portão enquanto os métodos de AICV tem abrangência do berço ao túmulo. De acordo com a metodologia ACV, a ecosfera é definida como o ambiente e a tecnosfera como o ambiente construído pelo homem (EC- JRC, 2010). O sistema de produto pode ser dividido em processos

a montante (que precedem na cadeia de abastecimento), processos a jusante (que sucedem, como uso e fim de vida) e sistemas de primeiro⁴⁰ e segundo plano⁴¹ (EC- JRC, 2010).

Figura 25 - Sistema de produto e domínios dos diferentes métodos utilizados



Nota: C (captura), T (transporte) e A (armazenamento) de CO₂.

Fonte: Produção do próprio autor

⁴⁰ Aquele que abarca os processos do sistema que são específicos a ele, de acordo com o contexto da perspectiva da especificidade.

⁴¹ Consiste nos processos que podem ser representados de maneira adequada por um mercado homogêneo tomado pela média ou dados genéricos equivalentes.

Para a interpretação dos resultados obtidos por meio da proposta conceitual, é importante considerar as diferentes fronteiras características de cada método utilizado (Figura 25). A aplicação dos diferentes métodos visa uma avaliação de desempenho ambiental mais abrangente, utilizando a avaliação termodinâmica em termos de energia e exergia a fim de proporcionar uma ACV mais completa e permitir uma comparação sistemática dos diferentes métodos de contabilização de recursos.

3.4 AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA

Conforme ilustrado na Figura 25, a avaliação termodinâmica da central termelétrica com e sem a inserção de técnica de captura de CO₂ por oxidação abrange inicialmente o ciclo termodinâmico da central e posteriormente o ciclo com as alterações advindas da inserção de captura, bem como a unidade de separação de ar.

3.4.1 Análise energética

Utilizando condições de regime permanente e desconsiderando as parcelas de energia cinética e potencial (pela variação insignificante), as expressões para o balanço de massa e energia correspondem às equações (1) e (2) e a eficiência de primeira lei ou eficiência térmica à equação (3).

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\sum_s \dot{m}_s h_s - \sum_e \dot{m}_e h_e = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_{forn}} \quad (3)$$

3.4.2 Análise exergética

Para a análise exergética foram consideradas as mesmas condições citadas para a análise energética, e o estado padrão de referência tem suas propriedades de pressão e temperatura definidas como: 0,0926 MPa e 27°C, conforme informado no EIA das UTE selecionadas (EMAE, 2002). A exergia total, representada pela soma das componentes de exergia física,

química, cinética e potencial corresponde à equação (4). A exergia total pode ser aproximada pela equação (5) em função apenas das parcelas física e química, pois as parcelas cinética e potencial podem ser consideradas formas ordenadas de energia, sendo completamente conversíveis em trabalho e tem qualidade invariante (KOTAS, 1985).

$$Ex = Ex_f + Ex_q + Ex_c + Ex_p \quad (4)$$

$$Ex = Ex_f + Ex_q \quad (5)$$

As expressões de exergia física, exergia química e eficiência exergética ou racional definidas por Kotas (1985), Szargut, Morris e Steward (1988) e Stanek (2017), são apresentadas considerando as componentes de exergia da Figura 5, e correspondem às equações (6), (7), (8) e o balanço de exergia à equação (9).

$$ex_f = ex_{f,T} + ex_{f,P} = h - h_0 - T_0 (s - s_0) \quad (6)$$

$$ex_q = ex_{q,rq} + ex_{q,sm} = \Delta G_f^0 + \sum_k n_k ex_{q,k}^0 + R T_0 \sum_k n_k \ln n_k \quad (7)$$

$$\eta_{II} = \frac{\sum Ex_s}{\sum Ex_e} \quad (8)$$

$$\sum_s \dot{m}_s ex_{f,s} - \sum_e \dot{m}_e ex_{f,e} = \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) - \dot{W}_{VC} - \dot{Ex}_d \quad (9)$$

3.4.2.1 Consumo acumulado de exergia (CExC) e Custo Exergético Unitário (k*)

Ambos os conceitos de consumo acumulado de exergia (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988) e de custo exergético (LOZANO; VALERO, 1993) buscam contabilizar o conteúdo exergético inserido em uma cadeia de produção para gerar um produto com valor exergético agregado. A soma da exergia dos recursos naturais consumidos em todos os estágios do processo de produção de um determinado produto caracteriza o consumo acumulado de exergia, enquanto o custo exergético busca associar custos monetários aos fluxos exergéticos. Para ambos os métodos, é de grande importância a definição do grau de desagregação, dos métodos de alocação e das fronteiras do sistema em análise (DEWULF *et al.*, 2008).

Partindo do princípio de equivalência dos métodos de consumo acumulado de exergia e custo exergético (advindo da teoria do custo exergético), conforme descrito por Dewulf *et al.*

(2008), o consumo exergético acumulado pode ser obtido por meio da determinação dos custos exergéticos unitários, sendo este o custo exergético dos fluxos associados ao produto.

A partir da determinação da matriz estrutural ou matriz incidência, conforme ilustrado na Figura 7, na qual as linhas da matriz representam os fluxos e as colunas os componentes do sistema, os fluxos são classificados como insumos (F), produtos (P) e perdas (L). Para que sejam determinados os custos exergéticos (B^*), a matriz incidência é modificada utilizando proposições de acordo com Lozano e Valero (1993). Essas proposições são utilizadas a fim de definir mais equações para que a matriz incidência possa se tornar quadrada e gerar a matriz de custos, conforme ilustrado na Figura 7. A determinação dos custos é realizada seguindo as quatro proposições apresentadas a seguir e permite tanto a determinação do custo exergético (associado ao consumo exergético acumulado) quanto a determinação do custo monetário (custo exergoeconômico), este último definido como a soma dos custos da exergia utilizada e dos custos de capital, operação e manutenção associados a produção.

(P1): Para cada componente de um sistema a soma dos custos exergéticos de entrada é igual à soma dos custos exergéticos de saída, ou seja, o custo exergético é uma propriedade conservativa;

(P2): O custo exergético dos fluxos de entrada do sistema é igual a sua exergia, se houver ausência de um valor externo;

(P3): Na ausência de uma atribuição externa aos fluxos de perdas do sistema, deve-se atribuir um custo exergético nulo uma vez que não tem utilidade posterior.

(P4a): Se múltiplos fluxos de produto fazem parte do insumo, sua exergia não está em jogo e o custo exergético unitário do fluxo é constante por meio do subsistema;

(P4b): Se ocorre múltiplos fluxos de produto de mesma natureza em um subsistema, esses devem ter um custo exergético unitário equivalente.

3.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O estudo de ACV conduzido neste trabalho é baseado nas normas ABNT (2014a, 2014b) e nos manuais EC-JRC (2010), publicações que fornecem orientação técnica para estudos detalhados de ACV. Portanto, cada uma das etapas detalhadas a seguir foi realizada de acordo com as normas citadas, utilizando-se o software SimaPro para auxiliar na etapa de AICV.

3.5.1 Definição do objetivo e escopo

O detalhamento do objetivo do estudo é realizado por meio das seguintes definições: (1) aplicações previstas do produto do estudo, (2) limitações do estudo, (3) razões do estudo, (4) público alvo e tipo do público alvo, (5) existência de comparações envolvidas, (6) Comissários e (7) classificação do contexto decisório.

Depois de definido o objetivo do estudo, seu escopo deve ser delimitado a partir das definições seguintes: (1) consistência dos métodos, premissas e dados, (2) reprodutibilidade do estudo, (3) tipos de resultados, (4) sistema de produto (função, unidade funcional e fluxo de referência), (5) estrutura da modelagem do ICV (atribucional ou consequencial) e tratamento da multifuncionalidade (subdivisão, expansão/substituição ou alocação), (6) fronteiras do sistema (requisitos de completude e critérios de corte), (7) categorias de impacto da AICV (métodos de AICV, normalização e ponderação), (8) representatividade e adequabilidade tecnológica, geográfica e temporal, (9) tipos, qualidade (matriz pedigree) e fontes de dados e informações necessárias (contendo precisão e incertezas), (10) requisitos especiais para comparações entre sistemas, (11) identificação de necessidade de revisão crítica e (12) planejamento de comunicação dos resultados.

3.5.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A fase de inventário do ciclo de vida deve ser realizada de acordo com os seguintes requisitos: (1) identificação dos processos dentro das fronteiras do sistema, (2) planejamento da coleta de dados (dados de primeiro e segundo plano, primários e secundários), (3) coleta de dados de processos unitários, (4) desenvolvimento de dados genéricos, (5) seleção de dados secundários, (6) cálculo da média de dados, (7) modelagem do sistema, (8) resolução das questões de multifuncionalidade de processos e (9) cálculo dos resultados de ICV.

3.5.3 Avaliação de impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Nesta fase, os métodos e categorias de impacto selecionados na fase de escopo são utilizados para os cálculos dos resultados da AICV. Os cálculos são realizados por meio da atribuição dos fluxos elementares a uma ou mais categorias de impacto (etapa denominada classificação). Posteriormente os fluxos elementares individuais das substâncias (m_i) são multiplicados pelos fatores de caracterização das categorias de impacto selecionadas (CATx),

etapa denominada caracterização, afim de obter um indicador de categoria de impacto, conforme equação (10). Posteriormente podem ser realizados procedimentos de normalização, agrupamento e ponderação (elementos opcionais), se necessário.

$$impacto_{CATx} = \sum_i m_i \text{ fator de caracterização}_{CATx,i} \quad (10)$$

3.5.3.1 Métodos de contabilização de recursos (RAM)

Primeiramente serão aplicados os métodos RAM, também classificados como métodos de pontuação única, caracterizados por abordarem somente uma categoria de impacto, como por exemplo, a pegada hídrica e pegada de carbono (GOEDKOOOP *et al.*, 2016). Os métodos RAM selecionados para esse estudo são: CED (para determinar o uso acumulado de energia) e CExD (com o intuito de verificar o consumo de recursos naturais em termos de exergia).

O método CED, também denominado consumo de energia primária, tem diferentes abordagens, das quais 5 foram avaliadas por Frischkecht *et al.* (2015) que concluiu que o método padrão utilizado na base de dados Ecoinvent, selecionada para esse estudo, é consistente. Os fatores de caracterização dados para os recursos energéticos são divididos em 5 categorias de impacto: (1) não renovável fóssil, (2) não renovável nuclear, (3) renovável biomassa, (4) renovável eólica, solar e geotérmica, e (5) renovável água, cada uma com fator de ponderação 1. No método CED padrão, são considerados o poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis fósseis e biomassa, o conceito de energia captada⁴² e a eficiência térmica da energia nuclear. Pode-se representar o cálculo da Demanda Acumulada de Energia padrão pela equação (11), conforme a norma VDI 4600 (2012):

$$CED = CED_p + CED_U + CED_D \quad (11)$$

O método CExD equivale ao método CExC de Szargut (2005), porém especificado em MJ-equivalente, destacando que se trata de um indicador de avaliação de impacto e não um fluxo elementar (BÖSCH *et al.*, 2007). Esse indicador de categoria de impacto é agrupado em oito categorias de recursos: (1) fóssil, (2) nuclear, (3) hidrelétrica, (4) biomassa, (5) outras

⁴² A entrada de energia renovável no ambiente artificial é igual à quantidade de energia fornecida pela instalação coletora de energia, ou seja, a eficiência de conversão não é considerada (FRISCHKNECHT *et al.*, 2007).

fontes renováveis, (6) água, (7) minerais e (8) metais. Os fatores de caracterização de exergia para 112 recursos da base de dados Ecoinvent foram incluídos nos cálculos. O indicador é dado de acordo com a equação (12) (BÖSCH *et al.*, 2007) na qual m_i é a massa do recurso material i , $ex_{q,i}$ é a exergia química por quilo da substância i , e_j é quantidade de energia do fluxo de energia j e r_{ex} a relação exergia/energia do fluxo de energia (cinética, potencial, nuclear, radiativa ou térmica).

$$CExD = \sum_i m_i ex_{q,i} + \sum_j e_j r_{ex-e(c,p,n,r,t),j} \quad (12)$$

3.5.3.2 Método de Ponto Médio: CML IA *baseline*

De acordo com um estudo realizado por Mendes, Bueno e Ometto (2016), como o Brasil não possui um método de AICV próprio, existe a necessidade da utilização de métodos disponíveis na literatura. Para a escolha do método, que geralmente é criado considerando escopo de aplicação local, é necessário buscar por métodos que possuam escopo global, visando minimizar interferências nos resultados da AICV. Dentre os métodos citados anteriormente no capítulo 2, o método CML IA *baseline* foi selecionado. Essa escolha se deve ao fato do método ser confiável, relativamente atual, possuir nível de avaliação de impacto de ponto médio e também abrangência global em 50% de suas categorias de impacto. As categorias de impacto disponíveis no método CML IA *baseline*, são as seguintes: PDRA (fóssil e mineral), PAG, PDCO, PFFO, PTH, PA, PE e PEc (água doce, marinha e terrestre), sendo selecionadas todas as categorias para avaliação dos impactos na presente tese. No Quadro 7 são descritas as categorias de impacto, sua abrangência, seus respectivos fatores de caracterização e unidades.

Quadro 7 - Categorias de impacto disponíveis para o método CML IA *baseline*

(continua)

Categoria de impacto	Abrangência	Exemplos de inventário	Fator de Caracterização	Descrição do Fator de Caracterização
Depleção de recursos abióticos (fóssil e mineral)	Global	Quantidade de minerais usados	PDRAf e PDRAM, dados em MJ e kg Sb-eq	Converte os dados de inventário em uma razão entre recursos usados e recursos disponíveis
Aquecimento Global	Global	CO ₂ , NO ₂ , CH ₄ , CFCs, HCFCs, CH ₃ Br	PAG, dado em kg CO ₂ -eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de dióxido de carbono expressos para um horizonte de 50, 100 ou 500 anos.
Depleção do ozônio estratosférico	Global	CFCs, HCFCs, CH ₃ Br	PDCO, dado em kg CFC-11-eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de triclorofluormetano (CFC-11).
Formação de oxidantes fotoquímicos	Europa	Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	PFFO, dado em kg C ₂ H ₄ -eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de etileno (C ₂ H ₄).
Toxicidade Humana	Global	Descargas totais para o ar, água e solo	PTH, dado em kg 1,4-DB-eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (C ₆ H ₄ Cl ₂).
Acidificação	Europa	SO _x , NO _x , HCl, HF, NH ₄	PA, dado em kg SO ₂ -eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de dióxido de enxofre.
Eutrofização	Global	PO ₄ , NO, NO ₂ , NH ₄	PE, dado em kg PO ₄ ³⁻ -eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de fosfato.
Ecotoxicidade terrestre	Europa	Químicos tóxicos de concentração letal roedores	PEcT, dado em kg 1,4-DB-eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (C ₆ H ₄ Cl ₂).

Quadro 7 - Categorias de impacto disponíveis para o método CML IA *baseline*

(conclusão)

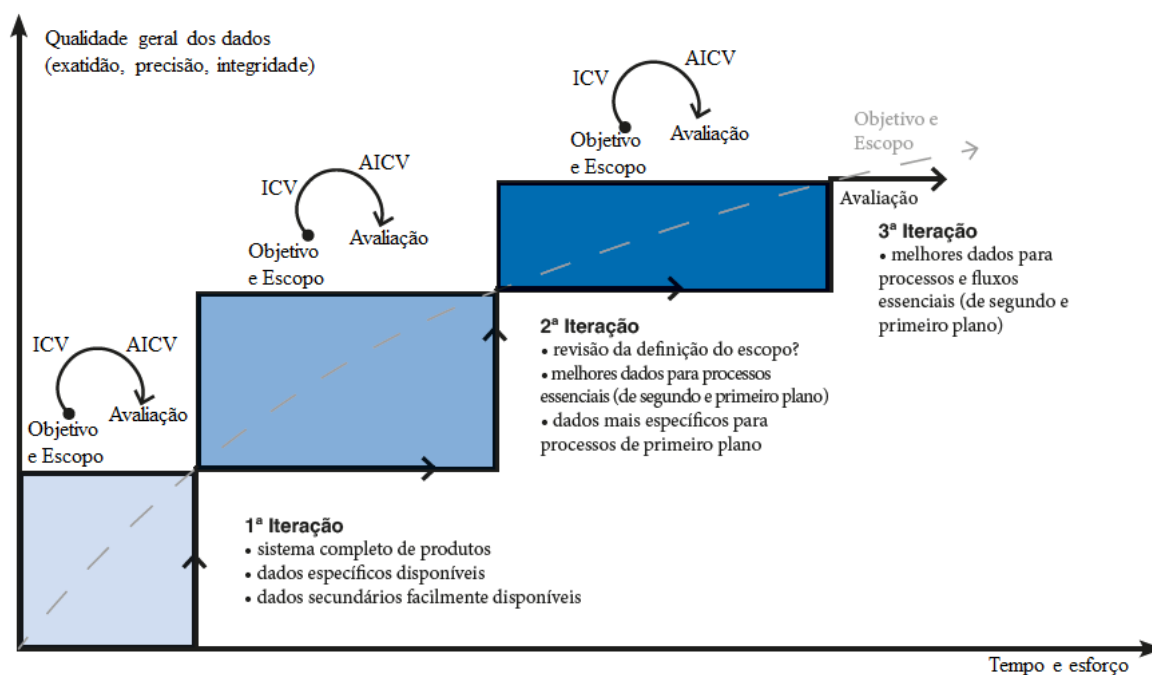
Categoria de impacto	Abrangência	Exemplos de inventário	Fator de Caracterização	Descrição do Fator de Caracterização
Ecotoxicidade marinha	Europa	Químicos tóxicos de concentração letal para peixes	PEcM, dado em kg 1,4-DB-eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (C ₆ H ₄ Cl ₂).
Ecotoxicidade água doce	Europa	Químicos tóxicos de concentração letal para peixes	PEcAD, dado em kg 1,4-DB-eq	Converte os dados de inventário em equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (C ₆ H ₄ Cl ₂).

Fonte: Adaptado de Saic (2006)

3.5.4 Interpretação

Depois de obtidos os resultados da AICV, nesta fase são identificados os principais processos, parâmetros, pressupostos e fluxos elementares. Em seguida então, devem ser realizadas análises de sensibilidade, consistência e completude dos dados. Para finalizar o estudo, são formuladas suas conclusões e recomendações, seguidas da confecção de um relatório para análise crítica do estudo. Na Figura 26 é possível observar a natureza iterativa de uma ACV. As fases citadas anteriormente são repetidas, com uma possível revisão limitada do objetivo e do escopo, até que a exatidão necessária do modelo e dos processos do sistema e a completude e precisão necessárias dos resultados do inventário tenham sido alcançadas (EC-JRC, 2010).

Figura 26 - Esquema da natureza iterativa da ACV



Fonte: Adaptado de EC-JRC (2010)

4 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO E INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Neste capítulo são apresentadas as fases de definição de objetivo e escopo e inventário do ciclo de vida das centrais termelétricas estudadas, realizadas de acordo com os requisitos definidos nas normas ABNT (2014a, 2014b) e no Manual ILCD do EC- JRC (2010).

4.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO

O objetivo do presente estudo é realizar a ACV da geração de energia elétrica das centrais termelétricas Fernando Gasparian e Piratininga, que operam em ciclo combinado, com e sem captura de carbono por oxidcombustão. Na sequência são detalhados os objetivos do estudo de ACV, de acordo com os requisitos definidos nas normas ABNT (2014a, 2014b).

4.1.1 Aplicações previstas do produto do estudo de ACV

O produto do estudo de ACV é a presente tese e a principal aplicação prevista é a disponibilização de dados quantitativos do ciclo de vida das centrais termelétricas Fernando Gasparian e Piratininga para uso comparativo e para avaliação de desempenho ambiental da incorporação de captura de CO₂ por oxidcombustão em centrais termelétricas a gás natural.

4.1.2 Limitações do estudo

As principais limitações encontradas nessa pesquisa são:

- 1) Escassez de dados primários para o primeiro plano;
- 2) Predominância de dados secundários obtidos em 2002 para o primeiro plano;
- 3) Predominância de dados secundários com abrangência global;

4.1.3 Razões do estudo

Avaliar o desempenho ambiental das centrais termelétricas selecionadas contemplando a inserção de captura de CO₂ por oxidcombustão.

4.1.4 Tipo de público-alvo

Por se tratar de uma tese de doutorado, que quando publicada será de acesso público, o público-alvo é caracterizado como externo e técnico (pois a tese é elaborada em linguagem técnica, para público especializado).

4.1.5 Existência de comparações envolvidas

Realizou-se comparações entre as centrais termelétricas com e sem captura de CO₂ e comparações dos resultados obtidos em relação à literatura publicada sobre o tema.

4.1.6 Comissários

Entre os agentes envolvidos no estudo estão a autora da tese, aluna da FEG - UNESP, cuja pesquisa é financiada pela CAPES e FAPESP, e os orientadores, que são professores e pesquisadores da área de energia da FEG – UNESP, especialistas em captura de carbono e exergia. Entre os avaliadores do trabalho estão um professor e pesquisador da área de produção da FEG-UNESP, especialista em sistemas integrados de gestão e sustentabilidade/gestão ambiental empresarial, um professor e pesquisador da área de energia da FEG – UNESP, especialista em termoeconomia e exergia. Entre os avaliadores externos à UNESP, estão uma professora e pesquisadora especialista em ACV, do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e um professor e pesquisador especialista em oxcombustão, do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

4.1.7 Classificação do contexto decisório

De acordo com o manual ILCD do EC- JRC (2010), o contexto decisório é um critério fundamental para determinar a estrutura de modelagem do ICV (“atribucional” ou “consequencial”) e as abordagens relacionadas ao ICV (“alocação” ou “substituição”).

Para o presente estudo, o contexto decisório pode ser classificado como C1, ou seja, um estudo de caráter descritivo, no qual são contabilizados os impactos, considerando interações com outros sistemas.

4.2 DEFINIÇÃO DO ESCOPO

Após a definição do objetivo, o escopo do estudo é delimitado e os processos incluídos nas fronteiras do estudo são descritos. A seguir são apresentados os itens que correspondem ao escopo do presente estudo de ACV, de acordo com os requisitos definidos no Manual ILCD do EC- JRC (2010).

4.2.1 Consistência dos métodos, premissas e dados

Quanto aos métodos, foram realizados balanço de massa e posteriormente balanços de energia e exergia utilizando a primeira e segunda leis da Termodinâmica para análise energética e exergética das centrais termelétricas. Para a obtenção de propriedades termodinâmicas dos fluidos de trabalho foi utilizado o software EES e para obtenção das exergias químicas padrão os valores publicados por Bilgen (2009), seguindo o modelo de cálculo definido por Morris e Szargut (1986). As propriedades do combustível (gás natural) e do gás de combustão foram obtidas por meio do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) realizado pela EMAE (2002).

Quanto as premissas, estas se baseiam no fato de que a ACV da incorporação de oxidação (técnica de captura de CO₂ que ainda não se encontra em plena maturidade tecnológica) em centrais termelétricas a gás natural pode ser realizada com a utilização de dados secundários suportada por avaliação termodinâmica, e que os resultados obtidos podem dar suporte ao planejamento energético. Essa afirmação se baseia nos resultados dos diferentes artigos publicados envolvendo processos de geração de energia e captura de CO₂, conforme citado no capítulo 2.

Quanto aos dados, os dados primários e secundários obtidos no EIA (EMAE, 2002) foram considerados confiáveis, visto que foram os dados reportados aos órgãos ambientais vigentes para a concessão da licença de operação das centrais termelétricas. Todos os outros dados secundários foram retirados de bancos de dados confiáveis e também de estudos publicados na literatura. Uma avaliação crítica do estudo por um representante das centrais termelétricas foi solicitada, porém esta não foi concedida pela empresa responsável (EMAE). Destaca-se a dificuldade na obtenção de dados primários em empresas nacionais e na obtenção de dados secundários em órgãos governamentais de fiscalização.

4.2.2 Reprodutibilidade

A forma como é apresentado o estudo permite a um praticante independente reproduzir satisfatoriamente seus resultados, pois não existe presença de dados confidenciais. Para isso, basta que esse praticante tenha conhecimento em termodinâmica e ACV e acesso aos bancos de dados de artigos científicos, bancos de dados de ACV e ao software SimaPro ou outro software que contenha os bancos de dados e métodos AICV utilizados neste estudo.

4.2.3 Tipos de resultados

De acordo com o manual ILCD do EC- JRC (2010), os tipos de resultados tem uma relação direta com o contexto decisório selecionado, ou seja, com as aplicações pretendidas do estudo. Portanto, nesse caso, acredita-se que o resultado é um estudo comparativo assertivo de ACV, pois ao final do estudo conclui-se explicitamente qual a melhor alternativa dentre centrais termelétricas com e sem captura de CO₂ por oxidação.

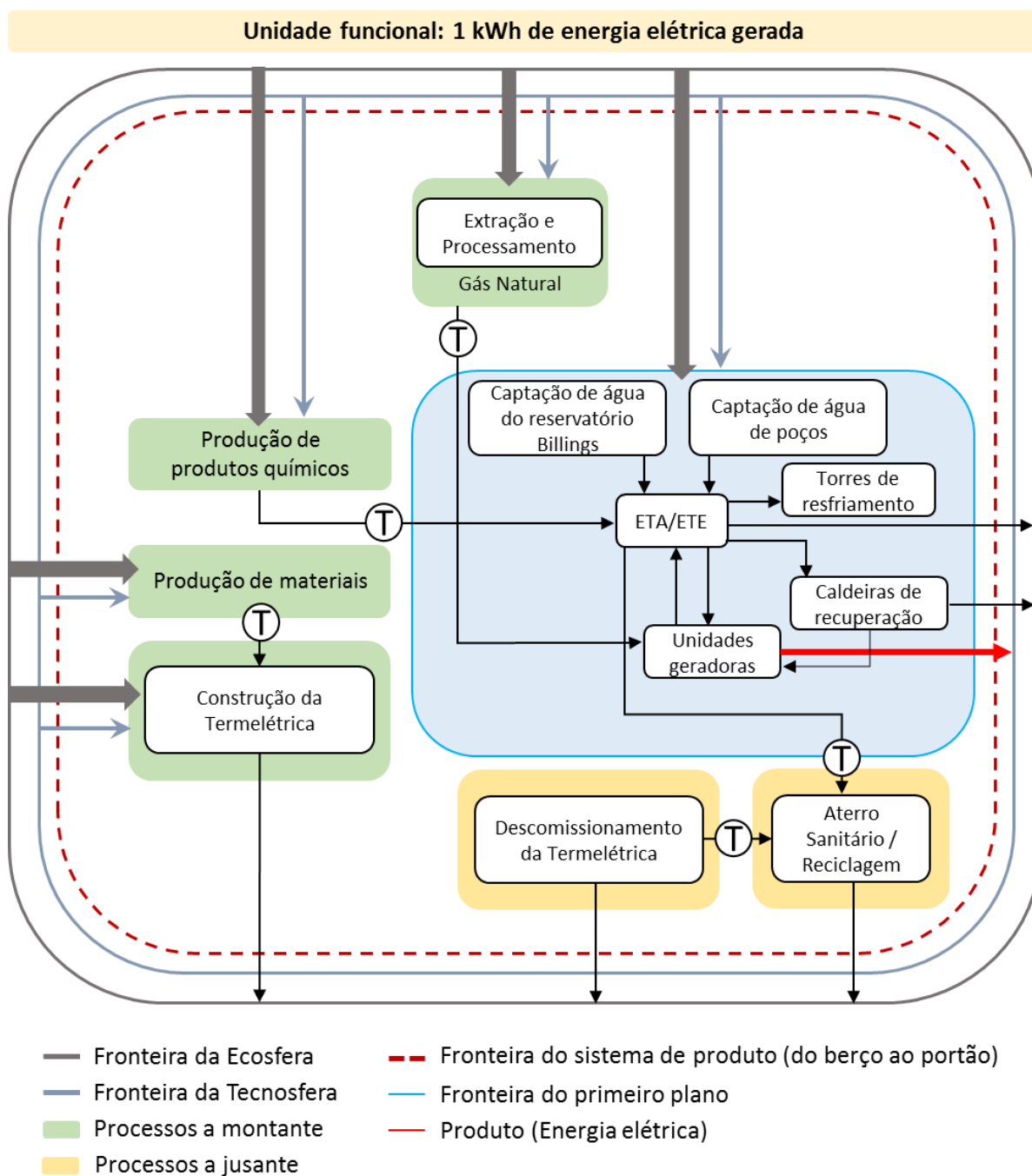
4.2.4 Sistema de produto

O sistema de produto em estudo é caracterizado pelas UTE propriamente ditas (primeiro plano), bem como os processos à montante e à jusante (segundo plano), com abrangência do berço ao túmulo.

4.2.4.1 Cenário NGCC

As fronteiras do sistema de produto, processos à montante e à jusante para o cenário NGCC são apresentados na Figura 27. Os processos à montante são compostos basicamente da produção de materiais para a construção das UTE, produção de gás natural que é utilizado como combustível para a geração de energia elétrica e produção dos produtos químicos utilizados para o tratamento de água e efluentes das UTE na ETA/ETE. De acordo com o EIA realizado pela EMAE (2002), o gás natural utilizado nas UTE, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 3, advém de diferentes origens: 53% da Bolívia, 41,4% da Bacia de Campos e 5,6% da Bacia de Santos. A composição do gás natural adotada foi retirada do estudo realizado por IEAGHG (2015). Na Tabela 4 são apresentadas também as propriedades do ar, que é utilizado como agente oxidante na combustão do gás natural.

Figura 27 - Fronteiras do sistema de produto (cenário NGCC)



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3 - Propriedades do Gás Natural

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura	°C	27
Pressão	bar	0,926
PCI	kJ/kg	46497
Peso Molecular	kg/kmol	18,019
Composição	Unidade	Valor
Metano (CH ₄)	mol-%	89,00
Etano (C ₂ H ₆)	mol-%	7,00
Propano (C ₃ H ₈)	mol-%	1,00
Butano (C ₄ H ₁₀)	mol-%	0,10
Pentano (C ₅ H ₁₂)	mol-%	0,01
Hexano (C ₆ H ₁₄)	mol-%	0,01
Nitrogênio (N ₂)	mol-%	0,89
Dióxido de Carbono (CO ₂)	mol-%	2,00

Fonte: Adaptado de IEAGHG (2015)

Tabela 4 - Propriedades do Ar

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura	°C	27
Pressão	bar	0,926
Umidade relativa do ar	%	78
Constante do ar (R _{AR})	J/kg.K	288,16
Peso molecular	-	28,97
Excesso de ar	%	260
Composição	Unidade	Valor
Nitrogênio (N ₂)	mol-%	75,68
Oxigênio (O ₂)	mol-%	20,35
Água (H ₂ O)	mol-%	3,03
Dióxido de Carbono (CO ₂)	mol-%	0,03
Argônio (Ar)	mol-%	0,91

Fonte: Adaptado de EMAE (2002)

Na Figura 28 é possível observar os gasodutos de transporte de gás natural advindo da Bolívia (GASBOL), da Bacia de Campos (GASPAL) e da Bacia de Santos (GASAN).

Figura 28 - Gasodutos de transporte do Gás Natural

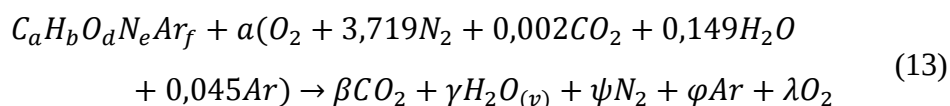


Fonte: Adaptado de Comgas (2018)

O primeiro plano contém os seguintes sistemas: (i) sistema de captação de água de poços, (ii) sistema de captação de água do reservatório Billings, (iii) estação de tratamento de água e efluentes, (iv) unidades geradoras, (v) caldeiras de recuperação e (vi) torres de resfriamento.

- (i) A água captada de poços é utilizada para reposição (*make-up*) do circuito fechado vapor condensado. Porém, antes de sua utilização, cerca de 51% dessa água é desmineralizada na Estação de tratamento de água (ETA) por meio de tratamento físico-químico. O restante (49%) é denominado água doméstica, utilizada na regeneração das resinas aplicadas na ETA e na refrigeração de sistemas de ar condicionado, sem receber tratamento físico.

- (ii) A água captada do reservatório Billings é denominada água de serviço, sendo 71% dela utilizada para arrefecimento de ventiladores, bombas, compressores, resfriadores de óleo, resfriadores das turbinas e resfriadores de óleo lubrificante. Os 29% restantes são tratados na ETA e utilizados para *make-up* das torres de resfriamento, sendo que cerca de 65% dessa água é perdida por evaporação ou arraste.
- (iii) A Estação de tratamento de água (ETA) e efluentes (ETE), é utilizada para desmineralização da água de *make-up* (reposição do circuito fechado vapor-condensado) advinda dos poços por meio de Troca Iônica. O tratamento da água de reposição das torres de resfriamento é realizado por meio de clarificação e decarbonatação. É importante destacar que a ETA/ETE é considerada na ACV, porém não considerada na análise exergética.
- (iv) As unidades geradoras são compostas por 4 conjuntos a gás modelo GT11N2 (60 Hz) da Alstom (UTE Fernando Gasparian), que operam em ciclo combinado com 2 turbinas a vapor (UTE Piratininga). Esses conjuntos a gás são compostos por compressor, câmara de combustão e turbina. A reação de combustão que ocorre na câmara, entre o gás natural e o ar, é apresentada na equação (13) por meio da qual foi efetuado o cálculo da composição química dos produtos da combustão.



Por meio da reação de combustão, utilizada para a modelagem do ciclo combinado, foi considerado excesso de ar de 260%, o que representa uma razão mássica ar-combustível (AC) de 44,6 para garantir a combustão completa. Sabe-se, porém, que a reação de combustão incompleta pode acontecer e acarretar na geração de CO e NO_x. Do ponto de vista da avaliação ambiental por meio do ciclo de vida, deve-se considerar a emissão desses poluentes, que são também previstos no EIA. Os principais parâmetros e considerações termodinâmicas para modelagem dos conjuntos a gás são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros dos conjuntos a gás

Parâmetro	Unidade	Valor
Câmara de combustão		
Pressão de saída	MPa	1,399
Perda de pressão	%	5
Perda de calor	%	0
Temperatura de saída	°C	1357
Relação ar/combustível	-	44,6
Turbina a gás		
Eficiência isentrópica	%	90
Razão de pressão	-	15,9
Temperatura de saída	°C	547
Pressão de saída	MPa	0,11
Eficiência do gerador	%	95
Compressor		
Eficiência isentrópica	%	90

Fonte: Adaptado de EMAE (2002)

Os principais parâmetros e considerações termodinâmicas para modelagem das turbinas a vapor são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros das turbinas a vapor

Parâmetro	Unidade	Valor
Níveis de Pressão		
Vapor de alta pressão (HP)	MPa	8,68
Vapor de baixa pressão (LP)	MPa	2,84
Vapor do reaquecedor	MPa	2,70
Condensador (entrada)	MPa	0,01
Desaerador (saída da turbina)	MPa	0,10
Níveis de Temperatura		
Saída do Superaquecedor HP	°C	527
ΔT_{pp} (HP)	°C	9,7
Saída do Superaquecedor LP	°C	264
ΔT_{pp} (LP)	°C	15,5
Saída do reaquecedor	°C	527
Condensador (entrada)	°C	45,9
Eficiências das turbinas e bombas		
Eficiência isentrópica da turbina HP	%	76,4
Eficiência do gerador	%	95
Eficiência isentrópica da turbina LP	%	87,2
Eficiência das bombas	%	65-75

Fonte: Adaptado de EMAE (2002)

- (v) Cada turbina a gás descrita anteriormente é acoplada a uma caldeira de recuperação também fabricada pela Alstom que opera em 2 níveis de pressão. Essas caldeiras permitem recuperar o calor dos gases de combustão liberados pelas turbinas a gás para gerar vapor nas turbinas a vapor. As centrais termelétricas operam com dois conjuntos do tipo “2x2x1”, ou seja, cada conjunto possui 2 turbinas a gás, 2 caldeiras de recuperação e 1 turbina a vapor. O gás de combustão gerado a partir dessa reação tem suas propriedades apresentadas na Tabela 7 e os parâmetros das caldeiras de recuperação são ilustrados na Tabela 8.

Tabela 7 - Propriedades do Gás de Combustão (NGCC)

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura (saída da turbina)	°C	547
Pressão	bar	0,926
Constante do Gás de combustão (R_{GC})	J/kg.K	294,1
Composição	Unidade	Valor
Nitrogênio (N ₂)	mol-%	73,511
Oxigênio (O ₂)	mol-%	13,743
Água (H ₂ O)	mol-%	8,814
Argônio (Ar ₂)	mol-%	0,879
Dióxido de Carbono (CO ₂)	mol-%	3,053
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	mol-%	0,00015

Fonte: Adaptado de EMAE (2002)

Tabela 8 - Parâmetros das caldeiras de recuperação

Parâmetro	Unidade	Valor
Níveis de Pressão		
Entrada de vapor no reaquecedor	MPa	2,841
Saída dos gases na chaminé	MPa	0,09
Níveis de Temperatura		
Entrada de água no economizador (HP/LP)	°C	150,1
Entrada de água no pré-aquecedor	°C	46,2
Saída dos gases na chaminé	°C	162
Eficiências		
Caldeiras	%	95
Bombas	%	80

Fonte: Adaptado de EMAE (2002)

A exergia química padrão (modelo II, para 1 atm de pressão) dos fluxos dos diferentes componentes contidos no ar, gás natural e gás de combustão são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Exergia química padrão dos fluxos

Componente	ex_q^0 (kJ/kmol)
Água (H ₂ O, vapor)	9500
Água (H ₂ O, líquida)	900
Argônio (Ar)	11690
Butano (C ₄ H ₁₀)	2805,8.10 ³
Dióxido de carbono (CO ₂)	19870
Etano (C ₂ H ₆)	1495,8.10 ³
Hexano (C ₆ H ₁₄)	4118,5.10 ³
Metano (CH ₄)	831650
Nitrogênio (N ₂)	720
Oxigênio (O ₂)	3970
Propano (C ₃ H ₈)	2154.10 ³
Pentano (C ₅ H ₁₂)	3463,3.10 ³

Fonte: Adaptado de Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996)

- (vi) As centrais termelétricas possuem dois pares de torres de resfriamento acopladas aos condensadores das turbinas a vapor, que operam em circuito semi-fechado com circulação forçada de ar. Os parâmetros das torres são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros das torres de resfriamento

Parâmetro	Unidade	Valor
Propriedades da água		
Pressão de entrada	MPa	0,3
Pressão de saída	MPa	0,2
Temperatura de entrada	°C	45,5
Temperatura de saída	°C	34
Propriedades do ar		
Temperatura de entrada	°C	27
Umidade relativa na entrada	%	78
Temperatura de saída	°C	33
Umidade relativa na saída	%	100

Fonte: Adaptado de EMAE (2002)

Os processos à jusante do sistema de produto são o descomissionamento das UTE e também a reciclagem ou disposição dos resíduos sólidos em aterro sanitário.

4.2.4.2 Cenário OCC

As fronteiras do sistema de produto, processos à montante e à jusante para o cenário OCC são apresentados na Figura 29. Os processos à montante contém agora a construção da unidade de separação de ar e da tubulação para o transporte de CO₂. O sistema de produto, além dos 6 sistemas presentes no cenário NGCC, contém os seguintes sistemas: (vii) unidade criogênica de separação de ar (ASU) e (viii) unidade de processamento de CO₂ (CPU).

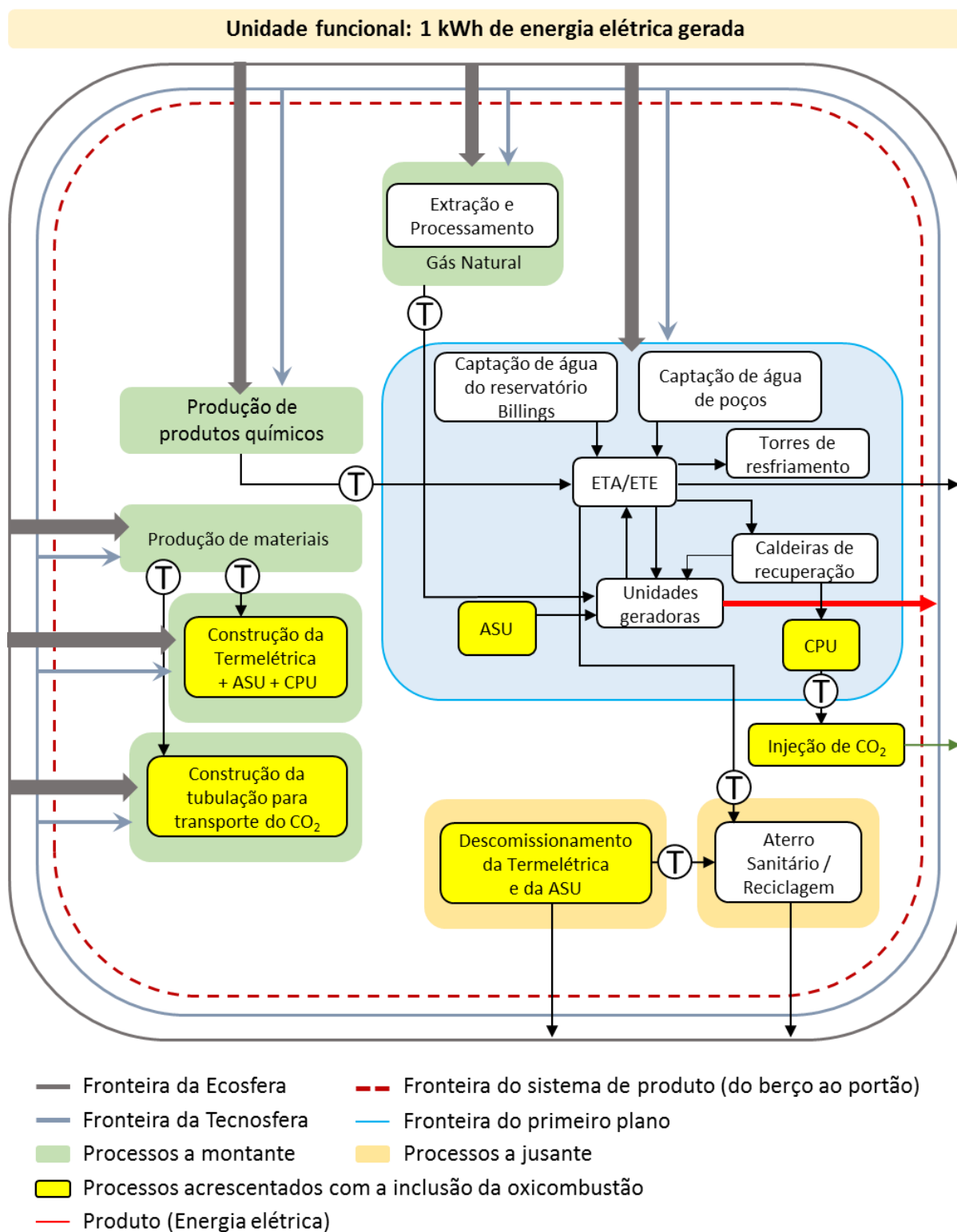
- (vii) A unidade de separação de ar (ASU) é utilizada para separação de oxigênio do ar para posterior queima do gás natural com esse gás rico em oxigênio (cerca de 95% de pureza), gerando gás de combustão composto majoritariamente por CO₂ e água. Os parâmetros dessa unidade são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros da Unidade de Separação de ar (ASU)

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura	°C	27
Pressão	MPa	0,12
Potência para produção de O ₂	MJ/kgO ₂	0,720
Composição do gás rico em O ₂	Unidade	Valor
O ₂	mol-%	95
N ₂	mol-%	2
Ar	mol-%	3

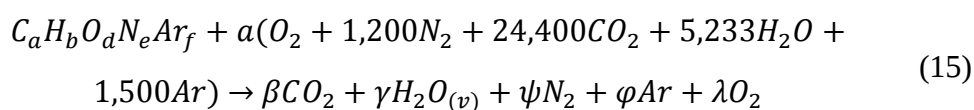
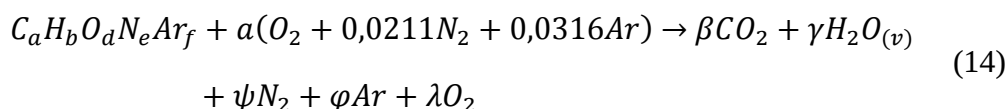
Fonte: Adaptado de Belaisaoui *et al.* (2014)

Figura 29 - Fronteiras do sistema de produto (cenário OCC)



Fonte: Produção do próprio autor

O gás rico em oxigênio é queimado na câmara de combustão juntamente com o gás de combustão rico em CO₂ depois de realizada a condensação de água contida no mesmo. A reação de combustão que ocorre na câmara, entre o gás natural, o gás rico em oxigênio e o gás rico em CO₂, é apresentada nas equações (14) e (15) por meio das quais foi realizado o cálculo da composição química dos produtos da combustão.



Considerou-se a reação de combustão (equações (14) e (15)), utilizada para a modelagem do ciclo combinado, próxima da estequiométrica, o que representa uma razão mássica oxigênio-combustível (OC) de 4 para garantir a combustão completa. Essa relação é comumente utilizada na literatura para ciclos de oxidação semi-fechados (SCOC-CC) (DAHLQUIST; GENRUP, 2013; IEAGHG, 2015; SOUNDARARAJAN, 2011).

A queima do gás rico em CO₂ é realizada devido à alta disponibilidade do gás de combustão e alto custo do processo de separação de oxigênio do ar na ASU. O gás de combustão também é utilizado para refrigeração das turbinas, visto que este, quando gerado na reação de oxidação, possui alta temperatura, que não é suportada pelos materiais utilizados na construção da mesma. As propriedades do gás de combustão na saída da turbina e na entrada do compressor (gás de reciclo) são apresentadas na Tabela 12.

- (viii) A unidade de processamento de CO₂ é utilizada para comprimir e purificar o CO₂ retirado do gás de combustão e possibilitar seu transporte em estado líquido por gasoduto até o local de armazenamento. Os parâmetros adotados para esse sistema são apresentados na Tabela 13.

Tabela 12 - Propriedades do gás de combustão (OCC)

Composição	Unidade	Valor
Gás rico em CO₂ que entra no compressor		
O ₂	mol-%	3,50
N ₂	mol-%	4,10
H ₂ O	mol-%	3,70
CO ₂	mol-%	83,60
Ar	mol-%	5,20
Gás rico em CO₂ que sai da câmara de combustão		
O ₂	mol-%	3,00
N ₂	mol-%	3,60
H ₂ O	mol-%	15,70
CO ₂	mol-%	73,20
Ar	mol-%	4,50
Gás rico em CO₂ que sai da turbina		
O ₂	mol-%	3,10
N ₂	mol-%	3,70
H ₂ O	mol-%	14,20
CO ₂	mol-%	74,40
Ar	mol-%	4,60

Fonte: Adaptado de Soundararajan (2011)

Tabela 13 - Parâmetros da Unidade de Processamento de CO₂ (CPU)

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura	°C	27
Pressão	MPa	10
Potência para compressão do CO ₂	MJ/kgCO ₂	0,337
Água de arrefecimento	kg/kgCO ₂	18,8

Fonte: Adaptado de Pipitone e Bolland (2009)

Os processos à jusante do sistema de produto contemplam também o descomissionamento da ASU e da CPU.

4.2.4.3 Função

A função das UTE é fornecer energia elétrica para a rede de distribuição.

4.2.4.4 Unidade Funcional

A unidade funcional selecionada é 1 kWh de energia elétrica gerada e entregue à rede de distribuição. Esta escolha se deve a maioria dos estudos de ACV de geração de energia elétrica utilizarem esta mesma unidade funcional, o que facilita a comparação dos resultados dessa pesquisa com resultados de estudos previamente publicados.

4.2.5 Estrutura da modelagem do ICV e tratamento da multifuncionalidade

A modelagem do ICV é atribucional e sem alocação, pois somente um produto é gerado no sistema de produto: a energia elétrica disponibilizada para a rede, ou seja, não existe multifuncionalidade.

4.2.6 Fronteiras do sistema

Ilustra-se as fronteiras do sistema em estudo nas Figura 27 e Figura 29. Para as UTE em estudo, foram considerados somente os processos mais significativos, citados na seção 4.2.4. O embasamento dessa escolha foi feito a partir análise das fichas de centrais termelétricas que operam em ciclo combinado encontradas na base de dados Ecoinvent.

4.2.7 Categorias de impacto da AICV

As categorias de impacto que serão analisadas utilizando o método CML IA *baseline*, são: PDRA (fóssil e mineral), PAG, PDCO, PTH, PE. Neste estudo não se realizou procedimentos de normalização e ponderação.

4.2.8 Representatividade e adequabilidade tecnológica, geográfica e temporal

As centrais termelétricas selecionadas são representativas da tecnologia de geração de energia elétrica utilizando ciclo combinado atualmente utilizada no Brasil. As centrais

termelétricas são localizadas na cidade de São Paulo, estado escolhido por ser o maior consumidor de energia elétrica e também o segundo maior produtor de gás natural. A representatividade temporal abrange o período de 2002 a 2022. O tempo de operação considerado para as UTE é 20 anos, visto que consiste em instalações que operavam com queima de óleo e foram adaptadas para geração em ciclo combinado a gás natural. A carga anual considerada é de 5000 horas de operação, de acordo com o inventário brasileiro de geração de eletricidade a partir de ciclo combinado a gás natural da base de dados Ecoinvent.

4.2.9 Tipos, qualidade e fontes de dados e informações necessárias

A dificuldade na obtenção de dados primários em empresas nacionais e também na obtenção de dados secundários em órgãos governamentais de fiscalização, resultou na utilização de dados primários e secundários retirados do EIA (EMAE, 2002) e dados secundários de bancos de dados confiáveis e de estudos publicados na literatura, conforme indicado na seção 4.3.

4.2.10 Requisitos especiais para comparação entre sistemas

A unidade funcional foi selecionada como requisito para comparação entre sistemas. Efetuou-se esta escolha pois a maioria dos estudos de ACV de geração de energia elétrica utiliza a unidade funcional de 1 kWh de energia elétrica gerada.

4.2.11 Identificação de necessidade de revisão crítica

A avaliação crítica do estudo foi realizada pelos membros que participaram da qualificação e defesa da presente pesquisa de doutorado.

4.2.12 Planejamento de comunicação dos resultados

Os resultados serão publicados na presente tese, que será disponibilizada para consulta pública.

4.3 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Para o presente trabalho, obteve-se dados primários das UTE em estudos a partir do EIA (EMAE, 2002), por meio de consulta pública a documentação que é gerida pelo órgão ambiental responsável pelo aval de funcionamento do empreendimento (CETESB). Portanto, os dados de portão ao portão são primários e secundários (no caso de ausência de informação) e os dados do berço ao portão e portão ao túmulo secundários. Utilizou-se as bases de dados secundários Ecoinvent 3.4 (ECOINVENT, 2020a) e NETL (*National Energy Technology Laboratory*) (NETL, 2020), que contém poucos dados brasileiros. O Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), foi consultado durante todo o período da pesquisa, porém a disponibilidade de dados ainda é muito limitada e a disponibilidade de acesso do site é instável. Portanto, optou-se por utilizar dados de abrangência global em caso de falta de dados representativos da realidade brasileira. Para a seleção dos processos da base Ecoinvent, foi escolhida a opção de alocação denominada *cut-off*⁴³. Os processos da base NETL são todos processos unitários, ou seja, com abrangência de portão a portão. O inventário do ciclo de vida da geração de energia elétrica para os cenários NGCC e OCC é apresentado a seguir. Destaca-se que os inventários da base de dados Ecoinvent são apresentados de acordo com o nome dado no software SimaPro, da seguinte maneira: *produto de referência {escopo geográfico} nome da atividade*.

4.3.1 Extração, processamento e transporte do gás natural

O gás natural é o combustível utilizado para geração de energia elétrica nas UTE Fernando Gasparian e Nova Piratininga. De acordo com o EIA, 53% do gás natural utilizado como combustível nas UTE advém da Bolívia, 41,4% da Bacia de Campos e 5,6% da Bacia de Santos. O transporte desse gás é realizado pela rede de distribuição de gasodutos da Comgás por meio dos gasodutos GASBOL (origem Bolívia), GASPAL (origem Bacia de Campos, RJ) e GASAN (origem Bacia de Santos, SP).

4.3.1.1 Extração e processamento do gás natural

⁴³ Esse modelo de sistema subdivide as atividades de vários produtos por alocação com base em propriedades físicas, econômicas, de massa ou outras propriedades. O tratamento de resíduos ou reciclagem que gerem subprodutos não são considerados.

A extração do gás natural pode ser realizada em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*), e acontece de acordo com seu tipo⁴⁴. No Brasil a maior parte do gás natural é do tipo associado e suas reservas são encontradas no mar. Na Bolívia, grande parte do gás natural é do tipo não associado e as reservas são encontradas em terra. A partir dessas informações foram selecionados os seguintes inventários de extração e processamento do gás natural a partir da base de dados Ecoinvent:

- *Natural gas, high pressure {RoW} petroleum and gas production, offshore:*

Esse conjunto de dados é válido para a produção *offshore* da Noruega no Mar do Norte em campos maduros. Emissões e descargas de 49 campos produtores e 178 poços de exploração e produção/injeção são incluídos. Todos os campos com instalações de produção localizadas na plataforma continental norueguesa foram incluídos. O processamento de gás é realizado nas plantas de Kollsnes e Karsto, que são avaliadas separadamente. As partes ponderadas de etano, butano e outros nos gases de Kollsnes e Karsto foram usadas decompor as emissões de NMVOC (compostos orgânicos voláteis não metânicos) em suas diferentes partes. O processo de produção múltipla combina a produção de gás e petróleo *offshore* e fornece os coprodutos gás natural e petróleo bruto. Os dados não incluem combustíveis queimados para turbinas, motores etc. Inclui testes de poço (requisitos e emissões do combustível). O gás natural é parcialmente seco nas plataformas, o restante é seco em uma planta de produção especial.

- *Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production:*

Esse conjunto de dados inclui a exploração e produção de gás natural *onshore*. Os dados não incluem combustíveis queimados para turbinas, motores etc. Inclui testes de poço (requisitos e emissões do combustível). Os dados descrevem uma tecnologia *onshore* média de gás natural para 13% da produção combinada de gás de petróleo. Presume-se que o gás natural é 20% ácido. O vazamento na exploração é estimado em 0,38% e a produção em 0,12%. Assumiu-se ainda que cerca de 30% da água produzida é descarregada em águas superficiais. As emissões de água são diferenciadas entre produção combinada de petróleo e gás

⁴⁴ O gás natural é comumente classificado como gás natural associado (GA) e gás natural não associado (GNA). O gás associado é encontrado dissolvido no petróleo ou como uma capa de gás no reservatório. O gás não-associado é aquele cuja concentração é predominante na camada rochosa (ANP, 2018)

e produção de gás. Os dados são extrapolados dos dados europeus russos. A incerteza foi ajustada em conformidade. Esses dados foram adaptados da versão 2 da Ecoinvent.

Para a utilização dos inventários citados acima, esses foram analisados quanto a alocação (todos os processos apresentaram alocação de 100% baseada em volume, considerando 1 m³ de gás natural), e suas entradas e saídas. Para a produção de gás natural *onshore* as entradas de eletricidade foram alteradas para a realidade boliviana e para a produção de gás natural *offshore* as entradas de água para a realidade brasileira. As demais entradas e saídas foram mantidas, visando preservar a qualidade do inventário.

4.3.1.2 Transporte do gás natural

Para o transporte do gás natural por meio dos gasodutos GASBOL (origem Bolívia), GASPAL (origem Bacia de Campos, RJ) e GASAN (origem Bacia de Santos, SP), verificou-se as distâncias aproximadas até as UTE, bem como dimensões e capacidade de vazão dos gasodutos, de acordo com Gasnet (2011). Na ausência de dados para o Brasil e Bolívia, foram selecionados países que são utilizados como representativos do transporte global de gás natural. A partir dessas informações, foram selecionados os inventários dos seguintes países na base de dados Ecoinvent:

- *Transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas {DZ} processing:*
Esse conjunto de dados representa o transporte de gás natural da Argélia por meio de oleodutos terrestres para os países importadores da Europa e também o consumo de energia e as emissões ligadas ao transporte de 1 tkm de gás natural argelino em um gasoduto terrestre. Vazamentos por 1000 km são baseados no valor do transporte russo. O transporte de gás de longa distância em terra contempla estações de compressão.
- *Transport, pipeline, offshore, long distance, natural gas {NO} processing.*
Esse conjunto de dados descreve o transporte de gás natural da Noruega para os países importadores da Europa e também o consumo de energia e as emissões vinculadas ao transporte de 1 tkm de gás natural norueguês em um gasoduto offshore. Vazamentos por 1000 km são baseados em dados coletados pela

Marcogaz por várias empresas de gás natural. O transporte de gás de longa distância no mar contempla também estações de compressão. A origem da eletricidade foi alterada de acordo com a matriz elétrica brasileira.

Não foram feitas alterações nos inventários de transporte do gás natural. Foram consideradas as distâncias de 2000 km para o transporte via gasoduto *onshore* GASBOL (Brasil-Bolívia) e 500 km para os gasodutos *off-shore* GASPAL e GASAN. As distâncias foram determinadas com base em informações do Ministério de Minas e Energia (EPE, 2007). Não foram considerados o comissionamento e descomissionamento dos gasodutos, visto que são estruturas utilizadas por longo prazo e por diferentes empresas ao longo de sua extensão.

4.3.2 Tratamento da água

Assim com o gás natural, um dos recursos mais importantes em uma termelétrica operando em ciclo combinado é a água. Nas UTE estudadas essa água advém de três importantes fontes: rio Pinheiros, represa Billings e poços subterrâneos. Essas águas são tratadas de acordo com sua qualidade e também sua utilização na planta. Conforme descrito anteriormente, as águas captadas são submetidas a tratamentos químicos para que possam ser utilizadas no processo de geração de energia elétrica. Para este ponto em particular, os dados encontrados no EIA se mostraram inconsistentes e, portanto, foram obtidos dados a partir da base de dados Ecoinvent, representando as tecnologias utilizadas, como segue:

- *Tap water {RoW} tap water production, direct filtration treatment:*

Esse conjunto de dados representa a produção de 1 kg de água da torneira, obtida por filtração direta, sob pressão no portão da instalação, pronta para distribuição em rede. O tratamento inclui filtração e desinfecção da areia. O inventário foi construído a partir de produtos químicos, insumos e resíduos de energia de duas instalações de filtração direta distintas localizadas em Quebec, cobrindo quase 100% produção de água da torneira a partir desta tecnologia. Os dados incluem a energia para bombeamento, sistema de tratamento, iluminação e aquecimento da instalação. Inclui também todos os produtos químicos e materiais adicionados à água durante o tratamento e, quando necessário, lâmpadas ultravioletas para substituição. O inventário exclui energia para estações de bombeamento e perdas de água na rede. As emissões para o ambiente que ocorrem durante o tratamento

e durante a distribuição não foram consideradas, pois são consideradas insignificantes. Presume-se que as principais substâncias presentes na água que seriam liberadas no ambiente sejam consideradas águas residuais.

A origem da água foi alterada de acordo com a origem dada no EIA (EMAE, 2002) e a origem da eletricidade foi alterada de acordo com a matriz elétrica brasileira.

- *Tap water {RoW} tap water production, conventional treatment:*

Esse conjunto de dados representa a produção de 1 kg de água da torneira, submetida a tratamento convencional, sob pressão no portão da instalação, pronta para distribuição em rede. O tratamento convencional inclui coagulação e decantação, filtração e desinfecção. Outros tratamentos, como oxidação (radiação ultravioleta, ozônio) e outros ajustes (pH, alcalinidade, etc.) podem estar presentes em algumas plantas. O inventário foi construído a partir de produtos químicos, entradas de energia e resíduos de 9 plantas localizadas em Quebec. Os dados incluem a energia para alimentação do sistema de bombeamento e tratamento, iluminação e aquecimento da instalação, bem como a energia da bomba de pressurização da água até o início do rede. Inclui também todos os produtos químicos e materiais adicionados à água durante o tratamento e, quando necessário, lâmpadas ultravioletas para substituição. Exclui, porém, a energia para estações de bombeamento e perdas de água na rede. Emissões para o ambiente ocorridas durante o tratamento e durante a distribuição não foram consideradas por serem assumidas insignificantes. Presume-se que as principais substâncias presentes na água que seriam liberadas no ambiente sejam consideradas águas residuais.

- *Water, completely softened, from decarbonised water, at user {RoW} production:*

Esse conjunto de dados foi adaptado de dados da situação européia abrangendo o uso de produtos químicos e algumas emissões para o tratamento de água, por trocador de íons, utilizada para arrefecimento em usinas de energia. Os dados advêm da literatura e de informações do fabricante da planta (empresa CH). A incerteza dos dados foi ajustada em conformidade. Esses dados foram adaptados

da versão 2 da Ecoinvent. As entradas de água foram alteradas para a realidade brasileira.

4.3.3 Operação das UTE selecionadas (NGCC e OCC)

Conforme descrito anteriormente, os dados de entradas e saídas da operação das termelétricas selecionadas foram retirados do EIA (EMAE, 2002). A partir desses dados foram realizados balanços de massa, energia e exergia para conferência dos dados, que foram também complementados com dados retirados da base de dados Ecoinvent. Foi criado um inventário para a operação da UTE, que foi complementado com os dados do inventário descrito a seguir. O inventário detalhado para o primeiro plano é apresentado na seção 4.3.6.

- *Electricity, high voltage {BR} electricity production, natural gas, combined cycle power plant:*

Esse conjunto de dados representa a produção de eletricidade de alta tensão em uma usina a gás natural operando em ciclo combinado no Brasil em 2012. O conjunto de dados refere-se a uma usina de ciclo de 400MWe com uma turbina a gás 260MWe e uma turbina a vapor 140MWe. As fronteiras do estudo abrangem desde a construção da usina de gás natural de ciclo combinado, incluindo a recepção de gás natural e materiais de operação e manutenção na usina até a produção de 1kWh de eletricidade de alta tensão entregue ao barramento. Com relação à refrigeração, supõe-se o uso de refrigeração úmida com torre de resfriamento. Considera-se o uso de água descarbonizada para redução das emissões de NOx. O conjunto de dados não inclui extração, descomissionamento e tratamento de resíduos de matérias-primas, visto que essas atividades estão incluídas no conjuntos de dados de infraestrutura. A usina é usada em carga média, considerando 5000 horas de operação por ano e vida útil de 180000 horas.

Para o cenário OCC, o inventário de operação das UTE foi modificado de acordo com as seguintes considerações:

- 98% do CO₂ gerado é capturado. Outros autores como Dillon *et al.* (2005) consideraram a taxa de captura de 90,4 % para termelétricas que utilizam

oxicombustão a carvão e Singh; Stromman; Hertwich (2011b) consideraram a taxa de 90% para carvão e 96% para gás natural com oxicombustão.

- Redução do NOx emitido em 50% para o cenário OCC. Estudos experimentais como os de Croiset e Thambimuthu (2001) e Douglas *et al.* (2003) enfocam a formação de NOx sob condições de oxicombustão. Alguns estudos obtiveram redução da formação de NOx em até 50%, justificada pela ausência de NOx térmico e efeitos adicionais causados pela recirculação dos gases de combustão e subsequente redução do NO para nitrogênio molecular (IPCC, 2005). No entanto, também existem estudos que sugerem que não há redução de NOx (JOHNSON *et al.*, 2006; VARAGANI *et al.*, 2006).
- Manutenção das demais emissões para o ar contidas no inventário do cenário NGCC.

O inventário dos materiais utilizados para a construção de uma usina termelétrica a gás natural de porte próximo às UTE do presente estudo está disponível na base de dados Ecoinvent. Selecionou-se então o seguinte inventário:

- *Gas power plant, combined cycle, 400MW electrical {RoW} construction:*
Esse conjunto de dados corresponde a uma usina de ciclo combinado de 400MWe (turbina a gás 265MWe e vapor turbina 140MWe). O inventário inclui os materiais mais importantes utilizados na construção e também os requisitos de energia para construção e transporte. O tempo de vida útil da usina é de 180000 horas. Informações retiradas da literatura considerando a tecnologia atual de turbinas a gás e outras partes da usina referentes a 1996. Este conjunto de dados foi adaptado de dados europeus e as incertezas ajustadas de acordo. Os dados foram adaptados da versão 2 da Ecoinvent.

O inventário do descomissionamento foi realizado considerando que 70% dos metais são enviados para reciclagem, 100% do concreto é enviado para aterro e cerca de 10% da energia utilizada para a construção foi utilizada no descomissionamento. Essas escolhas foram realizadas com base nos estudos de Odeh e Cockerill (2008); Tzanidakis *et al.* (2013) e Yujia, Zhaofeng e Zheng (2014).

4.3.4 Captura e armazenamento de carbono

A inserção de captura de carbono por oxidação no processo de geração de energia elétrica nas UTE inclui dois novos componentes: a unidade de separação do ar (ASU) para provimento de oxigênio para a combustão do gás natural e a unidade de compressão e purificação de CO₂ (CPU), responsável por processar o CO₂ para posterior transporte e armazenamento geológico. É necessário considerar também o consumo de CO₂ para o início da operação da UTE, que é utilizado na câmara de combustão da turbina a gás. Os dados de inventário são descritos a seguir:

- *Carbon dioxide, liquid {RoW} production:*

Esse conjunto de dados foi adaptado de dados da situação da Suíça abrangendo o uso de insumos e emissões de materiais e energia para a produção de dióxido de carbono líquido. O consumo de água e a infraestrutura foram estimados. A tecnologia considerada abrange a extração de dióxido de carbono dos fluxos de gases residuais de diferentes processos de produção com uma solução de 15 a 20% de MEA (monoetanolamina), seguida de uma etapa de purificação e liquefação, usando eletricidade como fonte de energia. Esses dados foram adaptados da versão 2 da Ecoinvent. A origem da eletricidade foi alterada de acordo com a matriz elétrica brasileira.

4.3.4.1 Unidade de separação criogênica do ar (ASU)

A unidade de separação criogênica utilizada para prover um gás rico em oxigênio (95% de O₂) adotada foi descrita por Belaisaoui *et al.* (2014). A energia elétrica requerida para o funcionamento da ASU e do compressor de oxigênio advém da turbina a gás e, portanto, já está contabilizada como potência não disponível para geração de energia elétrica. Para a construção da ASU, os dados foram retirados de um estudo realizado por Pehnt e Henkel (2009) e o inventário do descomissionamento foi realizado com as mesmas considerações feitas para as UTE (apresentadas no item 4.3.3).

4.3.4.2 Unidade de compressão e purificação de CO₂ (CPU)

Para a unidade de compressão e purificação selecionada (PIPITONE; BOLLAND, 2009), não se encontrou dados consistentes para a infraestrutura. Portanto, optou-se por considerar somente a energia elétrica necessária para a compressão e purificação do CO₂, necessária para seu posterior transporte e armazenamento, conforme descrito na seção 4.2.4.2. A energia elétrica requerida para o funcionamento da CPU advém da turbina a gás e, portanto, já está contabilizada como potência não disponível para geração de energia elétrica.

4.3.4.3 Transporte do CO₂ capturado por gasodutos

Para o transporte do CO₂ capturado por gasodutos, foram incluídos o inventário da operação e pressurização dos gasodutos. Como para o cenário NGCC, a construção e descomissionamento dos gasodutos não foi incluída. Considera-se que o CO₂ capturado é posteriormente enviado para aquíferos salinos nas Bacias de Campos e Santos, cuja distância de 500 km foi considerada, de acordo com GASNET (2011). Os inventários utilizados são apresentados a seguir:

- *CO₂ pipeline operation (2014) (NETL, 2020):*

Este conjunto de dados representa um processo unitário (portão ao portão) que fornece um resumo dos fluxos de entrada e saída relevantes associados à operação de um gasoduto de dióxido de carbono usado para o transporte de dióxido de carbono capturado em uma instalação de conversão de energia, para um local para sequestro ou outro uso. A principal emissão desse processo unitário é o CO₂ que vaza do gasoduto. O fluxo de referência desse processo unitário é o bombeamento de um quilograma de CO₂.

- *CO₂ pressure boosting (2014) (NETL, 2020):*

O conjunto de dados desse processo unitário fornece um resumo dos fluxos de entrada e saída relevantes associados à operação de um sistema de bombeamento de dióxido de carbono que aumenta a pressão em um gasoduto de CO₂. A principal emissão deste processo unitário (do portão ao portão) é CO₂. As entradas rastreadas são eletricidade e CO₂ que vaza das bombas, e as principais saídas são CO₂ comprimido e emissões de CO₂ para o ar. O fluxo de referência desse processo unitário é o bombeamento de um quilograma de CO₂.

4.3.4.4 Armazenamento do CO₂ em aquíferos salinos

Este estudo irá considerar o armazenamento do CO₂ nas Bacias de Campos e Santos, cuja distância da UTE é de aproximadamente 500 km. Segundo Lima (2010), essas bacias sedimentares possuem capacidade de armazenamento de 48000 Mt CO₂ (Campos) e 148000 MtCO₂ (Santos). O inventário utilizado foi realizado por NETL (2020) para operação do aquífero salino. Esse inventário inclui as emissões para construção e instalação do sistema de armazenamento de CO₂ no aquífero.

- *Saline Aquifer CO₂ Injection Site, Operations (2006) (NETL, 2020):*

Esse conjunto de dados dado por um processo unitário fornece um resumo dos fluxos relevantes de entrada e saída associados às operações de injeção associadas ao seqüestro de CO₂ em um aquífero salino. As entradas para este processo incluem CO₂ de um gasoduto, atividades de preparação e construção do local associadas ao local de seqüestro e eletricidade usada para alimentar as bombas de injeção. As saídas incluem salmoura produzida a partir do aquífero salino e emissões de CO₂ resultantes do vazamento do selo da bomba de injeção e vazamento na formação do aquífero salino. O fluxo de referência deste processo unitário é 1 kg de CO₂ sequestrado.

4.3.5 Dados de entrada e saída do Inventário do Ciclo de Vida para o primeiro plano

Depois de descritas as etapas envolvidas no ciclo de vida da geração de eletricidade, os dados obtidos para o primeiro plano, por meio da realização do ICV, são apresentados utilizando a unidade funcional proposta para o estudo, na Tabela 14 (NGCC) e Tabela 15 (OCC). Destaca-se que, devido à grande quantidade de dados utilizados no presente estudo, realizado do berço ao túmulo, priorizou-se a apresentação dos dados do primeiro plano. Essa escolha baseou-se na disponibilidade dos dados dos processos a montante e a jusante. As bases de dados utilizadas (Ecoinvent e NETL) permitem acesso gratuito⁴⁵, que pode ser feito por meio de *website*.

⁴⁵ O acesso a base de dados Ecoinvent é gratuito para países em desenvolvimento como o Brasil, desde que comprovadamente utilizado para fins acadêmicos, por meio de uma solicitação que deve ser feita pelo docente à base. O acesso a base NETL é gratuito.

Tabela 14 - Dados de entrada e saída do ICV do primeiro plano (NGCC)

(continua)

Unidade funcional: 1kWh de energia elétrica gerada				
Substância	Valor	Unidade 1/kWh	SD ² M. Pedigree	Fonte
Operação das UTE				
Entradas da natureza				
Água, rio, BR	3,4581E-2	m ³	1,64 [4,4,4,2,4]	(EMAE, 2002)
Entradas da tecnosfera				
Produção de gás natural (<i>onshore</i>)	1,2636E-1	m ³	1,84 [3,5,5,4,4]	(EMAE, 2002)
Produção de gás natural associado (<i>offshore</i>)	1,1205E-1	m ³	1,84 [3,5,5,4,4]	(EMAE, 2002)
Transporte do GN, Gasoduto (<i>onshore</i>)	2,0567E-1	t.km	2,08 [5,5,5,5,4]	(EMAE, 2002)
Transporte do GN, Gasoduto (<i>offshore</i>)	4,5598E-2	t.km	2,08 [5,5,5,5,4]	(EMAE, 2002)
Água desmineralizada (Poços)	5,2215E-2	kg	1,84 [2,5,5,3,4]	(EMAE, 2002)
Água filtrada (Reservatório Billings)	3,6340E+0	kg	1,84 [2,5,5,3,4]	(EMAE, 2002)
Água tratada (Reservatório Billings)	1,4664E+0	kg	1,84 [2,5,5,3,4]	(EMAE, 2002)
Construção das UTE	1,3870E-11	p	1,45 [3,3,4,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Descomissionamento das UTE	1,3870E-11	p	1,45 [3,3,4,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Emissões para o ar				
Acetafeno	4,9996E-12	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Acetaldeído	5,0438E-9	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Ácido acético	7,6287E-7	kg	7,76 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Arsênico	2,5912E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Benzeno	5,6869E-9	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Benzopireno	3,3352E-12	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Berílio	1,5573E-11	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Butano	5,8382E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Cádmio	1,4249E-9	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Dióxido de carbono, fóssil	0,4204	kg	1,05 [3,3,5,3,3]	(EMAE, 2002)
Monóxido de carbono, fóssil	4,6150E-5	kg	2,94 [3,3,4,4,3]	(EMAE, 2002)
Cromo	1,8095E-9	kg	1,17 [3,5,4,5,3]	(ECOINVENT, 2020)
Cobalto	1,0844E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Monóxido de dinitrogênio	6,1597E-6	kg	2,94 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Etano	8,6375E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Formaldeído	2,0364E-7	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)

Tabela 14 - Dados de entrada e saída do ICV do primeiro plano (NGCC)

(conclusão)

Unidade funcional: 1kWh de energia elétrica gerada				
Substância	Valor	Unidade 1/kWh	SD ² M. Pedigree	Fonte
Operação das UTE				
Emissões para o ar				
Hexano	4,9996E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Chumbo	6,4939E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Manganês	4,9240E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Mercúrio	4,3377E-10	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Metano, fóssil	6,1219E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Níquel	2,7173E-9	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Óxidos de nitrogênio	4,5474E-4	kg	2,94 [3,3,4,4,4]	(EMAE, 2002)
Hidrocarbonetos poliaromáticos	5,0438E-8	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Material particulado (MP2,5)	3,6971E-5	kg	2,94 [3,3,4,3,4]	(EMAE, 2002)
Pentano	7,2504E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Propano	4,4448E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Ácido propiônico	1,0088E-7	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Selênio	3,0956E-11	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Dióxido de enxofre	3,0082E-5	kg	1,07 [3,3,5,3,3]	(EMAE, 2002)
Tolueno	9,4571E-9	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Água	9,5632E-4	m ³	1,49 [4,4,4,2,4]	(EMAE, 2002)
Emissões para a água				
Água	4,1484E-3	m ³	1,49 [4,4,4,2,4]	(EMAE, 2002)
Resíduo das torres de resfriamento	6,0428E-4	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(EMAE, 2002)

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 15 - Principais dados de entrada e saída do ICV (OCC)

(continua)

Unidade funcional: 1kWh de energia elétrica gerada				
Substância	Valor	Unidade 1/kWh	SD ² M. Pedigree	Fonte
Operação das UTE				
Entradas da natureza				
Água, rio, BR	6,2988E-2	m ³	1,64 [4,4,4,2,4]	(EMAE, 2002)
Entradas da tecnosfera				
Produção de gás natural (<i>onshore</i>)	1,8262E-1	m ³	1,84 [3,5,5,4,4]	(EMAE, 2002)
Produção de gás natural associado (<i>offshore</i>)	1,6194E-1	m ³	1,84 [3,5,5,4,4]	(EMAE, 2002)
Transporte do GN, Gasoduto (<i>onshore</i>)	2,9730E-1	t.km	2,08 [5,5,5,5,4]	(EMAE, 2002)
Transporte do GN, Gasoduto (<i>offshore</i>)	6,5911E-2	t.km	2,08 [5,5,5,5,4]	(EMAE, 2002)
CO ₂ para início da operação	1,6009E-3	kg	1,85 [5,5,3,4,4]	(ECOINVENT, 2020)
Transporte do CO ₂ (operação do gasoduto)	6,1335E-1	kg	1,10 [2,2,2,2,2]	NETL (2020)
Transporte do CO ₂ (pressurização)	6,1335E-1	kg	1,08 [1,2,2,2,2]	NETL (2020)
Operação do aquífero salino	6,1335E-1	kg	1,24 [2,2,3,2,3]	NETL (2020)
Água desmineralizada (Poços)	8,3835E-2	kg	1,84 [2,5,5,3,4]	(EMAE, 2002)
Água filtrada (Reservatório Billings)	5,8347E+0	kg	1,84 [2,5,5,3,4]	(EMAE, 2002)
Água tratada (Reservatório Billings)	2,6834E+0	kg	1,84 [2,5,5,3,4]	(EMAE, 2002)
Construção das UTE + ASU	1,3870E-11	p	1,45 [3,3,4,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Descomissionamento das UTE + ASU	1,3870E-11	p	1,45 [3,3,4,3,3]	Elaboração própria
Emissões para o ar				
Acetafeno	4,9996E-12	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Acetaldeído	5,0438E-9	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Ácido acético	7,6287E-7	kg	7,76 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Arsênico	2,5912E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Benzeno	5,6869E-9	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Benzopireno	3,3352E-12	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Berílio	1,5573E-11	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Butano	5,8382E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)

Tabela 15 - Principais dados de entrada e saída do ICV (OCC)

(continuação)

Unidade funcional: 1kWh de energia elétrica gerada				
Substância	Valor	Unidade 1/kWh	SD ² M. Pedigree	Fonte
Operação das UTE				
Emissões para o ar				
Cádmio	1,4249E-9	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Dióxido de carbono, fóssil	2,3610E-1	kg	1,05 [3,3,5,3,3]	(EMAE, 2002)
Monóxido de carbono, fóssil	7,4110E-5	kg	2,94 [3,3,4,4,3]	(EMAE, 2002)
Cromo	1,8095E-9	kg	1,17 [3,5,4,5,3]	(ECOINVENT, 2020)
Cobalto	1,0844E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Monóxido de dinitrogênio	6,1597E-6	kg	2,94 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Etano	8,6375E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Formaldeído	2,0364E-7	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Hexano	4,9996E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Chumbo	6,4939E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Manganês	4,9240E-10	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Mercúrio	4,3377E-10	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Metano, fóssil	6,1219E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Níquel	2,7173E-9	kg	1,17 [3,5,4,5,4]	(ECOINVENT, 2020)
Óxidos de nitrogênio	3,6513E-4	kg	2,94 [3,3,4,4,4]	(EMAE, 2002)
Hidrocarbonetos poliaromáticos	5,0438E-8	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Material particulado (MP2,5)	5,9370E-5	kg	2,94 [3,3,4,3,4]	(EMAE, 2002)
Pentano	7,2504E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Propano	4,4448E-6	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Ácido propiônico	1,0088E-7	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Selênio	3,0956E-11	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Dióxido de enxofre	4,8307E-5	kg	1,07 [3,3,5,3,3]	(EMAE, 2002)
Tolueno	9,4571E-9	kg	4,89 [3,3,5,3,3]	(ECOINVENT, 2020)
Água	1,6785E-3	m ³	1,49 [4,4,4,2,4]	(EMAE, 2002)
Emissões para a água				
Água	6,9911E-2	m ³	1,49 [4,4,4,2,4]	(EMAE, 2002)
Resíduo das torres de resfriamento	9,7039E-4	kg	7,76 [4,3,5,3,3]	(EMAE, 2002)

Fonte: Produção do próprio autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA

A partir dos dados de projeto contidos no EIA (EMAE, 2002) das Termelétricas Fernando Gasparian e Piratininga e também de dados da literatura, os ciclos para ambos os cenários (NGCC e OCC) foram modelados utilizando o software EES (*Engineering Equation Solver*). Na sequência foram feitas as análises energética e exergética, de acordo com a primeira e segunda Leis da Termodinâmica, conforme descrito no capítulo 3. Posteriormente foi estimado o consumo acumulado de exergia (CExC) por meio de análise termoeconômica com base na Teoria do Custo Exergético para ambos os cenários.

5.1.1 Análise Energética e Exergética

De acordo com os parâmetros do ciclo obtidos no EIA e descritos no capítulo 4, foram realizados balanços de massa, energia e exergia para condução das análises energética e exergética. Na Tabela 16 são apresentadas as reações de combustão do metano (componente majoritário do gás natural) com ar (cenário NGCC) e com os gases ricos em oxigênio e dióxido de carbono (cenário OCC). A composição do gás natural, dos gases ricos em oxigênio e dióxido de carbono e dos gases de combustão foi apresentada na seção 4.2.4.

Tabela 16 - Reações de combustão utilizadas para os cenários estudados

Equação	Reação
Combustão do gás natural com o ar (NGCC)	
(16)	$CH_4 + 7,2(O_2 + 3,719N_2 + 0,002CO_2 + 0,149H_2O + 0,045Ar) \\ \rightarrow 1,0144CO_2 + 3,0728H_2O_{(v)} + 26,7768N_2 + 0,324Ar \\ + 5,2O_2$
Oxicombustão do gás natural com gases ricos em O₂ e CO₂ (OCC)	
(17)	$CH_4 + 2,5O_2 + 0,6N_2 + 11,2CO_2 + 0,62H_2O_{(v)} + 0,75Ar \rightarrow 12,2CO_2 \\ + 2,62H_2O_{(v)} + 0,6N_2 + 0,75Ar + 0,5O_2$

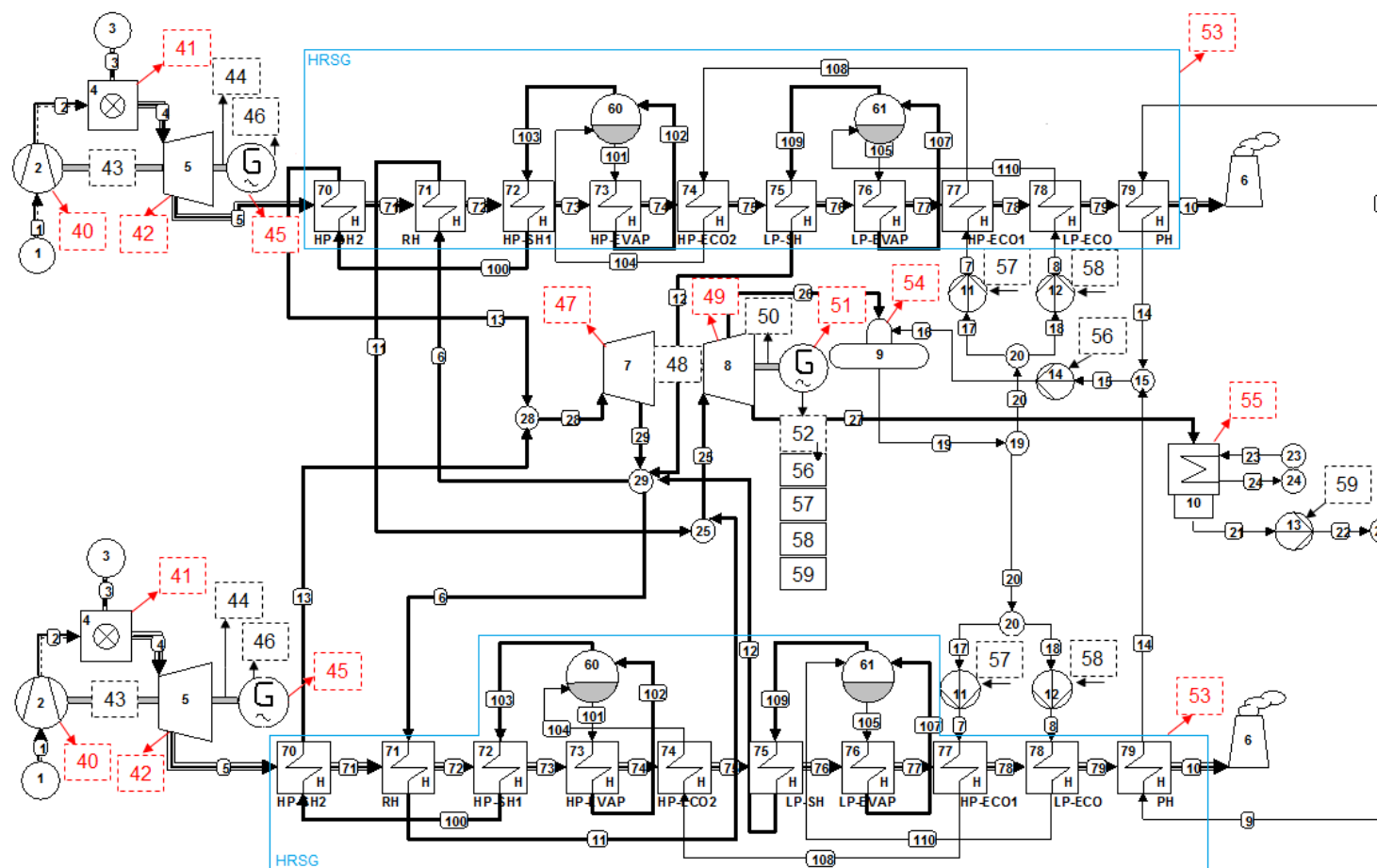
Fonte: Produção do próprio autor

Os diagramas esquemáticos parciais para os cenários avaliados (contendo um dos dois conjuntos 2x2x1) são ilustrados na Figura 30 (NGCC) e Figura 31 (OCC). Cada ponto (i) que liga os componentes do ciclo termodinâmico em estudo foi numerado, como também os pontos de exergia destruída dos componentes, destacados em vermelho. O nível de desagregação apresentado foi utilizado para posterior análise de custo exergético e de consumo acumulado de exergia. Com o auxílio do software EES, obteve-se as propriedades físicas e termodinâmicas dos pontos, cujos gases de combustão foram modelados como gases ideais e a água modelada como fluido real (EES, 2020b), apresentadas nas Tabela 17 (NGCC) e Tabela 18 (OCC).

Pode-se verificar que o gás natural apresenta uma elevada disponibilidade química que é convertida em exergia física por meio do processo de combustão na câmara de combustão. No ciclo NGCC o ar é utilizado como agente oxidante, enquanto no processo OCC são utilizados gases ricos em O_2 e CO_2 . Isso afeta diretamente a estequiometria da combustão, bem como os gases de combustão produzidos. No ciclo NGCC os gases de combustão são compostos majoritariamente por nitrogênio e oxigênio e no ciclo OCC os gases de combustão são compostos majoritariamente por dióxido de carbono e água. Os gases de combustão, ao saírem da câmara, são expandidos na turbina para geração de trabalho mecânico (usado para alimentar o compressor de ar e o alternador) que converte a energia térmica em mecânica e, com alta temperatura, ainda têm disponibilidade de exergia para transferir calor para o vapor que alimenta as turbinas a vapor, por meio da caldeira de recuperação. Depois de transferir energia para o ciclo a vapor, os gases de saída da chaminé têm baixa disponibilidade. Equipamentos acessórios como bombas, válvulas e desaerador são utilizados, porém com pouco gasto energético. O condensador, modelado como um trocador de calor está ligado as torres de resfriamento para condensação do vapor da turbina no circuito de vapor caldeira de recuperação-turbina a vapor.

O ciclo OCC possui ainda uma unidade de separação de ar e um compressor, visando suprir oxigênio com 95% de pureza para a câmara de combustão, um condensador para retirada de água do gás de combustão que sai da caldeira de recuperação e retorna para a câmara de combustão e também uma unidade de processamento de CO_2 para sua captura e armazenamento. Portanto, neste ciclo, os gases de combustão não são lançados para a atmosfera e, ao invés disso, uma parte deles é retornada para o conjunto a gás e outra parte é capturada para armazenamento.

Figura 30 - Diagrama esquemático parcial das UTE estudadas (NGCC)



Nota: HP-SH (superaquecedor de alta pressão), HRSG (caldeira de recuperação), LP-SH (superaquecedor de baixa pressão), PH (pré-aquecedor), RH (reaquecedor). Os itens em caixas tracejadas em vermelho representam as exergias destruídas e os itens em caixas pretas as entradas e saídas de energia.

Fonte: Produção do próprio autor por meio do software Cycle Tempo (ASIMPTOTE, 2020)

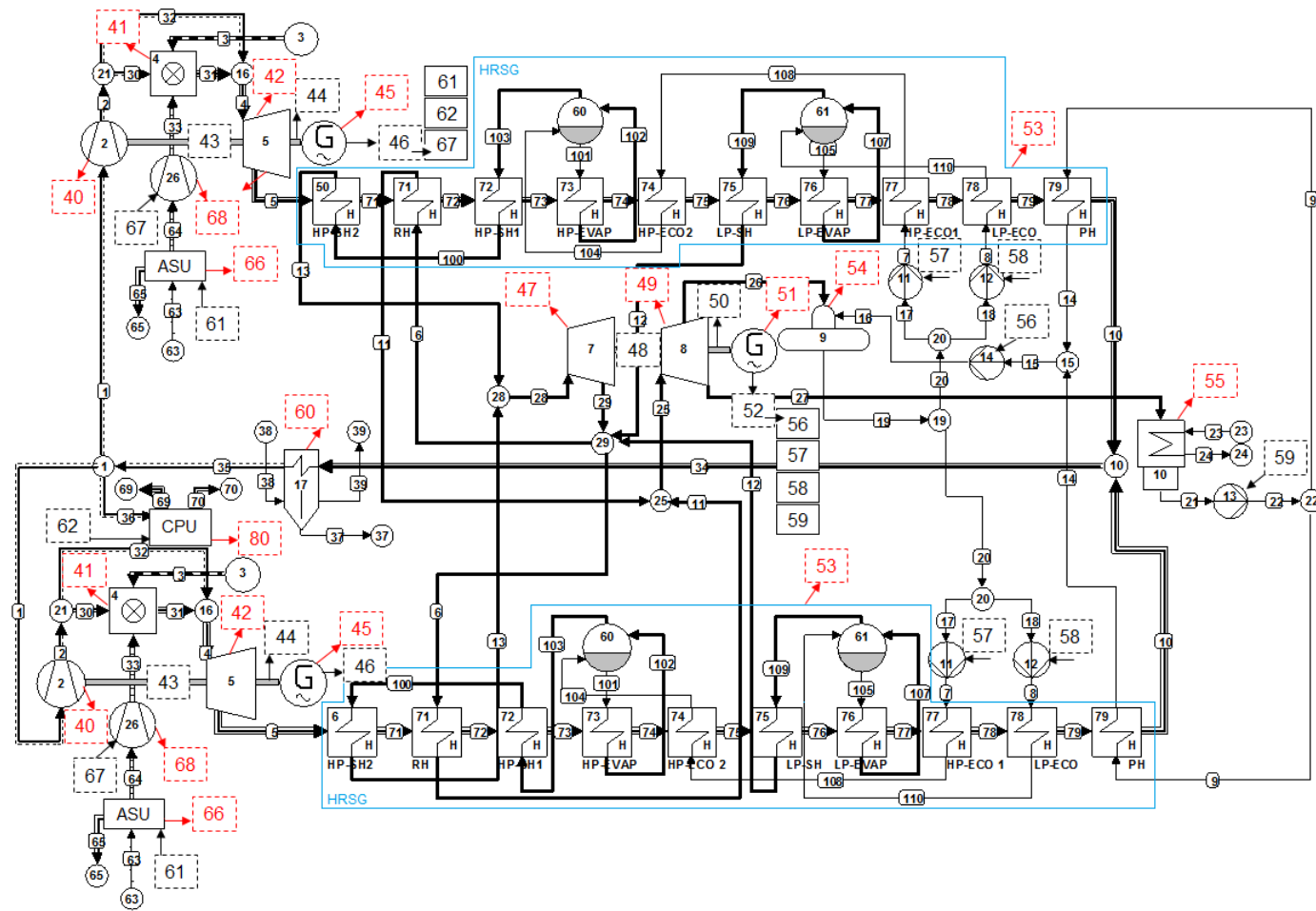
Tabela 17 - Resultados da análise energética e exergética (NGCC)

Ponto (i)	Descrição	$\dot{m}_i$ (kg/s)	P_i (MPa)	T_i (K)	h_i (kJ/kg)	s_i (kJ/kg.K)	B_i (MW)
1	AR	339,40	0,09	300,20	-	-	0,48
2	AR	339,40	1,47	750,30	-	-	142,87
3	GN	7,61	2,90	300,00	-	-	369,18
4	GC	347,00	1,40	1453,00	-	-	364,20
5	GC	347,00	0,11	820,20	-	-	99,53
6	H ₂ O (v)	40,85	2,84	600,20	3064,00	6,68	45,48
7	H ₂ O (l)	34,38	8,68	424,50	643,00	1,85	4,96
8	H ₂ O (l)	6,47	2,70	423,20	633,80	1,84	0,89
9	H ₂ O (l)	31,34	1,50	319,20	194,00	0,65	1,69
10	GC	347,00	0,09	446,00	-	-	16,72
11	H ₂ O (v)	40,85	2,70	800,20	3520,00	7,36	55,79
12	H ₂ O (v)	6,47	2,84	537,20	2903,00	6,40	6,71
13	H ₂ O (v)	34,38	8,68	800,20	3458,00	6,76	50,97
14	H ₂ O (l)	31,34	1,30	433,20	676,30	1,94	4,65
15	H ₂ O (l)	62,68	1,30	433,20	676,30	1,94	9,31
16	H ₂ O (l)	62,68	2,00	433,40	677,40	1,94	9,36
17	H ₂ O (l)	34,38	1,00	422,80	631,10	1,84	4,63
18	H ₂ O (l)	6,47	1,00	422,80	631,10	1,84	0,87
19	H ₂ O (l)	81,70	1,00	422,80	631,10	1,84	11,01
20	H ₂ O (l)	40,85	1,00	422,80	631,10	1,84	5,51
21	H ₂ O (l), x=0	62,68	0,01	319,00	191,80	0,64	3,28
22	H ₂ O (l)	62,68	1,50	319,20	194,00	0,65	3,37
23	H ₂ O (l)	2712,00	0,20	307,20	142,60	0,49	136,69
24	H ₂ O (l)	2712,00	0,30	318,60	190,30	0,64	142,20
25	H ₂ O (v)	81,70	2,70	800,20	3520,00	7,36	111,59
26	H ₂ O (v)	19,02	0,10	423,20	2776,00	7,61	10,39
27	H ₂ O (l + v), x=0,96	62,68	0,01	319,00	2488,00	7,85	11,77
28	H ₂ O (v)	68,76	8,68	800,20	3458,00	6,76	101,95
29	H ₂ O (v)	68,76	2,84	656,20	3195,00	6,89	81,25

Nota: GC (gás de combustão), GN (gás natural), l (líquido), v (vapor), x (título).

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 31 - Diagrama esquemático parcial das UTE estudadas (OCC)



Nota: ASU (unidade de separação de ar), CPU (unidade de compressão de CO₂), HP-SH (superaquecedor de alta pressão), HRSG (caldeira de recuperação), LP-SH (superaquecedor de baixa pressão), PH (pré-aquecedor), RH (reaquecedor).

Fonte: Produção do próprio autor por meio do software Cycle Tempo (ASIMPTOTE, 2020)

Tabela 18 - Resultados da análise energética e exergetica (OCC)

(continua)

Ponto (i)	Descrição	$\dot{m}_i$ (kg/s)	P_i (MPa)	T_i (K)	h_i (kJ/kg)	s_i (kJ/kg.K)	B_i (MW)
1	GR(CO ₂)	312,80	0,09	300,20	-	-	120,24
2	GR(CO ₂)	312,80	1,47	641,40	-	-	202,10
3	GN	6,85	2,90	300,20	-	-	331,75
4	GC	347,00	1,40	1228,00	-	-	411,97
5	GC	347,00	0,11	820,20	-	-	231,66
6	H ₂ O (v)	40,85	2,84	600,20	3064,00	6,68	45,48
7	H ₂ O (l)	34,38	8,68	424,50	643,20	1,85	4,96
8	H ₂ O (l)	6,47	2,70	423,20	633,90	1,84	0,89
9	H ₂ O (l)	31,34	1,50	319,20	194,10	0,65	1,69
10	GC	347,00	0,09	333,20	-	-	134,95
11	H ₂ O (v)	40,85	2,70	800,20	3520,00	7,36	55,79
12	H ₂ O (v)	6,47	2,84	537,20	2903,00	6,40	6,71
13	H ₂ O (v)	34,38	8,68	800,20	3458,00	6,76	50,97
14	H ₂ O (l)	31,34	1,30	433,40	676,90	1,94	4,66
15	H ₂ O (l)	62,68	1,30	433,20	676,30	1,94	9,31
16	H ₂ O (l)	62,68	2,00	433,40	677,60	1,94	9,37
17	H ₂ O (l)	34,38	1,00	422,80	631,10	1,84	4,63
18	H ₂ O (l)	6,47	1,00	422,80	631,10	1,84	0,87
19	H ₂ O (l)	81,70	1,00	422,80	631,10	1,84	11,01
20	H ₂ O (l)	40,85	1,00	422,80	631,10	1,84	5,51
21	H ₂ O (l)	62,68	0,01	319,00	191,80	0,64	3,28
22	H ₂ O (l)	62,68	1,50	319,20	194,10	0,65	3,37
23	H ₂ O (l)	2712,00	0,20	307,20	142,60	0,49	136,69
24	H ₂ O (l)	2712,00	0,30	318,60	190,30	0,64	142,20
25	H ₂ O (v)	81,70	2,70	800,20	3520,00	7,36	111,59
26	H ₂ O (v)	19,02	0,10	423,20	2776,00	7,61	10,39
27	H ₂ O (v)	62,68	0,01	319,00	2488,00	7,85	11,77
28	H ₂ O (v)	68,76	8,68	800,20	3458,00	6,76	101,95

Tabela 18 - Resultados da análise energética e exergetica (OCC)

							(conclusão)
Ponto (i)	Descrição	$\dot{m}_i$ (kg/s)	P_i (MPa)	T_i (K)	h_i (kJ/kg)	s_i (kJ/kg.K)	B_i (MW)
29	H ₂ O (v)	68,76	2,84	656,20	3195,00	6,89	81,25
30	GR(CO ₂)	201,50	1,47	641,40	-	-	130,20
31	GC	235,70	1,40	1400,00	-	-	333,79
32	GR(CO ₂)	111,30	1,47	641,40	-	-	71,90
33	GR(O ₂)	27,40	2,00	771,50	-	-	14,21
34	GC	694,00	0,09	333,20	-	-	269,90
35	GR(CO ₂)	660,30	0,09	300,20	-	-	253,87
36	GR(CO ₂)	34,82	0,09	300,20	-	-	13,39
37	H ₂ O (l)	33,67	0,09	300,20	113,20	0,39	1,68
38	H ₂ O (l)	473,7	0,20	307,20	142,60	0,49	23,88
39	H ₂ O (l)	473,7	0,30	318,60	190,3	0,64	24,84
63	AR	113,90	0,09	300,20	-	-	0,164
64	GR(O ₂)	27,40	0,09	300,20	-	-	3,03
65	GR(N ₂)	86,51	0,09	300,20	-	-	1,97
69	CO ₂ ,cap	29,96	11,00	303,20	-	-	21,58
70	MIX	4,86	0,11	343,20	-	-	1,47

Nota: CO₂,cap (CO₂ capturado), GC (gás de combustão), GN (gás natural), GR(CO₂) (gás rico em CO₂), GR(N₂) (gás rico em N₂), GR(O₂) (gás rico em O₂), l (líquido), MIX (mistura de gases) v (vapor), x (título).

Fonte: Produção do próprio autor

Conforme descrito anteriormente, os gases de combustão têm relação de calores específicos menor no ciclo OCC que no ciclo NGCC e, isso implica em uma redução da eficiência do ciclo combinado. Visando solucionar esse problema, diversos estudos tem sido realizados objetivando um aumento da eficiência do ciclo OCC por meio de ajustes de alguns parâmetros no projeto da turbina, como aumento da relação de pressão e resfriamento da turbina (DAHLQUIST; GENRUP, 2013; IEAGHG, 2015; MLETZKO; EHLERS; KATHER, 2016).

A abordagem desses ajustes não está no escopo da presente tese, portanto foi modelada uma mistura de CO₂ recuperado comprimido (retirado da saída do compressor da turbina a gás) e gases de combustão (que saem da câmara de combustão) para que esses gases entrassem na turbina com temperatura de entrada adequada, de modo a permitir a temperatura de saída inferior à máxima permitida, manter a relação de pressão e a eficiência da turbina usada no ciclo NGCC. As eficiências do compressor e da câmara de combustão também foram mantidas as mesmas do ciclo NGCC. É importante destacar que a combustão no ciclo OCC foi considerada na condição estequiométrica, visando reduzir a penalidade energética da ASU.

Com relação ao ciclo a vapor, foram mantidas as pressões e temperaturas da caldeira de recuperação e das turbinas a vapor, bem como condensadores, bombas e desaerador.

Essas escolhas impactaram diretamente os resultados da performance do ciclo OCC, cujas eficiências de primeira e segunda lei são apresentadas na Tabela 19, juntamente com os resultados do ciclo NGCC. Pode-se observar que os resultados das eficiências de primeira e segunda lei para o ciclo NGCC são um pouco inferiores aos valores apresentados na literatura para ciclos combinados operando a gás natural. Isso se deve ao fato da UTE em estudo ter sido adaptada para operar em ciclo combinado a gás natural e também a tecnologia dos equipamentos instalados, em sua maioria com 15 a 20 anos de utilização.

Tabela 19 - Eficiências energética e exergética calculadas

Capacidade de geração de eletricidade			
NGCC		OCC	
564,67 MW		351,69 MW*	
Eficiências de Primeira Lei		Eficiências de Segunda Lei	
NGCC	OCC	NGCC	OCC
$\eta_{CG} = 32,00\%$	$\eta_{CG} = 32,00\%$	$\varepsilon_{CG} = 37,27\%$	$\varepsilon_{CG} = 35,75\%$
$\eta_{CC} = 88,00\%$	$\eta_{CC} = 88,74\%$	$\varepsilon_{CC} = 71,13\%$	$\varepsilon_{CC} = 70,10\%$
$\eta_{TG} = 92,09\%$	$\eta_{TG} = 92,09\%$	$\varepsilon_{TG} = 96,85\%$	$\varepsilon_{TG} = 96,89\%$
$\eta_{CR} = 95,77\%$	$\eta_{CR} = 69,59\%$	$\varepsilon_{CR} = 78,65\%$	$\varepsilon_{CR} = 67,35\%$
$\eta_{TV,HP} = 76,47\%$	$\eta_{TV,HP} = 76,47\%$	$\varepsilon_{TV,HP} = 87,36\%$	$\varepsilon_{TV,HP} = 87,38\%$
$\eta_{TV,LP} = 87,17\%$	$\eta_{TV,LP} = 87,17\%$	$\varepsilon_{TV,LP} = 88,18\%$	$\varepsilon_{TV,LP} = 88,18\%$
$\eta_{NGCC} = 42,00\%$	$\eta_{OCC} = 29,68\%$	$\varepsilon_{NGCC} = 40,26\%$	$\varepsilon_{OCC} = 28,50\%$

*Para o ciclo OCC cerca de 4,32 % de todo o CO₂ gerado na combustão é capturado, o restante é recirculado pelo ciclo.

Nota: CC (câmara de combustão), CG (ciclo a gás), CR (caldeira de recuperação), NGCC (ciclo combinado a gás natural), OCC (ciclo combinado a gás natural com oxidcombustão), TG (turbina a gás), TV,HP (turbina a vapor de alta pressão) e TV,LP (turbina a vapor de baixa pressão).

Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se observar também que os maiores impactos no ciclo OCC foram a redução da eficiência da caldeira de recuperação (cujo comportamento do Cp dos gases de combustão foi apresentado na seção 2.1.4.1) e também a eficiência global do ciclo. As escolhas de projeto para o ciclo OCC, como a manutenção das temperaturas e pressões do ciclo a vapor e caldeira de recuperação resultaram no aumento da temperatura de *pinch point* de 9,45 K para 22,29 K (alta

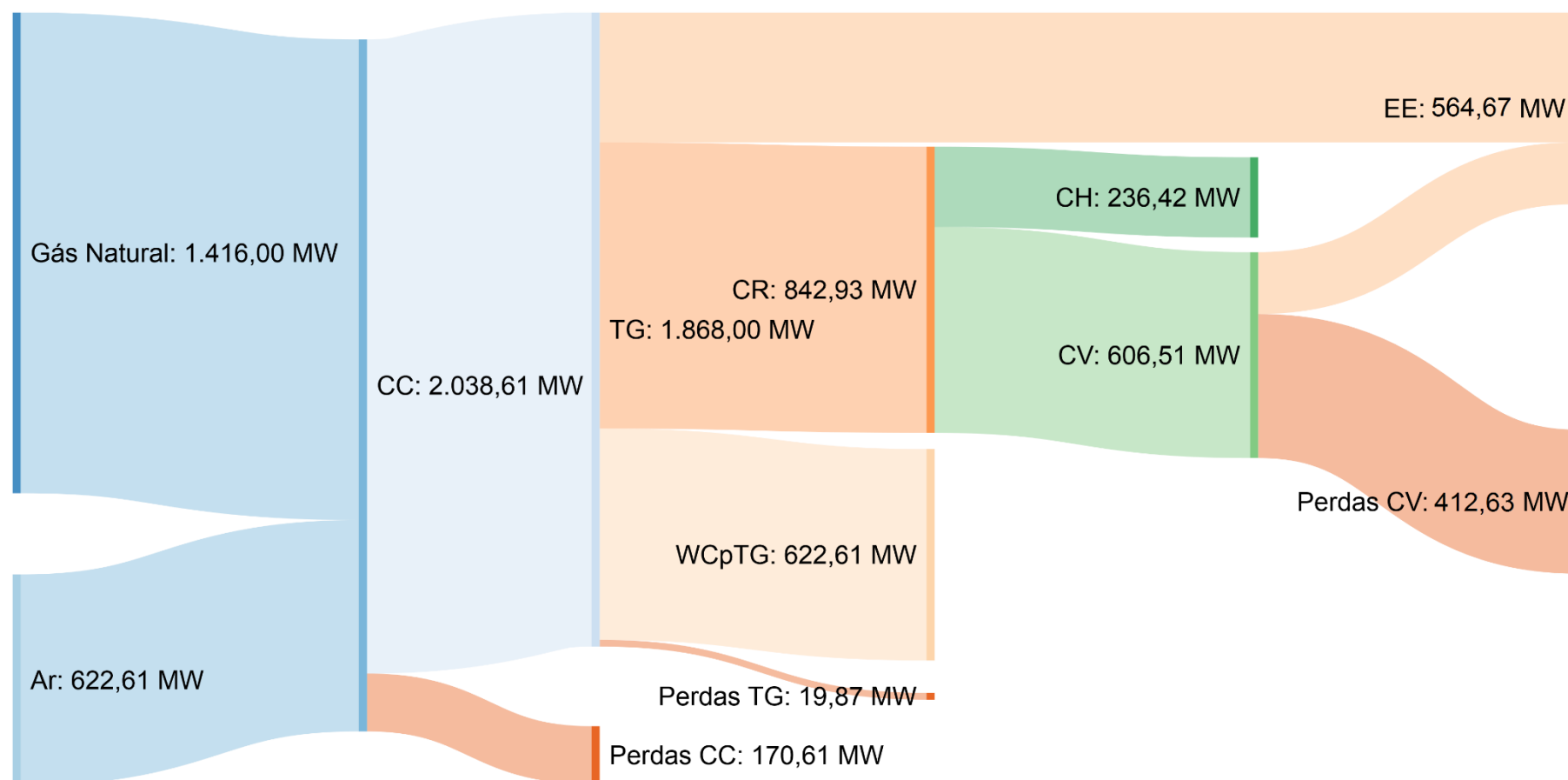
pressão) e de 15,22 K para 31,54 K (baixa pressão). A potência líquida da turbina a gás também foi reduzida de 100,68 MW por turbina para 83,86 MW por turbina e a eficiência global do ciclo em cerca de 12,32% (1ª Lei) e 11,76% (2ª Lei), conforme apresentado na Tabela 19. Os valores de eficiência global do ciclo OCC são cerca de 20% mais baixos que os valores apresentados na literatura, primeiramente porque o ciclo deriva de um ciclo NGCC com eficiência cerca de até 16% menor que a literatura e também porque não foram feitas alterações em seus componentes visando um aumento da eficiência do conjunto a gás e, consequentemente do ciclo, conforme descrito anteriormente.

O resultado das análises energética e exergetica (balanço energético e exergetico) para o ciclo NGCC podem ser verificados observando os diagramas de Sankey (energia) na Figura 32 e Grassmann (exergia) na Figura 33. Nesses diagramas é possível observar os fluxos e ter uma visão mais clara dos principais pontos consumidores de energia e exergia. Nota-se no balanço de energia que as perdas mais significativas ocorrem no circuito a vapor (cerca de 20% da energia que entra no ciclo) devido a troca de calor no condensador. Outro ponto de perda de energia é a câmara de combustão, na qual cerca de 8% da energia advinda do ar comprimido e do combustível é perdida.

Ao comparar os diagramas de Sankey e Grassmann para o ciclo NGCC, pode-se observar com mais clareza a qualidade da energia do combustível e também a perda de exergia na câmara de combustão. Pode-se verificar também a qualidade da energia dos gases de combustão da turbina a gás. Ao analisar o diagrama de Grassmann para o ciclo NGCC, fica facilitada a visualização do principal ponto de destruição de exergia: a câmara de combustão, responsável pela destruição de cerca de 29% da exergia que entra no ciclo. Outros componentes como a turbina a gás, a caldeira de recuperação e o ciclo a vapor, juntos são responsáveis pela destruição de cerca de 19% da exergia de entrada.

O resultado do balanço energético e exergetico para o ciclo OCC são apresentados nas Figura 34 e Figura 35. Com relação ao ciclo NGCC, o ciclo OCC é caracterizado pela reutilização dos gases de combustão (ricos em CO₂) juntamente com o gás rico em O₂ na câmara de combustão. O trabalho de compressão do CO₂ é menor do que o trabalho de compressão do ar no ciclo NGCC, bem como a potência gerada pelo ciclo OCC. A energia elétrica gerada disponível para a rede também é menor, devido a necessidade de separação do oxigênio do ar (realizada pela ASU) e a necessidade de purificação e compressão do CO₂ para armazenamento (realizada pela CPU).

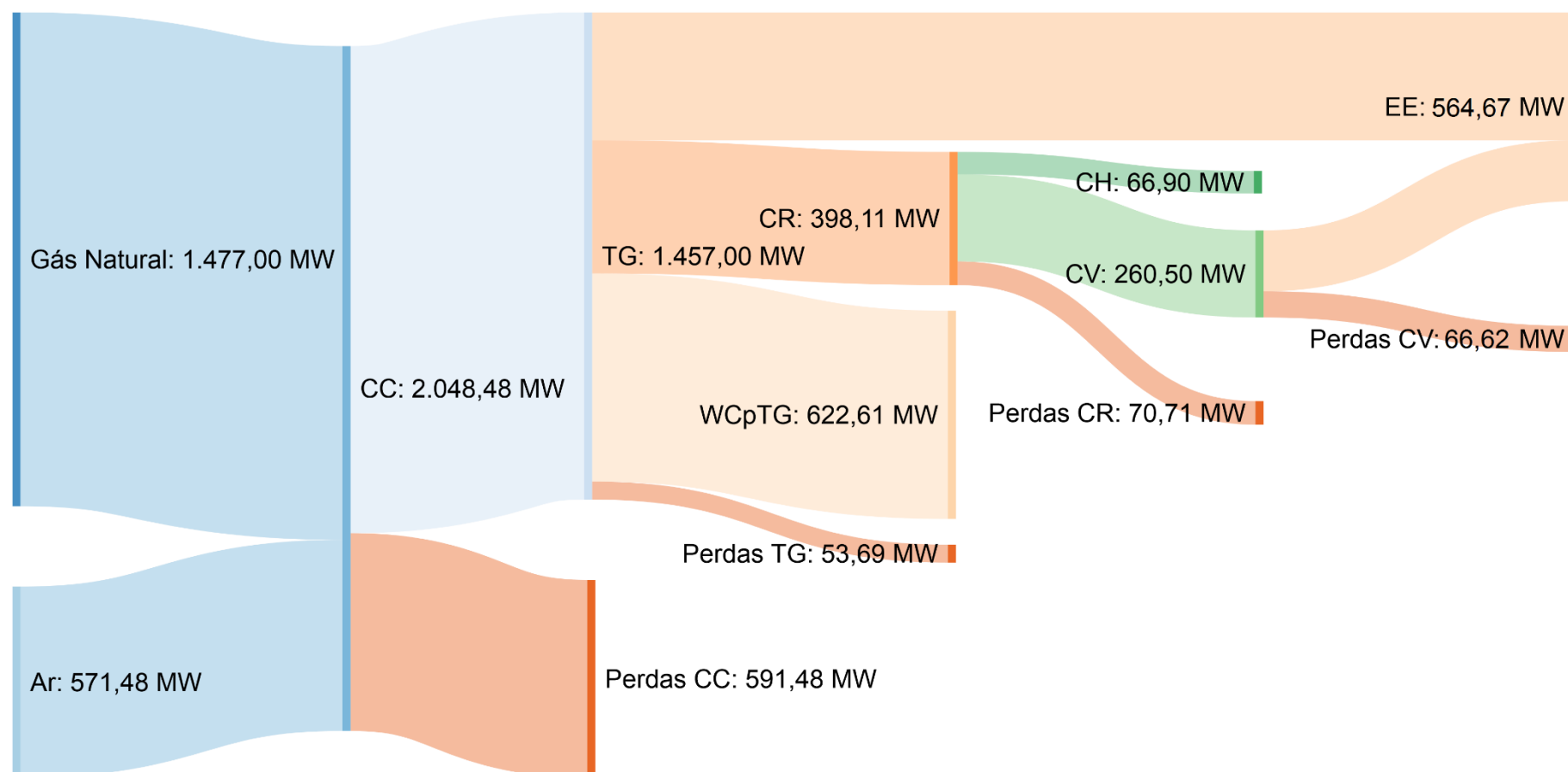
Figura 32 - Diagrama de Sankey do ciclo NGCC



Nota: CC (câmara de combustão), CH (Chaminé), CR (Caldeira de Recuperação), CV (Ciclo a vapor), EE (energia elétrica gerada), TG (Turbina a gás), WCpTG (trabalho mecânico do compressor).

Fonte: Produção do próprio autor por meio do software online SankeyMATIC (BOGART, 2020)

Figura 33 - Diagrama de Grassmann do ciclo NGCC



Nota: CC (câmara de combustão), CH (Chaminé), CR (Caldeira de Recuperação), CV (Ciclo a vapor), EE (energia elétrica gerada), TG (Turbina a gás), WCpTG (trabalho mecânico do compressor).

Fonte: Produção do próprio autor por meio do software online SankeyMATIC (BOGART, 2020)

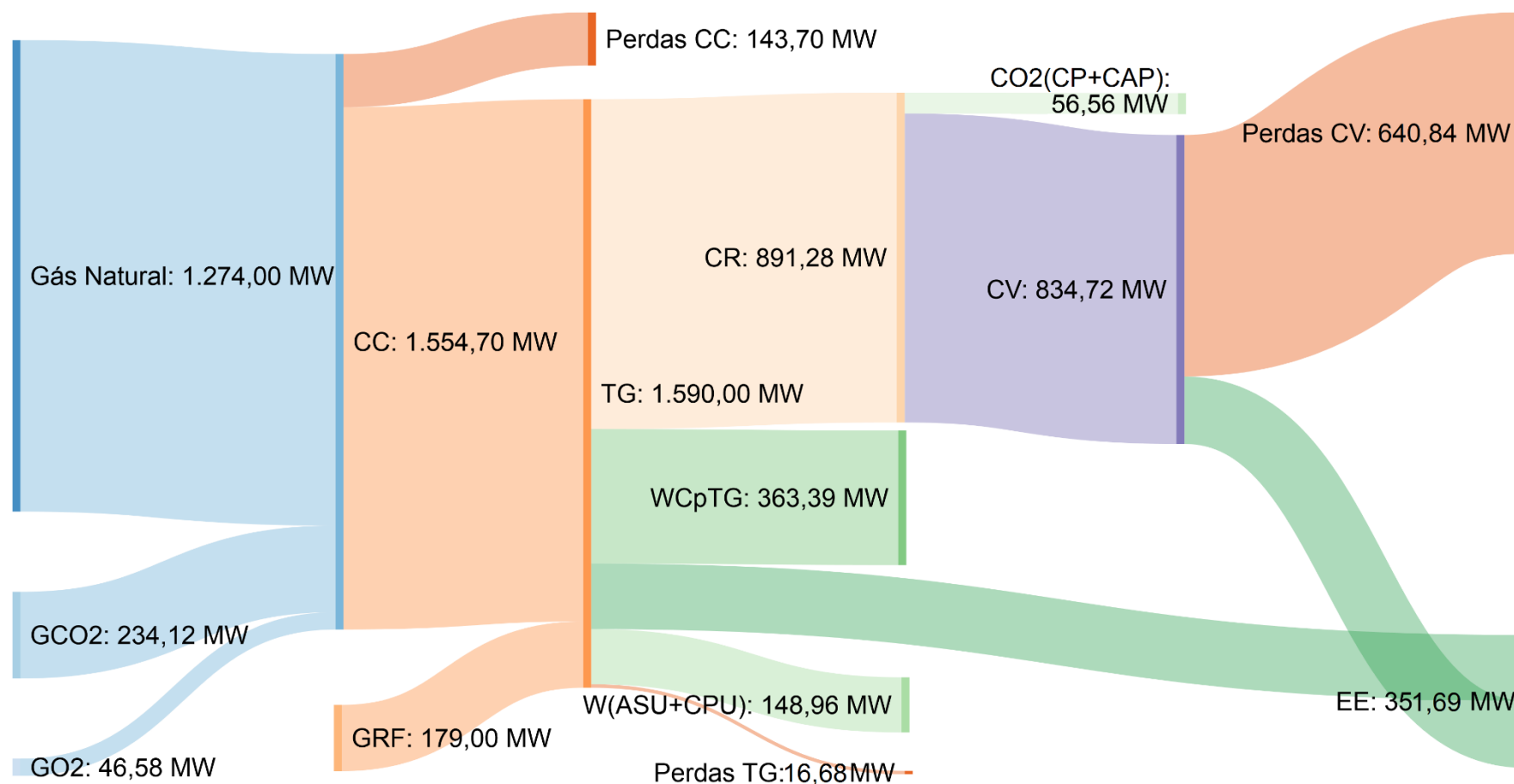
É possível notar no balanço de energia que as perdas mais significativas ocorrem no circuito a vapor (cerca de 41%). Outro ponto de perda de energia é a câmara de combustão, na qual cerca de 9,2% da energia advinda dos gases ricos em CO_2 e O_2 comprimidos e do combustível é perdida.

Ao comparar os diagramas de Sankey e Grassmann para o ciclo NGCC, pode-se observar com mais clareza a qualidade da energia do combustível e também a perda de exergia na câmara de combustão. Pode-se verificar também a qualidade da energia dos gases de combustão da turbina a gás, agora ricos em dióxido de carbono. Ao analisar o diagrama de Grassmann para o ciclo NGCC, fica facilitada a visualização do principal ponto de destruição de exergia: a câmara de combustão, responsável por mais de 30% da destruição de exergia. Outros componentes como a turbina a gás, a caldeira de recuperação e o ciclo a vapor, juntos são responsáveis por cerca de 12% da destruição de exergia.

As principais diferenças entre os ciclos NGCC e OCC com relação a análise energética são as fontes de energia com cerca de 2038,61 MW (combustível e ar comprimido para o caso NGCC) e 1554,70 MW (combustível, oxigênio comprimido e gás rico em dióxido de carbono comprimido) e as perdas de energia do ciclo a vapor, que para o caso OCC é o dobro do encontrado no NGCC. Isso se deve a baixa eficiência da caldeira de recuperação devido a utilização do gás de combustão rico em CO_2 e água. No ciclo OCC, cerca de 40% da potência líquida gerada pelas turbinas a gás e a vapor é destinada aos componentes ASU e CPU.

Com relação a análise exergética, nota-se que as fontes de exergia são cerca de 2048,48 MW para o cenário NGCC e 1904,37 MW para o cenário OCC. Dessa exergia cerca de 30% é destruída na câmara de combustão em ambos os cenários e, no ciclo OCC, a perda exergética na caldeira de recuperação é maior devido a sua menor eficiência. Pode-se destacar que no ciclo OCC o fluxo de saída da caldeira de recuperação possui uma exergia bem mais elevada que no ciclo NGCC, devido principalmente a exergia química que resulta da composição dos gases de combustão.

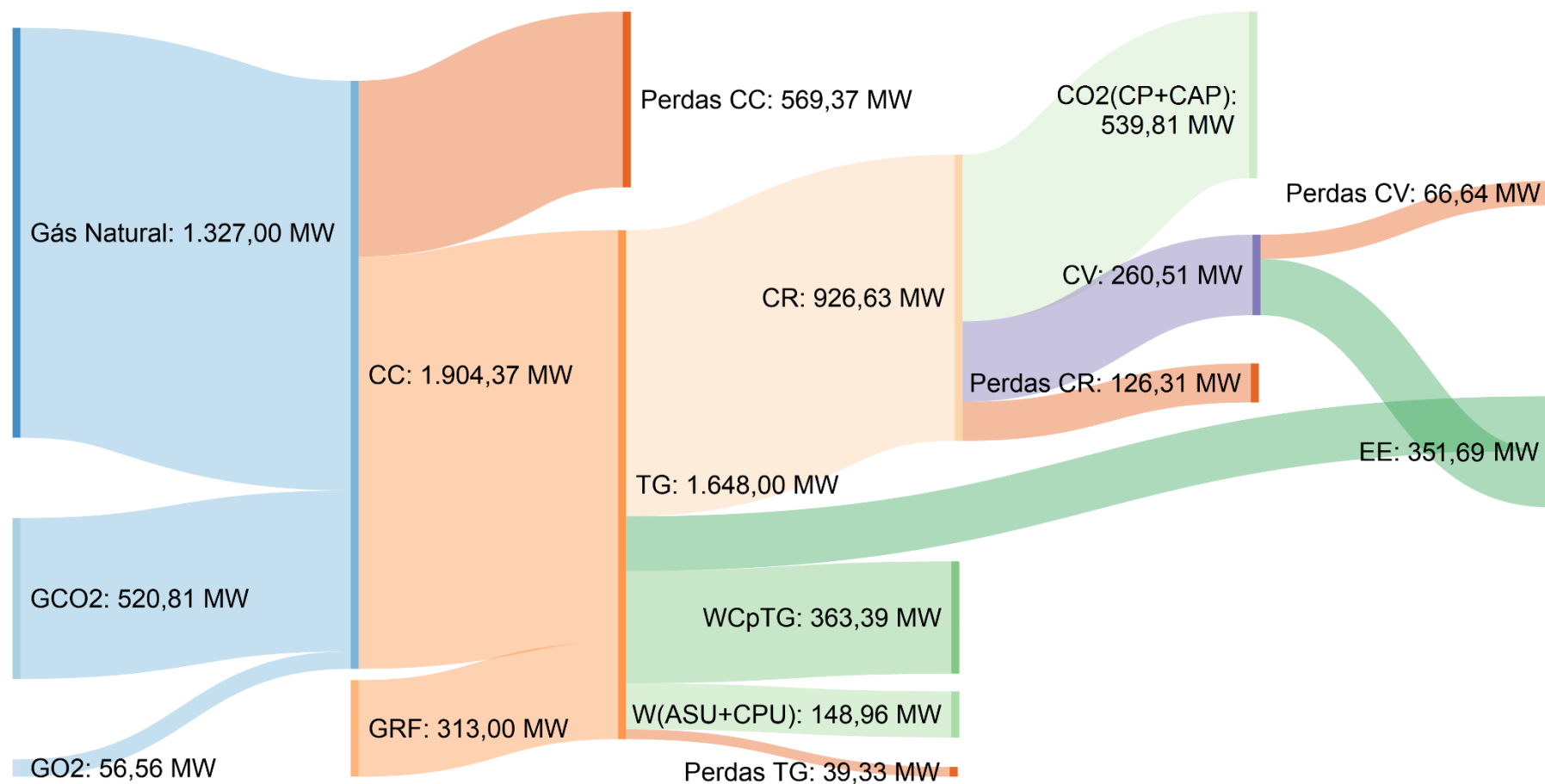
Figura 34 - Diagrama de Sankey do ciclo OCC



Nota: CC (câmara de combustão), CH (Chaminé), CR (Caldeira de Recuperação), CV (Ciclo a vapor), EE (energia elétrica gerada), GCO2 (Gás rico em dióxido de carbono), GO2 (gás rico em oxigênio), TG (Turbina a gás), WCpTG (trabalho mecânico do compressor), W(ASU+CPU) (Trabalho requerido para a separação do oxigênio e purificação do CO₂).

Fonte: Produção do próprio autor por meio do software online SankeyMATIC (BOGART, 2020)

Figura 35 - Diagrama de Grassmann do ciclo OCC



Nota: CC (câmara de combustão), CH (Chaminé), CR (Caldeira de Recuperação), CV (Ciclo a vapor), EE (energia elétrica gerada), GCO2 (Gás rico em dióxido de carbono), GO2 (gás rico em oxigênio), TG (Turbina a gás), WCpTG (trabalho mecânico do compressor), W(ASU+CPU) (Trabalho requerido para a separação do oxigênio e purificação do CO₂).

Fonte: Produção do próprio autor por meio do software online SankeyMATIC (BOGART, 2020)

Da forma como foi projetado, o ciclo OCC manteve muitas características do ciclo NGCC. Comparando-se o desempenho energético e exergético dos ciclos NGCC e OCC, é possível observar que as eficiências do ciclo OCC são menores. Isso se deve principalmente a quatro fatores:

(i) Uso de O_2 para combustão do gás natural, que necessita ser separado do ar por destilação criogênica na ASU e posteriormente comprimido (processos energo-intensivos) e interfere na estequiometria da reação de combustão, uma vez que tem alto custo energético se utilizado em excesso como o ar, por isso é geralmente utilizado em quantidades pouco acima das condições estequiométricas, conforme adotado no presente trabalho.

(ii) A utilização de um gás rico em oxigênio resulta em altas temperaturas na câmara de combustão, o que impõe a necessidade de utilização de CO_2 recuperado da caldeira. A característica do gás de combustão também impõe a necessidade de resfriamento desses gases para utilização na turbina a gás. No presente trabalho optou-se por manter a turbina a gás da termelétrica e simular o resfriamento do gás de combustão antes de sua entrada na turbina. Visto que o projeto de uma nova turbina para atender as condições do ciclo OCC está fora do escopo deste trabalho.

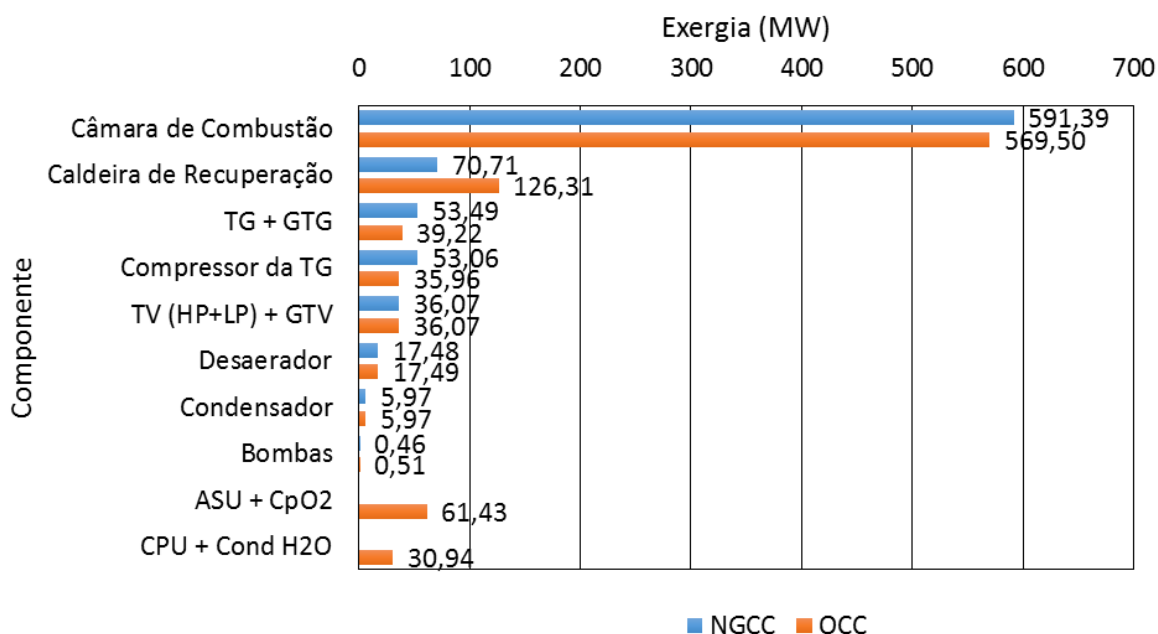
(iii) O fluido de trabalho do ciclo a gás e caldeira de recuperação é um gás rico em CO_2 , que possui calor específico (C_p) com comportamento diferente do gás de combustão resultante da queima do ar (N_2). Isso resultou em necessidade de resfriamento da turbina e diminuição da eficiência da caldeira de recuperação, visto que as características do ciclo a vapor e caldeira de recuperação foram mantidas.

(iv) Necessidade de compressão e purificação do CO_2 a ser capturado. A inclusão desse componente (CPU) consome também energia gerado no ciclo, que deixa de ser disponibilizada para envio à rede.

As irreversibilidades de cada componente das UTE (NGCC e OCC) em ambos os cenários são apresentadas na Figura 36, na qual é possível observar o aumento de destruição de exergia na caldeira de recuperação do ciclo OCC, conforme descrito anteriormente. Observa-se também uma pequena redução da destruição de exergia no conjunto a gás (compressor, câmara de combustão e turbina). Isso se deve ao fato do controle da temperatura de entrada da turbina e das eficiências dos componentes do ciclo a gás, bem como da característica dos gases que circulam por esses componentes, cujo fluxo mássico de alimentação da turbina foi mantido o mesmo do ciclo NGCC. Outro ponto importante são os componentes ASU e CPU que

adicionam destruição de exergia ao ciclo OCC, com valores equivalentes à destruição de exergia nas turbinas a gás e a turbinas a vapor.

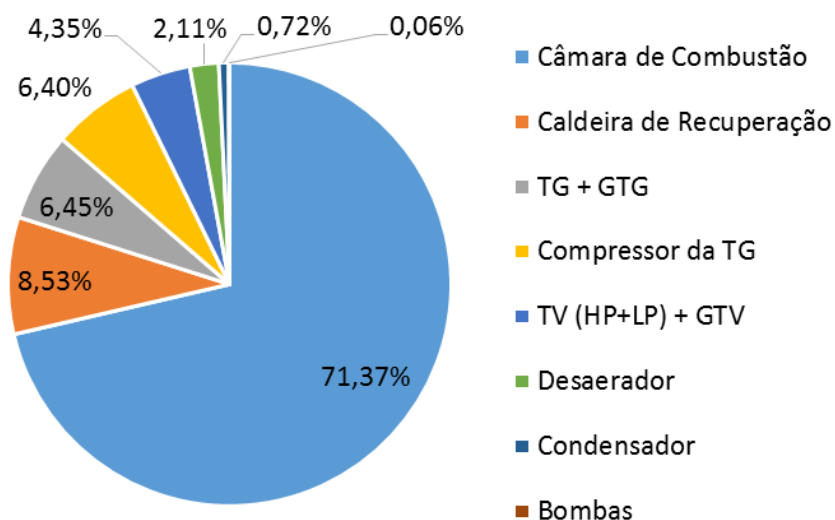
Figura 36 – Exergia destruída: NGCC vs OCC



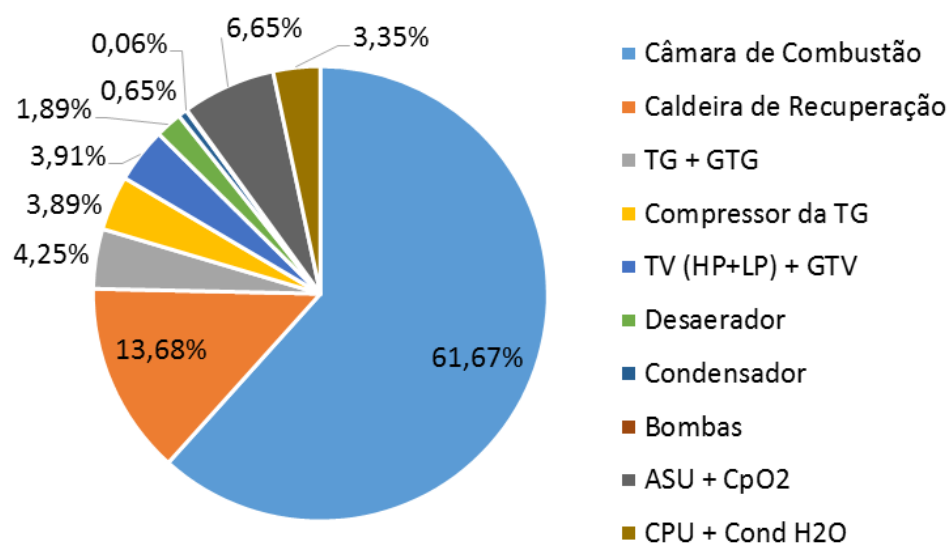
Fonte: Produção do próprio autor

A porcentagem da irreversibilidade de cada componente é apresentada na Figura 37 (a) para o cenário NGCC e (b) para o cenário OCC destacando a participação de cada componente na destruição total de exergia que é de 828,63 MW (NGCC) e 923,40 MW (OCC). Nota-se a participação dos componentes ASU e CPU no ciclo OCC, que somadas são responsáveis por cerca de 10% da destruição de exergia deste ciclo. Esses componentes são responsáveis pela redução da eficiência global (energética e exergética) do ciclo OCC em relação ao ciclo convencional NGCC conforme citado anteriormente. Por esse motivo, esses componentes têm sido amplamente estudados, visando a redução do consumo de energia e possível aumento da eficiência das termelétricas com inserção sistemas de oxicombustão.

Figura 37 - Exergia destruída por componente para os ciclos NGCC e OCC



(a) NGCC



(b) OCC

Fonte: Produção do próprio autor

5.1.2 Custo exerético unitário (k^*) e Consumo acumulado de exergia (CExC)

A partir dos valores de exergia de cada ponto e do balanço exerético de cada componente pode-se obter as matrizes estruturais dos processos de geração de termoelectricidade (NGCC e

OCC), que são apresentadas no APÊNDICE B. A partir das matrizes estruturais modificadas por meio da Teoria do Custo Exergético, calculou-se os custos exergéticos de cada ponto. Depois de calculados os custos exergéticos dos pontos (B*), cujas equações são apresentadas no APÊNDICE C, pode-se definir e quantificar o custo exergético unitário (k^*) dos pontos. Esses custos são variáveis adimensionais que permitem mapear a formação dos custos físicos do sistema. Os resultados dos custos exergéticos unitários para os dois cenários avaliados (NGCC e OCC) são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Custo exergético unitário de cada ponto dos ciclos NGCC e OCC

k	NGCC	OCC	k	NGCC	OCC	K	NGCC	OCC
1	1,00	2,11	28	3,50	3,52	56	4,34	4,33
2	2,05	2,23	29	3,50	3,52	57	4,34	4,33
3	1,00	1,00	30	-	2,23	58	4,34	4,33
4	1,82	2,11	31	-	4,88	59	4,34	4,33
5	1,82	2,11	32	-	2,23	60	-	0,00
6	4,01	3,91	33	-	5,06	61	-	2,29
7	16,35	13,00	34	-	2,11	62	-	2,29
8	16,93	13,40	35	-	2,11	63	-	1,00
9	3,73	3,72	36	-	2,11	64	-	14,95
10	0,00	2,11	37	-	0,00	65	-	0,00
11	3,66	3,65	38	-	35,13	66	-	0,00
12	4,01	3,91	39	-	35,13	67	-	2,29
13	3,50	3,52	40	0,00	0,00	68	-	0,00
14	11,99	11,89	41	0,00	0,00	69	-	2,55
15	11,90	11,89	42	0,00	0,00	70	-	0
16	11,98	11,86	43	1,88	2,17	71	1,82	2,11
17	17,10	13,53	44	1,88	2,17	72	1,82	2,11
18	17,10	13,53	45	0,00	0,00	73	1,82	2,11
19	17,10	13,53	46	1,97	2,29	74	1,82	2,11
20	17,10	13,53	47	0,00	0,00	75	1,82	2,11
21	3,66	3,65	48	4,01	4,03	76	1,82	2,11
22	3,73	3,72	49	0,00	0,00	77	1,82	2,11
23	5,65	5,62	50	4,15	4,13	78	1,82	2,11
24	5,65	5,62	51	0,00	0,00	79	1,82	2,11
25	3,66	3,65	52	4,34	4,33	80	-	0,00
26	3,66	3,65	54	0,00	0,00	-	-	-
27	3,66	3,65	55	0,00	0,00	-	-	-

Fonte: Produção do próprio autor

Ao analisar os custos exergéticos dos pontos obtidos para o ciclo NGCC, as seguintes discussões são necessárias:

- Os pontos de maior custo exergético unitário são k7, k8, k14, k15, k16, k17, k18, k19 e k20. Esses pontos correspondem ao ciclo a vapor, mais precisamente à saída do pré-aquecimento, desaerador, e posterior injeção de água nos economizadores da caldeira de recuperação. O custo exergético unitário calculado penaliza a energia produzida na turbina a vapor. De acordo com a Teoria do Custo Exergético, todo o custo de irreversibilidade dos gases de chaminé é cobrado da energia da turbina a vapor, diminuindo o custo de energia da turbina a gás. Isso pode ser verificado também na Figura 38.
- Os pontos 23 e 24 apresentam custo exergético significativo pois a água utilizada para resfriamento no condensador passa primeiramente por sistema de tratamento e posteriormente por uma torre de resfriamento, para depois ser destinada ao condensador.

Para o ciclo OCC, destacam-se os seguintes custos exergéticos unitários:

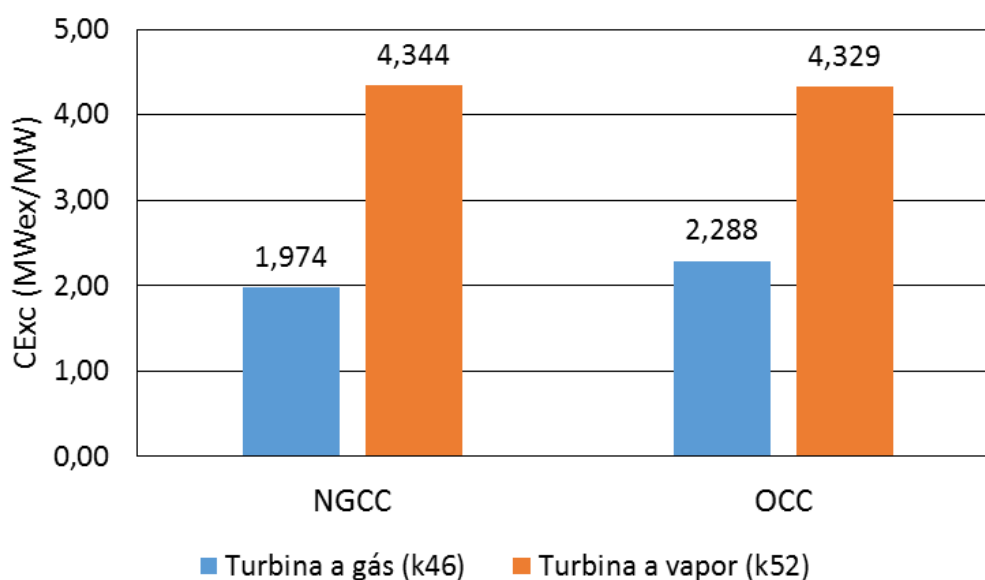
- Os pontos de maior custo exergético unitário são k38 e k39. Esses pontos se referem a água para resfriamento do gás rico em CO_2 e condensação de água presente no gás que sai da caldeira de recuperação e é destinado ao compressor para utilização na câmara de combustão e turbina. O elevado custo exergético se deve ao fato de o processo suceder o ciclo a vapor e caldeira de recuperação.
- O ponto k64 também tem custo exergético elevado, pois é a saída da ASU, componente que agrega penalidade exergética para o ciclo OCC.
- Os pontos k7, k8, k14, k15, k16, k17, k18, k19 e k20 também tem elevado custo exergético unitário, conforme citado anteriormente para o ciclo NGCC.
- O ponto k31 tem elevado custo exergético unitário, pois trata-se da saída da câmara de combustão. Para o ciclo OCC dois pontos com custo agregado são inseridos na entrada da câmara de combustão: k30 (gás rico em CO_2 da caldeira de recuperação) e k33 (oxigênio separado do ar na ASU) o que resulta no custo exergético encontrado.

Comparando-se os dois ciclos estudados, nota-se o seguinte comportamento dos custos exergéticos unitários:

- Deve-se destacar os elevados custos da energia elétrica gerada no ciclo a vapor (k52) em comparação ao ciclo a gás (k46).
- O elevado custo exergético unitário do oxigênio obtido por meio da separação do ar é um indicador do aumento do custo da energia elétrica gerada por meio da turbina a gás no ciclo OCC.
- O custo da energia elétrica gerada pelas turbinas a vapor praticamente não variou, porque as características do ciclo a vapor NGCC foram mantidas para o ciclo OCC.

Deste modo obteve-se o consumo acumulado de exergia, representado pelo custo exergético unitário (k^*) do produto energia elétrica. Na Figura 38 são apresentados os consumos acumulados de exergia para cada cenário em estudo.

Figura 38 – CExC para ambos os cenários estudados



Fonte: Produção do próprio autor

O consumo acumulado de exergia é maior para o ciclo a vapor quando comparado ao ciclo a gás, que é mais eficiente. Encontrou-se na literatura valores de comparação apenas para geração de energia elétrica utilizando ciclo a vapor com oxidcombustão 3,136 MJ_{Ex}/MJ (ZIEBIK; GLADYSZ, 2013). Pode-se observar que o consumo acumulado de exergia para o ciclo a gás é maior para o cenário de oxidcombustão (aumento de 15,9%), uma vez que sua eficiência é reduzida devido ao fluido de trabalho e também pela inclusão de componentes para a separação de oxigênio do ar, retirada de água do CO₂ para reuso no ciclo e também purificação e compressão do CO₂ para armazenamento.

5.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

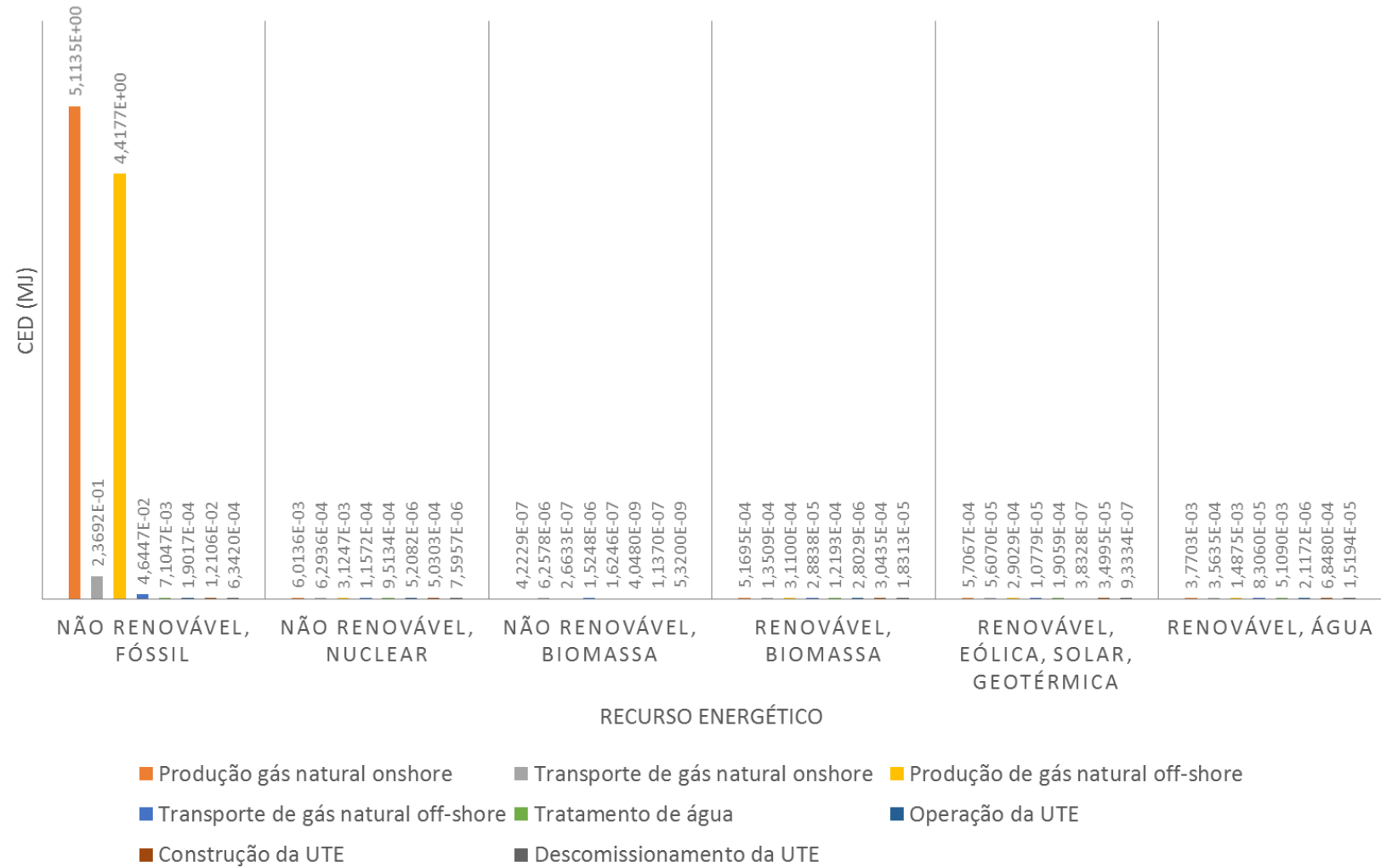
5.2.1 AICV e Interpretação dos resultados (Fases 3 e 4 da ACV)

Depois de realizadas as fases 1 e 2 da ACV, é possível calcular os potenciais impactos por meio da AICV e posteriormente realizar a interpretação dos resultados. Portanto os potenciais impactos da geração de eletricidade nas UTE Fernando Gasparian e Piratininga são apresentados na sequência, considerando as categorias de ponto único CED e CExD e de ponto médio do método CML IA *baseline* cujas categorias de impacto são: PDRA (fóssil e mineral), PAG (GWP₁₀₀), PDCO, PFFO, PTH, PA, PE e PE_c (água doce, marinha e terrestre). Primeiramente os cenários são apresentados e discutidos separadamente e, posteriormente, é realizada a comparação entre eles.

5.2.1.1 Cenário NGCC

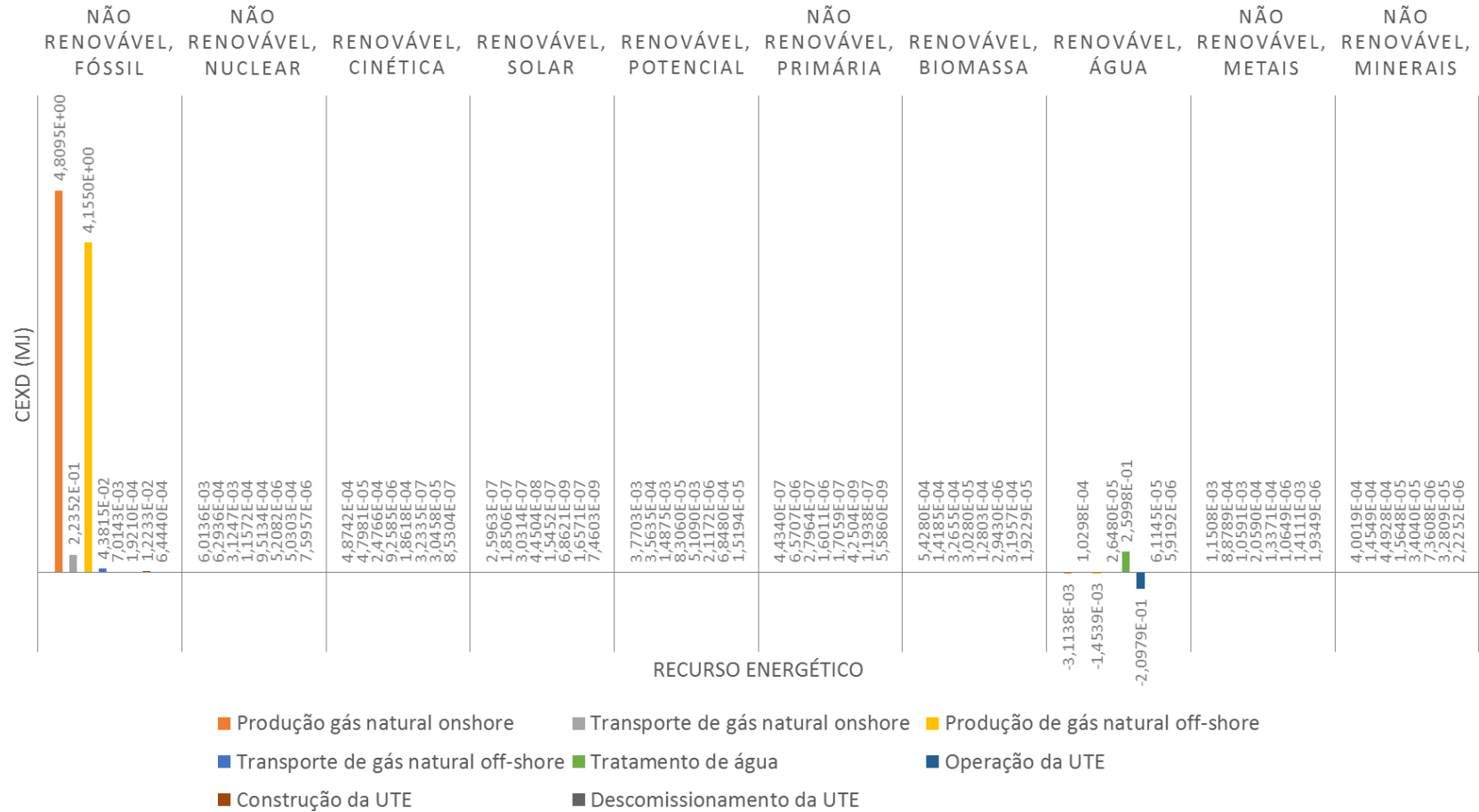
Os resultados da AICV para o cenário NGCC são apresentados na sequência por tipo de método e categorias de impacto avaliadas. Na Figura 39 pode-se observar os impactos da demanda acumulada de energia e na Figura 40 os impactos da demanda acumulada de exergia para o ciclo de vida das UTE. Nota-se que a etapa do ciclo de vida que mais consome energia, é a produção de gás natural, seguida da etapa de transporte. Esse resultado está de acordo com a literatura e é ilustrado nos estudos de (AGRAWAL *et al.*, 2014; KANNAN *et al.*, 2005; MEIER *et al.*, 2005). O impacto da produção e transporte do gás natural de origem terrestre é mais elevado, visto que este é consumido com maior intensidade, 13% a mais do que o gás natural de origem *offshore*. Portanto, a origem do recurso energético mais demandado no ciclo de vida da geração de eletricidade em estudo é fóssil (99,74%).

Figura 39 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CED da geração de eletricidade (NGCC)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 40 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CExD da geração de eletricidade (NGCC)



Fonte: Produção do próprio autor

A característica da demanda exergética do ciclo de vida é semelhante a demanda energética para o ciclo OCC. O indicador CExD representa a remoção total de exergia (recursos) da natureza para a produção da energia elétrica considerando o cenário NGCC (Figura 40). Para o presente estudo a etapa de tratamento de água foi separada da etapa de operação da UTE visando verificar os impactos do consumo de água para a geração de eletricidade. Como resultado dessa escolha, é possível verificar a demanda exergética positiva (consumo de recurso) para o tratamento de água acompanhada da demanda exergética negativa (geração de recurso) referente as saídas de água durante a etapa de operação das UTE. Nota-se também geração de recurso renovável água para a produção de gás natural *onshore* e *offshore* fato conhecido na literatura, como se pode observar no trabalho de GOMES (2014).

Buscando uma visão mais ampla dos impactos ambientais gerados pelas UTE, selecionou-se o método CML IA *baseline*, que não se limita a consumo de energia e emissões de GEE, abrangendo 11 categorias ilustradas na Figura 41. As etapas de produção e transporte do gás natural se destacam como principais geradoras de impactos ambientais do ciclo de vida na maioria das categorias. A produção de gás *onshore* é responsável por mais de 50% dos potenciais impactos para as categorias PTH, PEcM e PDRAf, mas também tem contribuição nas demais categorias, sendo essa contribuição pouco significativa apenas nas categorias PAG (cujos impactos advém em sua maioria da etapa de operação das UTE) e PDCO (cujos impactos advém em grande parte do transporte do gás natural). A produção de gás *offshore*, por sua vez, contribui de maneira significativa para as categorias PDRAf, PEcT e PDRAM. A produção do gás natural, conforme esperado, é a principal etapa contribuidora para a depleção de recursos abióticos fósseis. O transporte de gás natural *onshore* (distância de 2000 km) tem grande impacto na categoria PDCO (78%) e também na categoria PFFO (27%). O transporte *offshore* (distância 500 km) que representa 17% dos impactos da categoria PDCO.

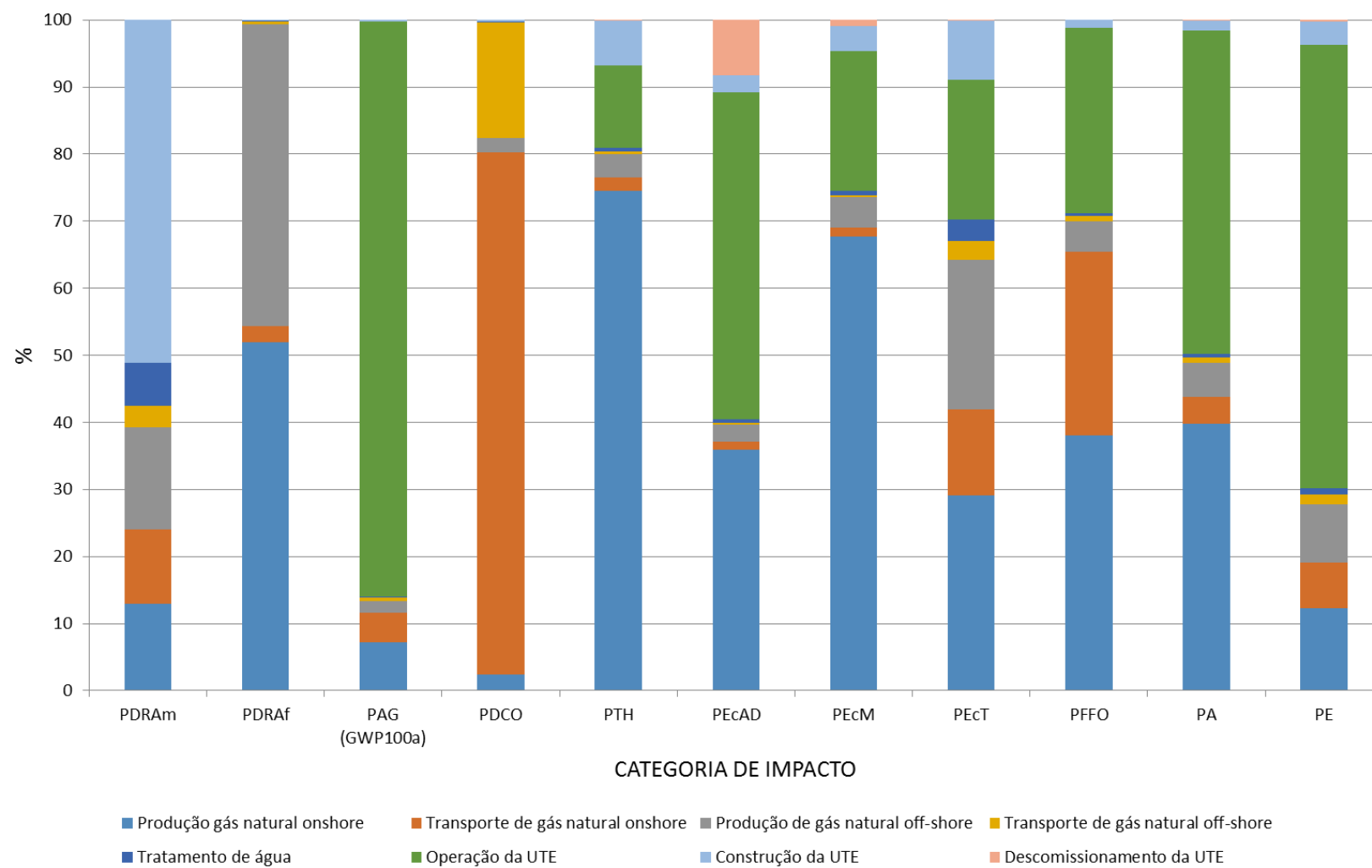
A etapa de operação das UTE, conforme verificado anteriormente, é responsável principalmente pelos impactos da categoria PAG (86%), mas também apresenta contribuição significativa para as categorias PE (66%), PEcAD (49%), PA (48%) e PFFO (28%). Pode-se inferir que esses impactos acontecem durante a operação das UTE principalmente pela queima do gás natural, devido a liberação de NOx e também pelo uso da água nas torres de resfriamento. A etapa de tratamento de água é responsável por 6% dos potenciais impactos da categoria PDRAM e 3% da categoria PEcT, impactos advindos do uso de químicos e energia elétrica.

Considerando a construção e o descomissionamento, os principais impactos potenciais são o PDRA mineral para a etapa de construção (51%) e o PEcAD para a etapa de descomissionamento (8%). Esses impactos estão associados ao uso dos materiais para

construção das UTE, como cimento, alumínio, aço e cobre e também ao processo de destinação desses materiais (aterro no caso do cimento e reciclagem no caso dos metais).

Portanto, as etapas de produção e transporte do gás natural são responsáveis por cerca de 14% das emissões de GEE do ciclo de vida da geração de eletricidade, a etapa de operação da UTE por cerca de 86%, a etapa de construção e descomissionamento por 0,22% e a etapa de tratamento de água por 0,13%. Esses resultados demonstram o impacto das emissões de GEE resultantes da combustão direta do gás natural para geração de eletricidade. Os resultados são coerentes em comparação aos resultados encontrados na literatura. Em um estudo realizado por Spath e Mann (2000) (detalhes desse estudos são apresentados no Quadro 9) cerca de 25% das emissões de GEE do ciclo de vida são atribuídas ao gás natural, enquanto 75% para operação da UTE e 0,4% ao construção e descomissionamento. Pode-se justificar a menor parcela de emissões advindas da produção e transporte do gás natural encontrada neste estudo em comparação com o estudo de Spath e Mann (2000), devido as diferentes considerações feitas para a produção e transporte de gás natural, como por exemplo a origem do gás natural, a distância de transporte e as emissões fugitivas consideradas. Outro fator que contribui para a maior parcela de emissões de GEE durante a fase de operação das UTE é a baixa eficiência do ciclo NGCC do presente estudo, que é cerca de 10% menor do que os valores geralmente apresentados na literatura. Outros estudos de ACV da geração de eletricidade a partir do gás natural por meio de termelétricas apresentam também resultados coerentes com o presente estudo, são eles: Agrawal *et al.* (2014), Jaramillo, Griffin e Matthews (2007), Kannan *et al.* (2005) e Meier *et al.* (2005).

Figura 41 - Contribuição das etapas do ciclo de vida da geração de eletricidade as categorias de impacto do método CML IA *baseline* (NGCC)



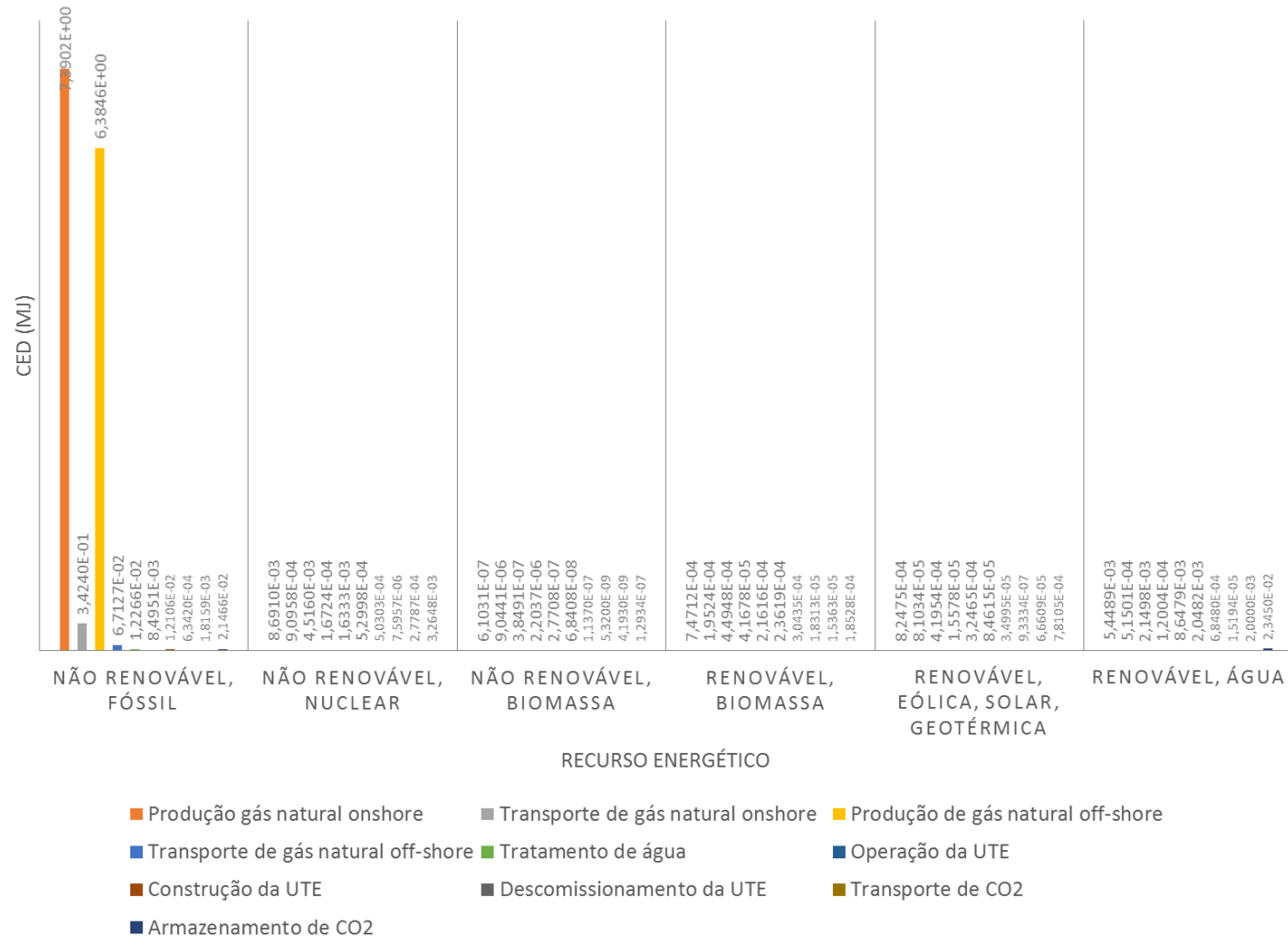
Fonte: Produção do próprio autor

5.2.1.2 Cenário OCC

Os resultados de avaliação de impacto do ciclo de vida para o cenário com inclusão da técnica de captura de carbono por oxidação (OCC) são apresentados na sequência. Primeiramente são apresentados os resultados de demanda acumulada de energia (Figura 42). Os resultados apresentados demonstram comportamento semelhante ao cenário NGCC. É possível observar o aumento na demanda acumulada de energia, devido ao fato da menor eficiência do ciclo OCC, que demanda maior uso de combustível para o fornecimento de 1 kWh de energia elétrica. Isso se deve principalmente a presença de processos adicionais no ciclo como a ASU e a CPU. Novamente é verificada o uso predominante de recurso energéticos de origem fóssil (99,51%), visto que o combustível utilizado para a geração de energia elétrica é o gás natural.

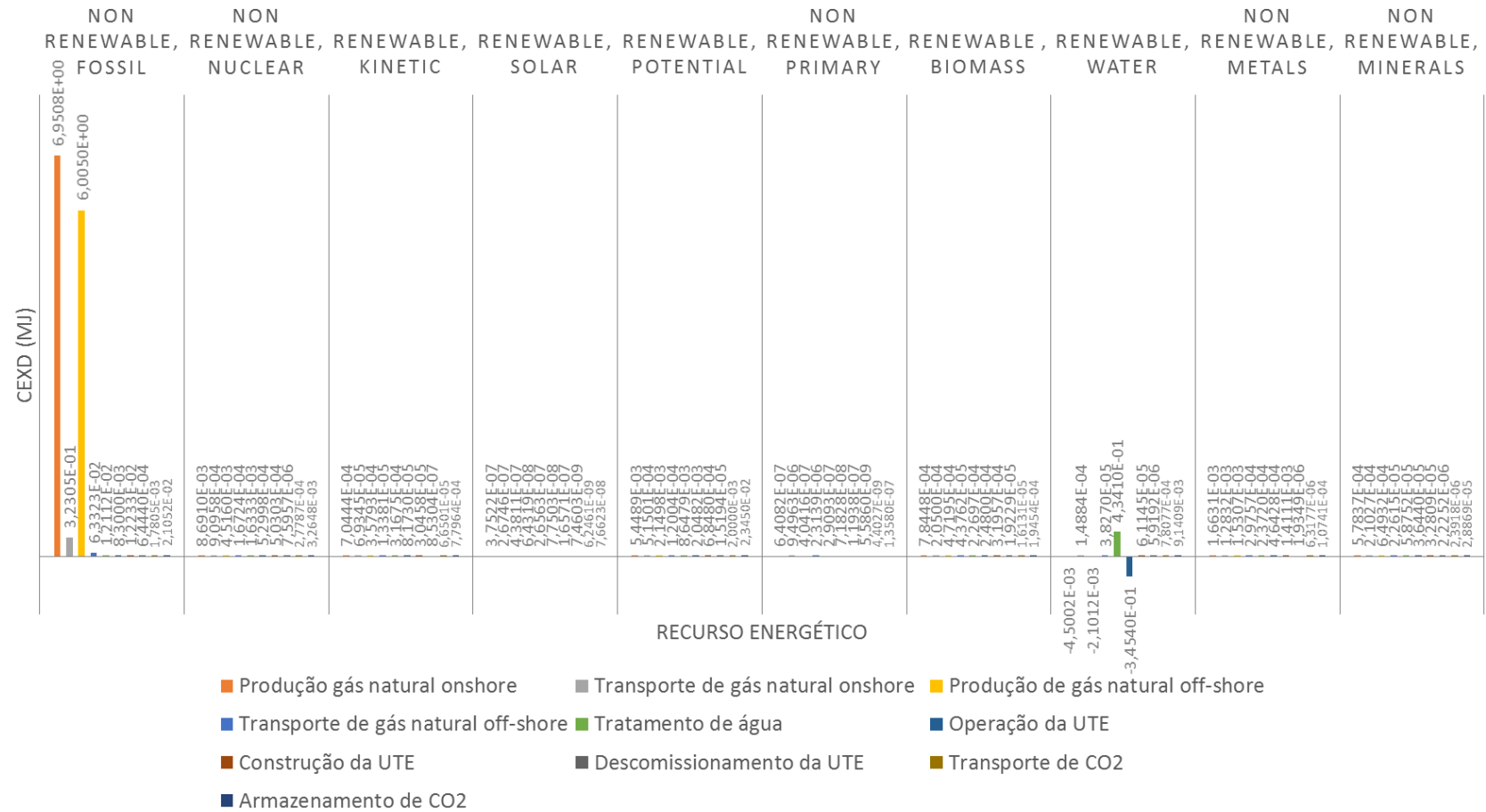
Em seguida são apresentados os impactos de demanda acumulada de exergia (CExD) para o ciclo de vida das UTE (Figura 43). A característica de demanda exergética também é semelhante a demanda exergética para o ciclo NGCC, porém com maior consumo de recurso fóssil não renovável e água. O aumento do consumo desses recursos advém do maior consumo de energia elétrica para os componentes ASU e CPU (energia elétrica gerada por meio da combustão do gás natural) e também maior consumo de água, para resfriamento e desidratação do dióxido de carbono que é parte recirculado no ciclo e parte capturado. Portanto o aumento do consumo desses recursos resulta na menor eficiência do ciclo OCC. O consumo de recurso fóssil aumentou em cerca de 45% e do recurso renovável água em torno de 100% em comparação com o ciclo NGCC.

Figura 42 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CED da geração de eletricidade (OCC)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43 - Contribuição das etapas do ciclo de vida para a CExD da geração de eletricidade (OCC)



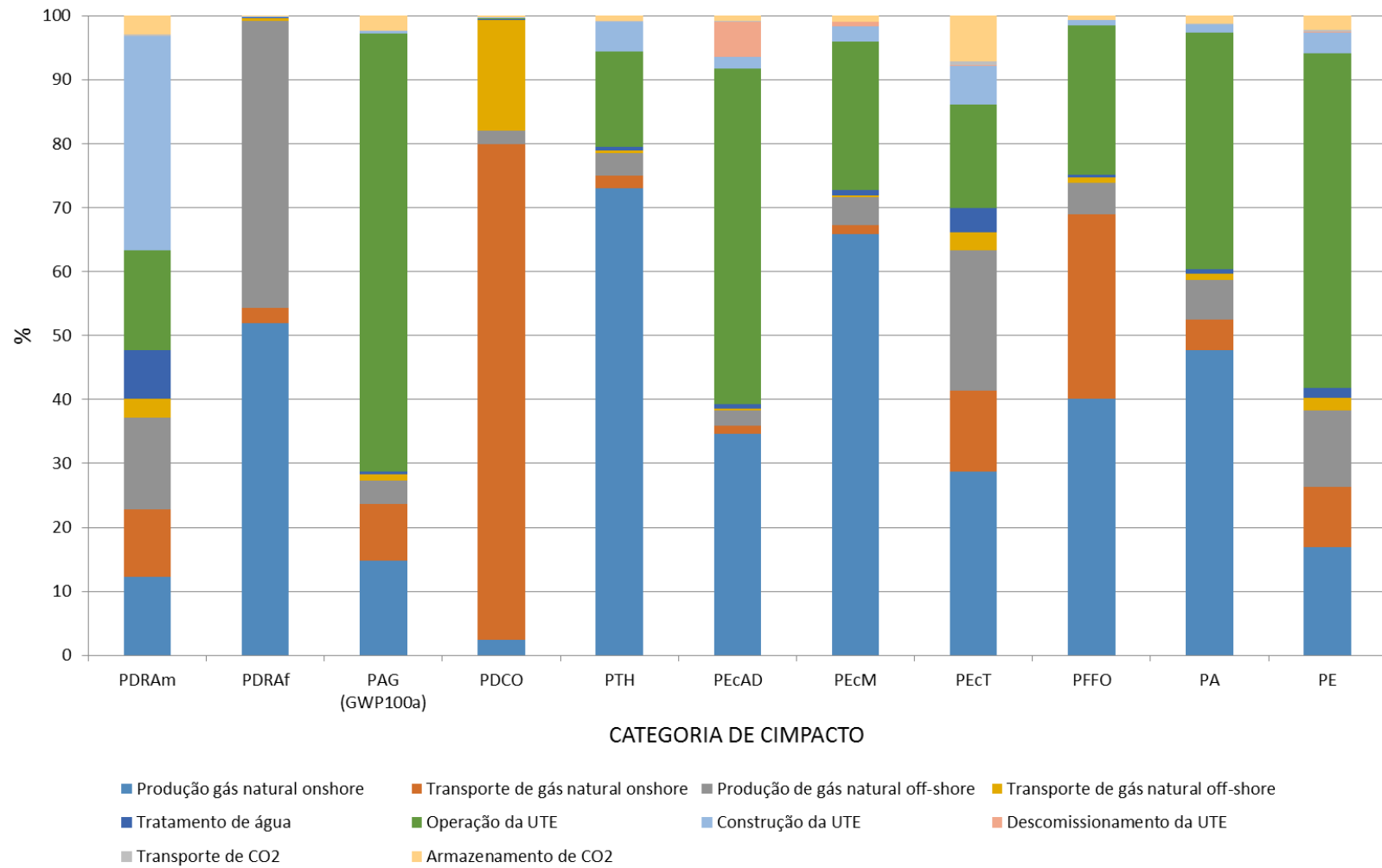
Fonte: Produção do próprio autor

Os resultados da avaliação de impacto pelo método CML IA *baseline* para o cenário OCC são ilustrados na Figura 44. As etapas de produção e transporte do gás natural se destacam como geradoras de impactos ambientais do ciclo de vida na maioria das categorias, exceto para PDRAM e PAG. A produção de gás *onshore* é responsável por mais de 40% dos potenciais impactos para as categorias PTH, PEcM, PDRAf, PA e PFFO. A produção de gás *offshore* contribui de maneira significativa (entre 15 e 45%) para as categorias PDRAf, PEcT e PDRAM. O transporte de gás natural *onshore* tem grande impacto na categoria PDCO (78%) e o transporte *offshore* representa 17% desta categoria. Visto que não foram efetuadas modificações nas etapas de produção e transporte do gás natural, o cenário OCC apresenta resultados semelhantes ao cenário NGCC, porém com maiores valores devido ao maior uso de combustível, requerido pela menor eficiência do ciclo.

A etapa de operação das UTE, é responsável pelos impactos da categoria PAG (69%), mas também apresenta contribuição significativa para as categorias PEcAD (53%), PE (52%), PA (37%) e PFFO (23%). A variação desses impactos em relação ao ciclo NGCC se devem a menor emissão de CO₂ e NO_x e também ao maior uso de água nas UTE, este último por sua vez é responsável por 7,6% dos potenciais impactos da categoria PDRAM e 4% da categoria PEcT. O dióxido de carbono necessário para o início das operações do cenário OCC acarreta impactos da etapa de operação para a categoria PDRAM, cerca de 15%, que anteriormente não eram gerados. Considerando a construção e o descomissionamento, os principais impactos potenciais são o PDRA mineral para a etapa de construção (33%) e o PEcAD para a etapa de descomissionamento (6%), valores percentuais reduzidos em relação ao cenário NGCC pelo aumento desses impactos em outras etapas do ciclo de vida.

Para este cenário, as etapas de produção e transporte do gás natural são responsáveis por cerca de 28% das emissões de GEE do ciclo de vida da geração de eletricidade, visto que a etapa de operação da UTE por cerca de 69%, a etapa de construção e descomissionamento por 0,32%, a etapa de tratamento de água por 0,31% e transporte e captura de CO₂ por 2,4%. Esses resultados demonstram o impacto das emissões de GEE resultantes da oxidação do gás natural para geração de eletricidade. Os estudos de captura de carbono por oxidação encontrados na literatura com escopo semelhante à presente tese, Lombardi (2003) e Singh, Stromman e Hertwich (2011b) não foram utilizados para comparação direta com os resultados da tese devido a diferentes considerações como infraestrutura para produção e transporte do gás natural e também infraestrutura para transporte e armazenamento do CO₂, bem como a potência e eficiência do ciclo OCC, o método AICV e as fontes de dados. Detalhes desses estudos citados são apresentados no Quadro 9.

Figura 44 - Contribuição das etapas do ciclo de vida da geração de eletricidade para as categorias de impacto do método CML IA *baseline* (OCC)

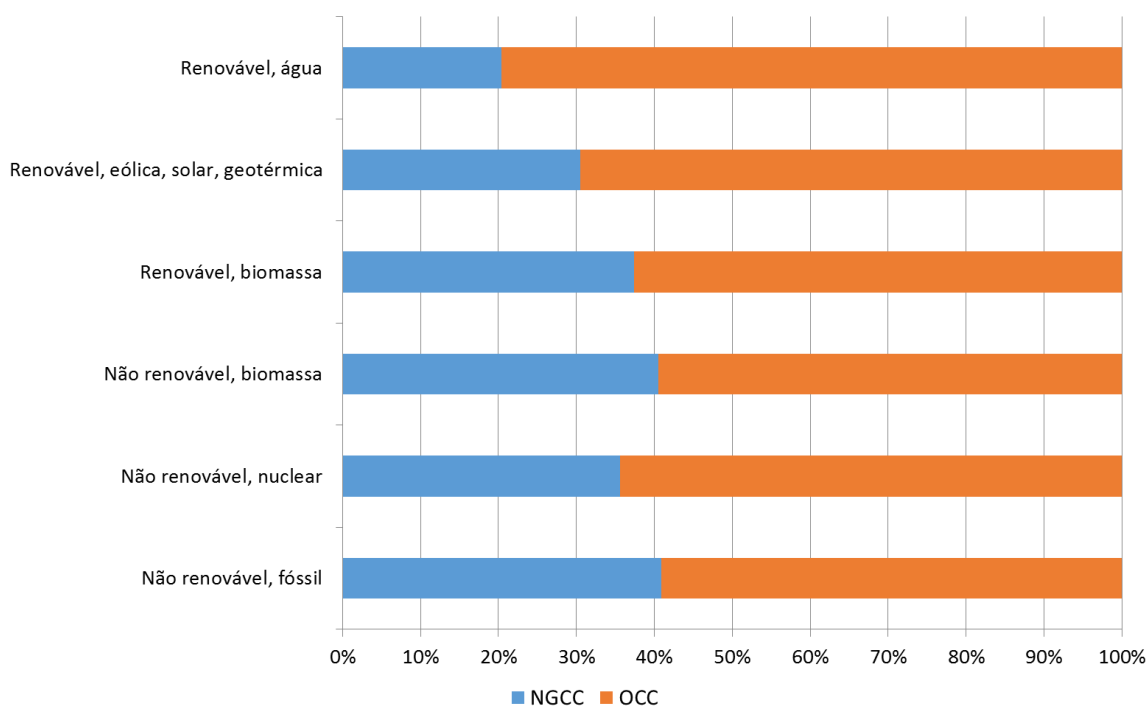


Fonte: Produção do próprio autor

5.2.1.3 Comparação NGCC *versus* OCC

Depois de apresentados os resultados percentuais para ambos os cenários considerando as distintas etapas do ciclo de vida, pode-se verificar na Tabela 20 os resultados para ambos os casos (considerando todo o ciclo de vida) e utilizando as respectivas unidades para cada método. Por meio da Figura 45 pode-se verificar que o ciclo de vida do cenário de oxidação gera mais impactos relacionados a demanda de energia considerando todos os tipos de fonte primária de energia. Isso se deve às etapas incluídas no ciclo de vida pela necessidade de utilização dos componentes ASU, CPU e também transporte e armazenamento do CO₂, conforme citado anteriormente, cujos impactos com relação a demanda de energia aumentou principalmente para a categoria renovável, água.

Figura 45 - Comparação dos resultados da AICV (CED) dos cenários NGCC e OCC

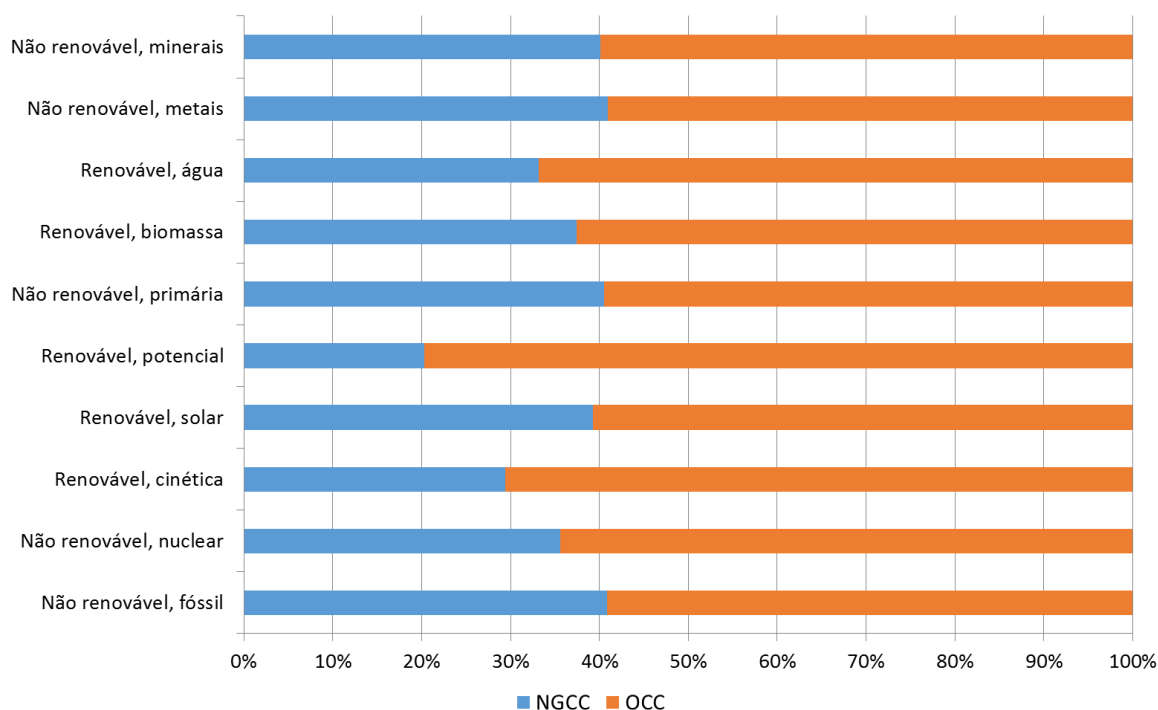


Fonte: Produção do próprio autor

Considerando os impactos da demanda acumulada de exergia do ciclo de vida para ambos os cenários (Figura 46), pode-se verificar que o consumo de exergia também é maior para o

cenário OCC, observa-se também neste caso que aumento do consumo é maior de recurso renovável potencial, advindo do maior consumo de energia para este cenário.

Figura 46 - Comparação dos resultados da AICV (CExD) dos cenários NGCC e OCC



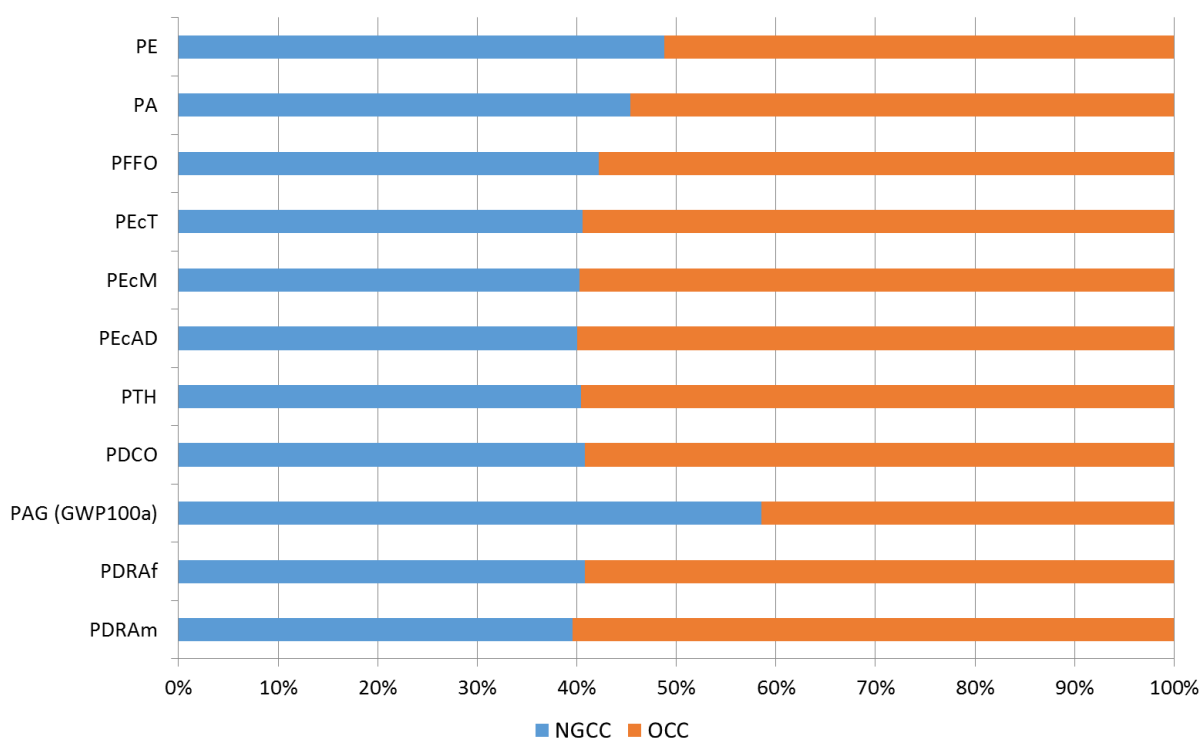
Fonte: Produção do próprio autor

Em se tratando dos demais impactos avaliados utilizando o método CML IA *baseline* (Figura 47) pode-se observar um maior impacto do ciclo de vida para o cenário OCC, quando comparado ao NGCC, para a maioria das categorias, com exceção da categoria PAG. Pode-se observar também que as categorias PE, PA e PFFO obtiveram um menor aumento de impacto do ciclo OCC com relação ao NGCC, devido à redução de emissões de NOX e CO₂ advindos da inserção da captura por oxidcombustão.

Por meio dos resultados obtidos, pode-se observar que o desempenho ambiental relacionado as emissões de GEE do ciclo de vida das UTE é melhorado com a inclusão da captura de carbono. Porém analisando os potenciais impactos ambientais de forma mais ampla, considerando consumo de energia, exergia e outros impactos ao meio ambiente como depleção de recursos abióticos, potencial de depleção da camada de ozônio, potencial de formação fotoquímica de ozônio, potencial de toxicidade humana e ecotoxicidade, acidificação e eutrofização, verifica-se que a inclusão da captura de carbono por oxidcombustão na geração

termelétrica a gás natural nas UTE estudadas resulta na piora do desempenho ambiental do ciclo de vida da geração de energia elétrica.

Figura 47 - Comparação dos resultados da AICV (CML IA baseline) dos cenários NGCC e OCC



Fonte: Produção do próprio autor

É importante destacar que as eficiências dos ciclos considerados neste estudo (NGCC e OCC) são menores do que as encontradas na literatura, o que acarretou no aumento dos impactos ambientais. A quantidade de dióxido de carbono gerado também é muito maior para o ciclo OCC (1153 kg/s) do que a quantidade gerada para o ciclo NGCC (66 kg/s). Considerando que 98% do CO₂ gerado é capturado, a quantidade lançada na atmosfera (23 kg/s) é cerca de um terço menor que no ciclo NGCC. Os resultados obtidos neste estudo para as categorias de impacto avaliadas são apresentados também na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados da AICV (NGCC e OCC)

Categoria de Impacto	Unidade	NGCC	OCC
CED			
Não renovável, fóssil	MJ	9,8346E+0	1,4241E+1
Não renovável, nuclear	MJ	1,1351E-2	2,0500E-2
Não renovável, biomassa	MJ	8,7568E-6	1,2841E-5
Renovável, biomassa	MJ	1,4393E-3	2,4092E-3
Renovável, eólica, solar e geo	MJ	1,1547E-3	2,6338E-3
Renovável, água	MJ	1,1508E-2	4,5080E-2
TOTAL	MJ	9,8600E+0	1,4312E+1
CExD			
Não renovável, fóssil	MJ	9,2519E+0	1,3398E+1
Não renovável, nuclear	MJ	1,1351E-2	2,0500E-2
Renovável, cinética	MJ	1,0101E-3	2,4210E-3
Renovável, solar	MJ	1,1269E-6	1,7443E-6
Renovável, potencial	MJ	1,1508E-2	4,5080E-2
Não renovável, primária	MJ	9,1947E-6	1,3483E-5
Renovável, biomassa	MJ	1,5113E-3	2,5296E-3
Renovável, água	MJ	4,5812E-2	9,2272E-2
Não renovável, metais	MJ	4,8515E-3	7,0029E-3
Não renovável, minerais	MJ	1,0870E-3	1,6221E-3
TOTAL		9,3290E+0	1,357E+1
CML IA baseline			
PDRA (mineral)	kg Sb eq	3,1431E-8	4,7991E-8
PDRA (fóssil)	MJ	8,8627E+0	1,2834E+1
PAG (GWP _{100a})	kg CO ₂ eq	4,9238E-1	3,4843E-1
PDCO	kg CFC-11 eq	3,7205E-8	5,3963E-8
PTH	kg 1,4-DB eq	5,0572E-2	7,4514E-2
PEcAD	kg 1,4-DB-eq	4,2956E-2	6,4292E-2
PEcM	kg 1,4-DB-eq	8,4759E+1	1,2587E+2
PEcT	kg 1,4-DB-eq	6,5381E-5	9,5720E-5
PFFO	kg C ₂ H ₄ -eq	4,3642E-5	5,9796E-5
PA	kg SO ₂ -eq	5,4744E-4	6,5938E-4
PE	kg PO ₄ --- eq	9,2076E-5	9,6521E-5

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 9 - Dados dos estudos utilizados para comparação

Dados verificados	Este estudo	Spath e Mann (2000)	Lombardi (2003)	Singh, Stromman e Hertwich (2011b)
Unidade Funcional (UF)	1 kWh de eletricidade	1 kWh de eletricidade	1 MJ ^a de eletricidade	1 kWh de eletricidade
Potência da UTE	565 MW (SC) 352 MW (CC)	500 MW	10 MW	400 MW
Tempo de vida da UTE	20 anos	30 anos	15 anos	25 anos
Tempo de operação por ano	5000 horas	7000 horas	7000 horas	8000 horas
Eficiência da UTE	42,0% (SC) 29,7% (CC)	48,8% (SC)	43,7% (CC)	58,1% (SC) 46,8% (CC)
Tecnologia de captura de CO₂	NGCC e SCOC-CC	NGCC sem captura	E-MATIAN T	NGCC e SCOC-CC
Fronteira	Berço ao túmulo	Berço ao túmulo	Berço ao túmulo	Berço ao túmulo
Métodos de AICV	CED, CExD, CML IA baseline	n.i.	Eco-indicator 95, ELCA	Recipe 2008 (ACV híbrida)
Categorias de impacto avaliadas	PDRA (f,m), PAG, PDCO, PFFO, PTH, PA, PE, PE _c (AD,M,T)	PAG	PDCO, PA, PE, smog (verão e inverno), pesticidas, metais pesados para o ar e água, energia, carcinogênicos e sólidos.	PAG, PFFO, PTH, PA, PE, PE _c (AD,M,T), PFMP
País	Brasil	EUA	n.i.	n.i.
Origem dos dados	Primária e secundária	Primária e secundária	Secundária	Secundária
Bases de dados	Ecoinvent 3.4	TEAM e UDI	n.i.	Ecoinvent 2.0
Software utilizado	SimaPro 8.5.2	n.i.	SimaPro 4.0	n.i.
Quantidade de CO₂ emitida/ UF (GWP_{100a})	0,492 (SC) e 0,348 (CC) kg de CO ₂ -eq	0,499 kg de CO ₂ -eq (SC)	0,01 kg CO ₂ -eq (CC)	0,420 (SC) e 0,120 (CC) kg de CO ₂ -eq

^a 1 MJ equivale a aproximadamente 0,278 kWh.

Nota: CC (com captura), SC (sem captura), n.i. (não informado).

Fonte: Produção do próprio autor

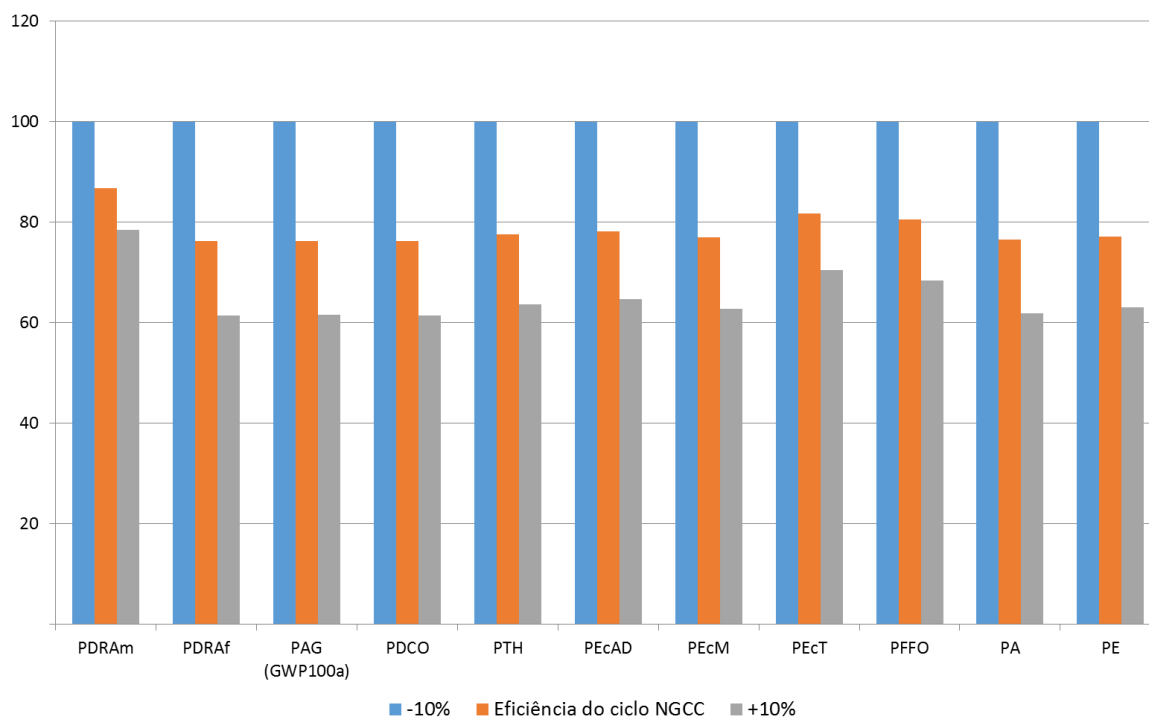
5.2.2 Análise de sensibilidade dos resultados

De acordo com a norma NBR ISO 14041 (2004), a análise de sensibilidade é um procedimento utilizado para estimar os efeitos dos métodos e dados selecionados, nos resultados do estudo de ACV. No presente estudo fez-se o uso desta análise para estimar a influência da variação da eficiência das UTE nos resultados do estudo de ACV. A eficiência foi variada em dois níveis +10 e -10 pontos percentuais e os resultados obtidos para o método CML IA baseline são apresentados na Figura 48 (a) NGCC e (b) OCC.

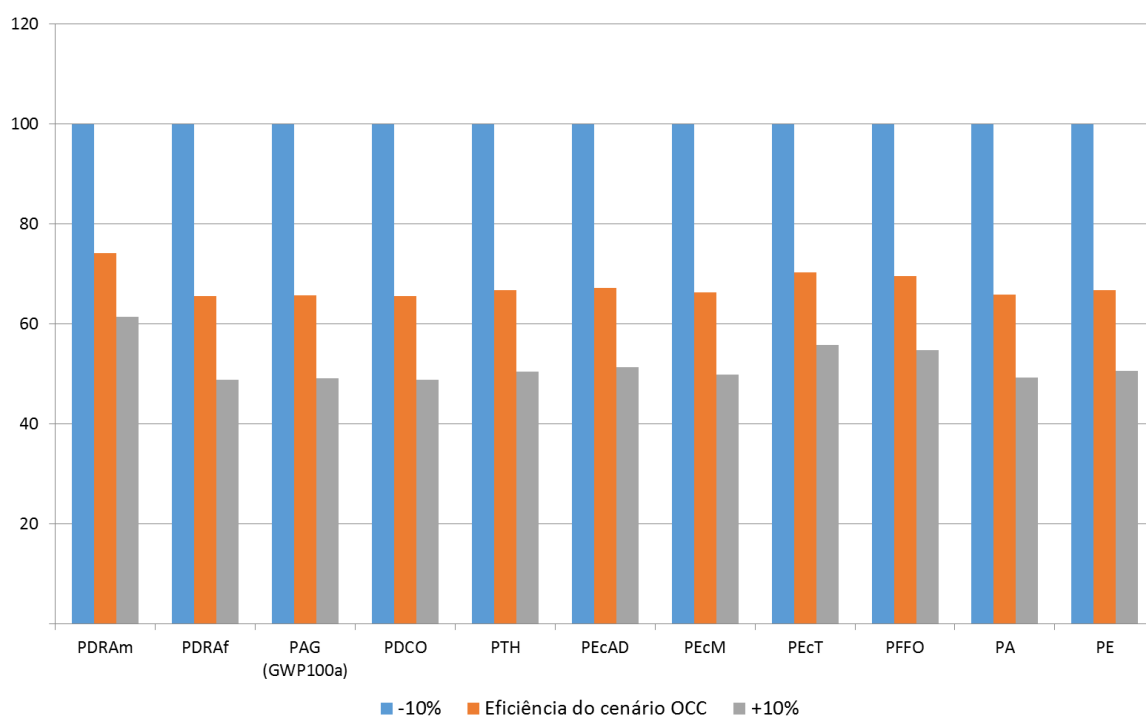
Nota-se que aumentar a eficiência reduz o potencial de impacto em todas as categorias do método CML IA baseline. Para o ciclo NGCC os impactos aumentam de 13 a 23% com a redução da eficiência e diminuem de 8 a 14% com o aumento da eficiência. Para o ciclo OCC, os impactos aumentam de 25 a 34% com a redução da eficiência e diminuem de 12 a 16% com o aumento da eficiência.

Portanto, a análise de sensibilidade indica que maiores ganhos ambientais seriam alcançados por um aumento na eficiência da usina. O fato de a eficiência da usina ter grande efeito sobre os resultados demonstra que a estratégia mais eficaz para reduzir o impacto ambiental da produção de energia elétrica é por meio do desenvolvimento de tecnologias projetadas para aumentar a eficiência das UTE. Apesar da tecnologia NGCC ser a tecnologia de geração de energia elétrica em larga escala mais eficiente e econômica atualmente (SPATH; MANN, 2000), sua eficiência pode ser melhorada, bem como a eficiência do ciclo OCC, fonte de diversos estudos científicos, conforme apresentado na seção 2.1.4.1.

Figura 48 – Análise de incerteza (CML IA baseline) dos cenários NGCC e OCC



(a) NGCC



(b) OCC

Fonte: Produção do próprio autor

5.2.3 Análise de incerteza dos resultados (Método de Monte Carlo e Matriz de Pedigree)

Para avaliar a robustez da AICV de acordo a variabilidade dos dados de inventário optou-se por realizar uma análise de Monte Carlo, uma abordagem bem compreendida e geralmente aceita na análise de decisão quantitativa (LLOYD; RIES, 2007) integrada a análise qualitativa realizada por meio da Matriz de Pedigree. A Matriz de Pedigree foi utilizada para estimar a incerteza adicional por meio de indicadores de qualidade de dados (confiabilidade, abrangência, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica adicional) disponíveis na base de dados Ecoinvent. Essa base de dados utiliza também valores padronizados de incerteza básica. No Quadro 10, são apresentados os critérios para determinar os valores das incertezas para cada uma das categorias avaliadas na matriz. Essas incertezas foram apresentadas para as entradas do ICV na Tabela 14 (NGCC) e Tabela 15 (OCC).

A análise foi realizada no software SimaPro utilizando o método de Monte Carlo com 10000 execuções e intervalo de confiança de 95%. Os resultados da simulação para os métodos de AICV utilizados (CED, CExD e CML IA baseline) são apresentado nas Figura 49, Figura 50 e Figura 51 e nas Tabela 21 e Tabela 22.

As maiores fontes de incerteza nos dados desse estudo estão relacionadas à representatividade dos dados, à correlação geográfica e ao tamanho da amostra. A primeira origem de incerteza se deve ao fato de não ser possível afirmar que as informações das fichas utilizadas são totalmente representativas para a realidade das UTE. Quanto a geografia, parte das fichas adotadas tem abrangência global, o que faz com que o nível de incerteza aumente. O tamanho das amostras utilizadas para os cálculos dos dados do EIA não foram fornecidos.

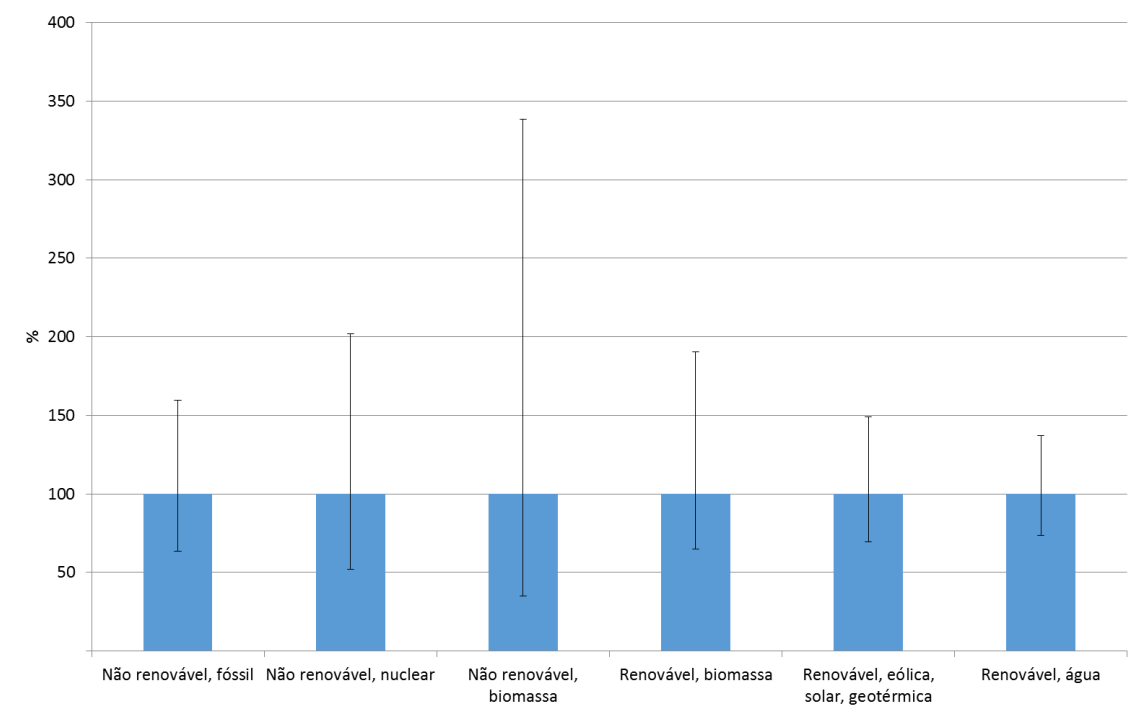
Em relação aos métodos, pode-se observar que para o método CED (considerando ambos os cenários) a energia não renovável, biomassa apresenta a maior faixa de incerteza, sendo esta advinda dos dados de inventário. Para o método CExD a categoria renovável, água apresenta a maior faixa de incerteza devido a dados de inventário do presente estudo. Os dados de inventário são oriundos do EIA e, de acordo com o resultado da análise de Monte Carlo para esta categoria, devem ser revisados. Com relação ao método CML IA baseline, as categorias com maior faixa de incerteza são PTH, PEcAD e PEcM. Para este método é importante destacar a redução da faixa de incerteza para as categorias PFFO, PA e PE para o cenário OCC em relação ao cenário NGCC. Esta redução se deve a qualidade dos dados de inventário da base NETL utilizados para o transporte e armazenamento do CO₂.

Quadro 10 - Pontuação de cada indicador da qualidade dos dados para a análise de incerteza

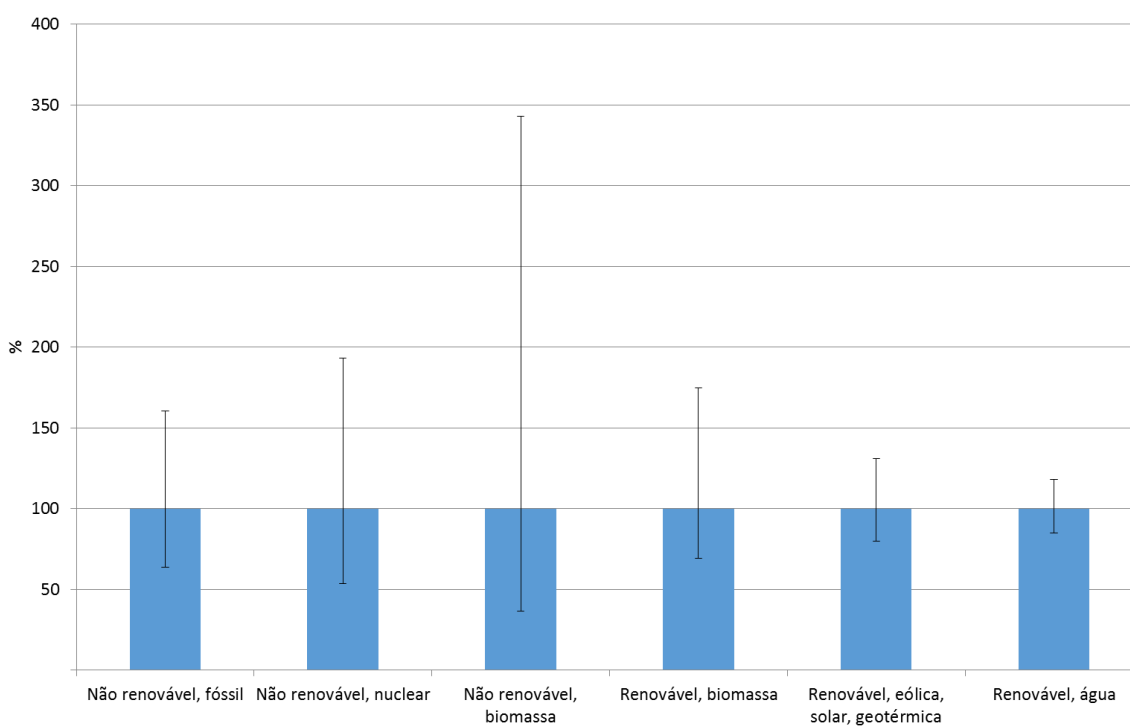
Pontuação	1	2	3	4	5
Confiança da fonte	Dados verificados baseados em medidas	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados baseados em estimativas qualificadas ou informações teóricas	Estimativa qualificada; dados derivados de informações teóricas	Estimativa não qualificada
Completeza	Dados representativos de todos os locais relevantes para o aspecto e com período adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o aspecto considerando com períodos adequados para compensar flutuações normais	Dados representativos de somente alguns locais (<< 50%) relevantes para o aspecto considerado ou > 50% dos locais, mas com períodos curtos	Dados representativos de apenas um local representativo para o aspecto considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e períodos curtos
Número de amostras	> 100, medidas contínuas	> 20	> 10	≥ 3	Desconhecido
Correlação Temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano do estudo	Menos de 6 anos de diferença para o ano do estudo	Menos de 10 anos de diferença para o ano do estudo	Menos de 15 anos de diferença para o ano do estudo	Idade dos dados desconhecida ou mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	Dados da área do estudo	Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída	Dados de uma área menor que a área do estudo, ou de área similar		Dados de área desconhecida ou área com muita diferença nas condições de produção
Correlação Tecnológica	Dados de empreendimentos, processos e materiais em estudo (por exemplo, tecnologia idêntica)		Dados de processos ou materiais relacionados, mas com mesma tecnologia, ou dados de processos e materiais em estudo mas de diferente tecnologia	Dados de processos ou materiais em estudo, mas tecnologias diferentes, ou dados em processos em escala laboratorial de mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais relacionados, mas em escala laboratorial de diferente tecnologia

Fonte: Adaptado de Benedet Júnior (2007)

Figura 49 – Análise de incerteza (CED) dos cenários NGCC e OCC



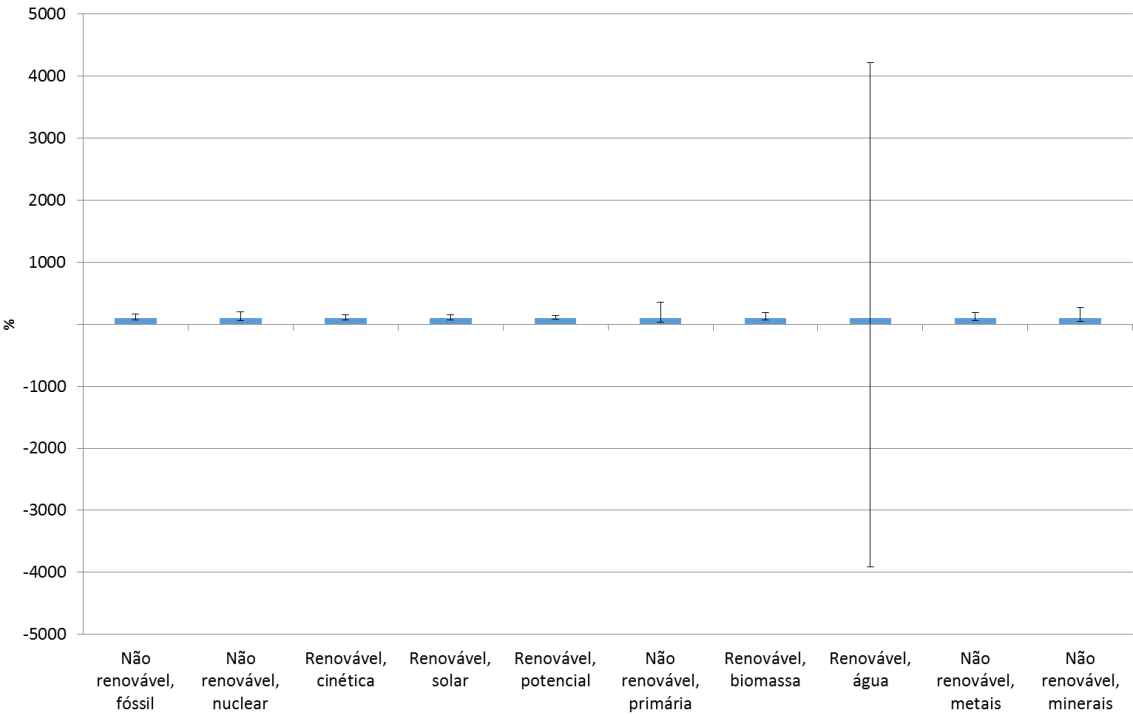
(a) NGCC



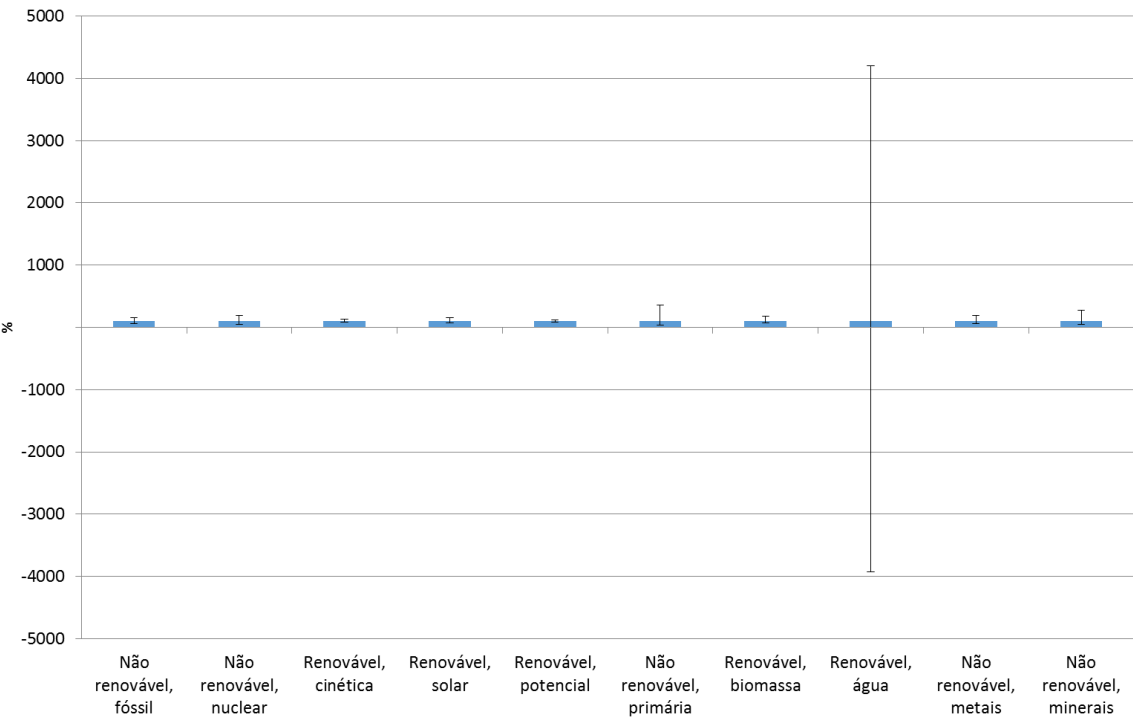
(b) OCC

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 50 – Análise de incerteza (CExD) dos cenários NGCC e OCC



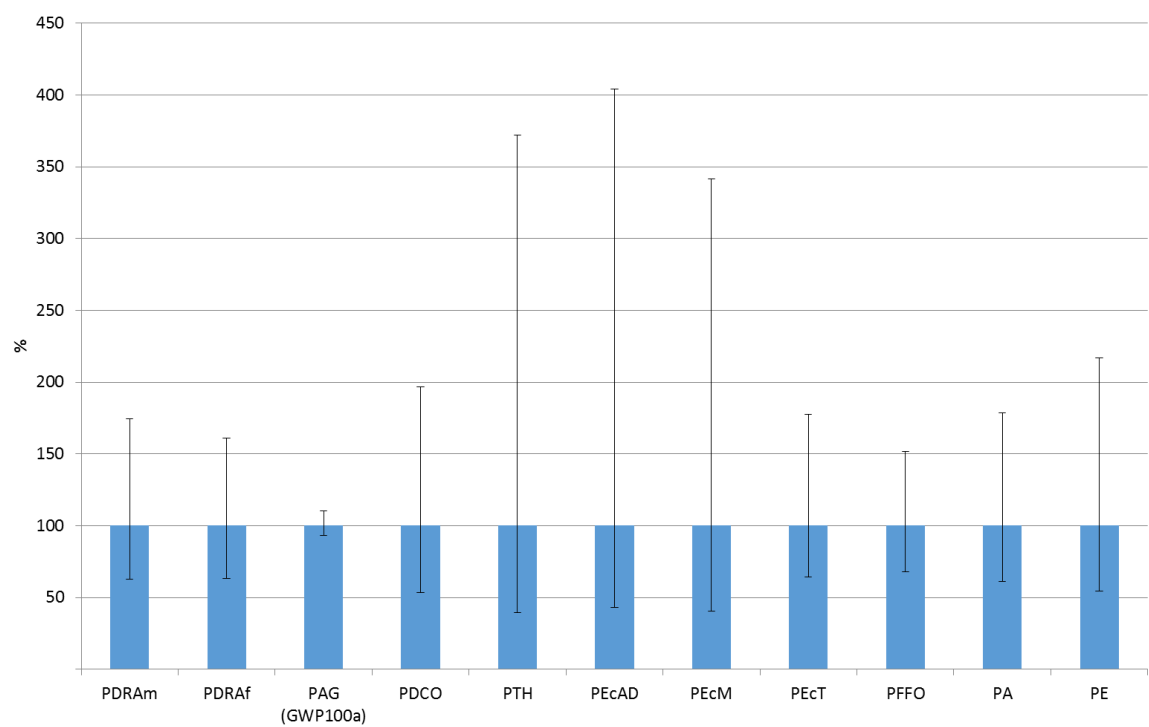
(a) NGCC



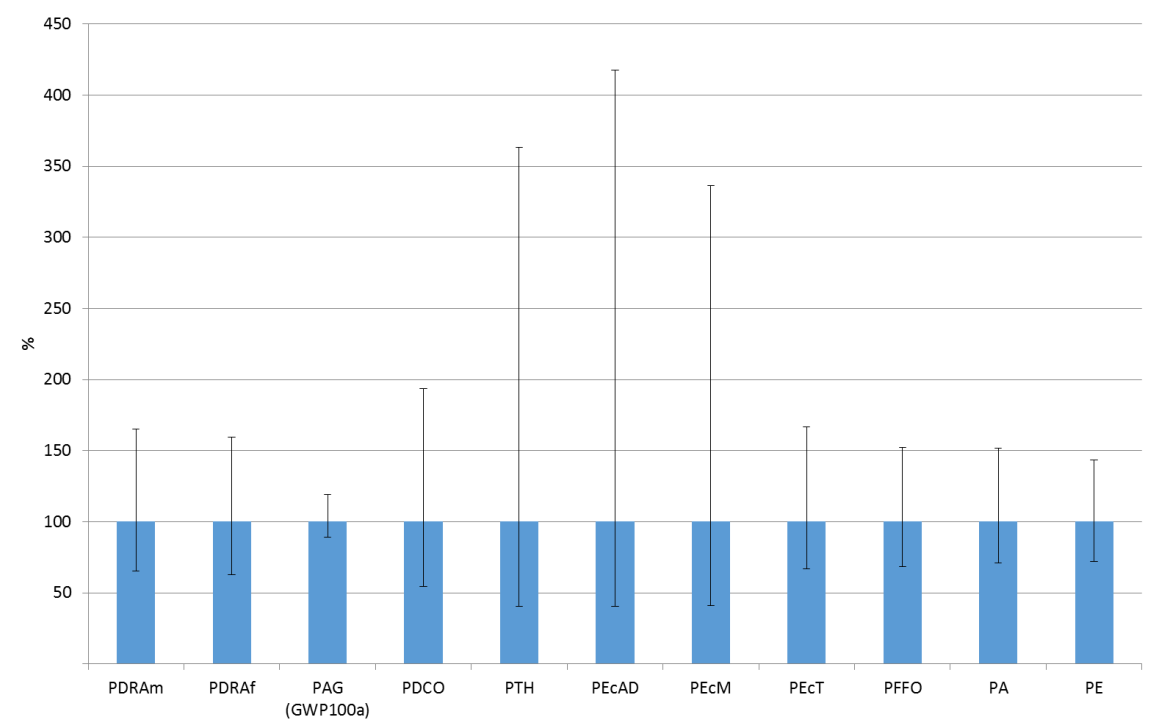
(b) OCC

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 51 – Análise de incerteza (CML IA baseline) dos cenários NGCC e OCC



(c) NGCC



(d) OCC

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 21 - Estatísticas dos resultados da AICV (NGCC)

Categoria de Impacto	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coef. Variação
CED					
Não renovável, fóssil	MJ	9,8443E+0	9,5648E+0	2,3515E0	23,8870
Não renovável, nuclear	MJ	1,1422E-2	1,0651E-2	4,1036E-3	35,9274
Não renovável, biomassa	MJ	8,6035E-6	7,0216E-6	6,2166E-6	72,2569
Renovável, biomassa	MJ	1,4416E-3	1,3461E-3	4,6741E-4	32,4236
Renovável, eólica, solar e geo	MJ	1,1562E-3	1,1294E-3	2,3043E-4	19,9293
Renovável, água	MJ	1,1516E-2	1,1363E-2	1,8346E-3	15,9304
CExD					
Não renovável, fóssil	MJ	9,2355E+0	8,9485E+0	2,2188E+0	24,0251
Não renovável, nuclear	MJ	1,1358E-2	1,0644E-2	3,9616E-3	34,8808
Renovável, cinética	MJ	1,0099E-3	9,8846E-4	1,9470E-4	19,2794
Renovável, solar	MJ	1,1287E-6	1,0917E-6	2,4502E-7	21,7076
Renovável, potencial	MJ	1,1508E-2	1,1336E-2	1,8097E-3	15,7260
Não renovável, primária	MJ	9,2431E-6	7,4641E-6	6,5436E-6	70,7948
Renovável, biomassa	MJ	1,5184E-3	1,4213E-3	4,8245E-4	31,7733
Renovável, água	MJ	3,5435E-2	3,2960E-2	6,7929E-1	1917,0259
Não renovável, metais	MJ	4,8336E-3	4,5489E-3	1,5496E-3	32,0588
Não renovável, minerais	MJ	1,0929E-3	9,5149E-4	5,8330E-4	53,3735
CML IA baseline					
PDRA (mineral)	kg Sb eq	3,1276E-8	2,9876E-8	8,6698E-9	27,7197
PDRA (fóssil)	MJ	8,8339E+0	8,5788E+0	2,1303E+0	24,1148
PAG (GWP _{100a})	kg CO ₂ eq	4,9229E-1	4,9016E-1	2,1255E-2	4,3175
PDCO	kg CFC-11 eq	3,7248E-8	3,5046E-8	1,2848E-8	34,4937
PTH	kg 1,4-DB eq	5,0128E-2	3,9915E-2	3,6836E-2	73,4834
PEcAD	kg 1,4-DB-eq	4,2770E-2	3,2511E-2	3,9550E-2	92,4727
PEcM	kg 1,4-DB-eq	8,4244E+1	6,8873E+1	5,7951E+1	68,7909
PEcT	kg 1,4-DB-eq	6,5075E-5	6,1684E-5	1,8295E-5	28,1139
PFFO	kg C ₂ H ₄ -eq	4,3589E-5	4,2497E-5	9,1716E-6	21,0410
PA	kg SO ₂ -eq	5,4617E-4	5,2018E-4	1,6000E-4	29,2951
PE	kg PO ₄ --- eq	9,1958E-5	8,4365E-5	3,5871E-5	39,0077

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 22 - Estatísticas dos resultados da AICV (OCC)

Categoria de Impacto	Unidade	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coef. Variação
CED					
Não renovável, fóssil	MJ	1,4196e+1	1,3788E+1	3,4185E+0	24,0808
Não renovável, nuclear	MJ	2,0499E-2	1,9337E-2	7,0136E-3	32,2150
Não renovável, biomassa	MJ	1,2841E-5	1,0458E-5	9,0655E-6	70,5952
Renovável, biomassa	MJ	2,3977E-3	2,2709E-3	6,3635E-4	26,5403
Renovável, eólica, solar e geo	MJ	2,6296E-3	2,5959E-3	3,4217E-4	13,0120
Renovável, água	MJ	4,5086E-2	4,4897E-2	3,8223E-3	8,4801
CExD					
Não renovável, fóssil	MJ	1,3462E+1	1,3108E+1	3,2436E+0	24,0940
Não renovável, nuclear	MJ	2,0420E-2	1,9380E-2	6,8772E-3	33,6789
Renovável, cinética	MJ	2,4266E-3	2,3969E-3	3,0325E-4	12,4969
Renovável, solar	MJ	1,7504E-6	1,6992E-6	3,5076E-7	20,0389
Renovável, potencial	MJ	4,5110E-2	4,4934E-2	3,8594E-3	8,5556
Não renovável, primária	MJ	1,3468E-5	1,0836E-5	9,8729E-6	73,2232
Renovável, biomassa	MJ	2,5476E-3	2,4079E-3	6,9204E-4	27,1639
Renovável, água	MJ	8,6806E-2	7,0780E-2	1,4621E+0	1684,3558
Não renovável, metais	MJ	7,0380E-3	6,652E-3	2,2042E-3	31,3179
Não renovável, minerais	MJ	1,6206E-3	1,4149E-3	8,7129E-4	53,7618
CML IA baseline					
PDRA (mineral)	kg Sb eq	4,7995E-8	4,6198E-8	1,1913E-8	24,8225
PDRA (fóssil)	MJ	1,2861E+1	1,2501E+1	3,1034E+0	24,1299
PAG (GWP _{100a})	kg CO ₂ eq	3,4845E-1	3,4506E-1	2,6999E-2	7,7485
PDCO	kg CFC-11 eq	5,3898E-8	5,0763E-8	1,8332E-8	34,0115
PTH	kg 1,4-DB eq	7,3771E-2	5,8507E-2	5,3325E-2	72,2842
PEcAD	kg 1,4-DB-eq	6,3717E-2	4,7714E-2	6,2890E-2	98,7022
PEcM	kg 1,4-DB-eq	1,2481E+2	1,0181E+2	8,6843E+1	69,5778
PEcT	kg 1,4-DB-eq	9,5677E-5	9,1881E-5	2,4172E-5	25,2647
PFFO	kg C ₂ H ₄ -eq	5,9748E-5	5,8230E-5	1,2430E-5	20,8037
PA	kg SO ₂ -eq	6,5991E-4	6,4222E-4	1,3280E-4	20,1238
PE	kg PO ₄ ---eq	9,6469E-5	9,4502E-5	1,7445E-5	18,0833

Fonte: Produção do próprio autor

5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA CONCEITUAL APRESENTADA

Em estudos de ACV, pela dificuldade na obtenção de dados de qualidade e também por sua complexidade com relação ao volume de dados a serem analisados, o grau de desagregação dos processos, na maioria das vezes, é menor do que em estudos de termodinâmicos, visto que, idealmente, os estudos deveriam ter abordagem do berço ao túmulo. Desta forma estudos de ACV proporcionam uma visão mais abrangente dos impactos do ciclo de vida de um produto ou processo. Nesse sentido, o uso do conceito de exergia como indicador ambiental faz-se importante pois permite olhar para o processo em estudo com um grau de desagregação maior, proporcionando melhorias em nível de equipamento adicionalmente aos *hotspots* encontrados por meio da ACV. O uso do conceito de exergia como indicador ambiental complementa seu uso como indicador termodinâmico visando observar a qualidade da energia e dos recursos utilizados em um ciclo de vida.

Os resultados da avaliação termodinâmica, considerando energia e exergia e utilizando os conceitos da teoria do custo exergético para determinação do consumo exergético acumulado e também do custo exergético unitário dos pontos permitiram a determinação da contribuição dos componentes utilizados nas UTE no desempenho ambiental destas. Os resultados obtidos por meio da avaliação termodinâmica realizada também demonstraram ser um indicativo dos impactos ambientais do ciclo de vida calculados posteriormente por meio da ACV.

Conclui-se então que a proposta conceitual sugerida para a avaliação termodinâmica e ambiental da geração de eletricidade nas UTE, baseada no conceito de exergia, se demonstrou efetiva em ambos os graus de desagregação avaliados. É importante destacar também que o conceito de exergia é comumente utilizado em estudos termodinâmicos, porém menos utilizado em estudo de ACV, apesar de sua crescente utilização em estudos ambientais, conforme evidenciado na revisão bibliográfica desta tese. Têm-se observado o esforço em pesquisas para unificar o uso do conceito de exergia em avaliações energéticas e ambientais e, portanto, este estudo contribuiu também nesse sentido.

6 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da avaliação termodinâmica, realizada de acordo com a primeira e segunda leis da Termodinâmica é coerente com o encontrado na literatura para ciclos combinados operando a gás natural e também pertinente aos dados de potência gerada pelas centrais termelétricas estudadas disponíveis no Banco Nacional de Informações de Geração (BIG). Os resultados das análises energética e exergética também permitiram verificar que a câmara de combustão é o componente que mais penaliza as UTE do ponto de vista exergético e que a inserção da técnica de oxicombustão impõe a necessidade de alterações no ciclo. Entre as alterações necessárias estão a inserção de componentes para a separação do oxigênio do ar, purificação e compressão do CO₂ para armazenamento e a substituição das turbinas a gás por turbinas com maior relação de pressão e sistema de resfriamento adequado (visando manter a eficiência de geração de energia da UTE). Verifica-se também a necessidade da realização de um estudo mais aprofundado da interação do gás rico em CO₂, que passa a recircular no ciclo combinado, com as estruturas físicas dos componentes do ciclo.

A avaliação das UTE por meio do custo exergético e CExC demonstrou um aumento do custo e consumo de recursos de mais de 15% para as UTE com inserção da oxicombustão nas UTE, visto que não se fez alterações na UTE buscando atingir a máxima eficiência. Neste ponto verificou-se que é necessário um estudo mais aprofundado dos componentes das UTE, visando alterá-los para equipamentos que possuam as condições de projeto para que se possa capturar energia e gerar eletricidade de uma maneira limpa e eficiente. Visto que a maioria dos equipamentos da UTE está em fim de vida, este estudo provê dados importantes para o planejamento da geração de eletricidade de uma forma mais sustentável no futuro. Porém os resultados obtidos mostraram-se um indicativo de que o consumo de recursos é maior quando se insere o sistema de oxicombustão na geração de energia elétrica, devido à necessidade de separação do oxigênio do ar e posterior tratamento do dióxido de carbono para captura.

Com relação a avaliação do ciclo de vida, comparados os dados de entrada e saída do inventário das centrais termelétricas em estudo com dados disponíveis na base de dados Ecoinvent para termelétricas semelhantes com escopo geográfico brasileiro, eles se mostraram coerentes. No desenvolvimento dessa tese verificou-se que um dos desafios da pesquisa foi a obtenção dos dados de centrais termelétricas. Utilizou-se dados disponibilizado pela CETESB, por meio do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) realizado pela empresa administradora das

UTE, EMAE (2002), bem como o uso da base de dados Ecoinvent, adquirida junto com a compra da Licença do software SimaPro⁴⁶ para superar este desafio.

Por fim, pode-se concluir que a proposta conceitual apresentada foi validada como forma de avaliação ambiental do ponto de vista termodinâmico e do ciclo de vida com bases exergéticas, gerando resultados consistentes com a literatura e que podem ser usados pelos tomadores de decisão visando dar suporte aos órgãos responsáveis pela gestão energética e de recursos, para que possam permitir um desenvolvimento mais sustentável para o país.

⁴⁶ A base de dados Ecoinvent é disponibilizada sem custo para países em desenvolvimento, grupo do qual o Brasil faz parte.

6.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Estudos de avaliação exergética de sistemas de tratamento de água em termelétricas;
- Estudos de avaliação termodinâmica e de materiais para projeto de turbinas a gás natural que operem em oxidação;
- Estudos de avaliação do ciclo de vida da produção e transporte de gás natural brasileiro;
- Estudos de penalidade exergética de termelétricas a gás natural com oxidação.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: 2014a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ISO 14044**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: 2014b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ISO/TR 14049**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. Rio de Janeiro: 2014c.

AGRAWAL, K. K. *et al.* A life cycle environmental impact assessment of natural gas combined cycle thermal power plant in Andhra Pradesh, India. **Environmental Development**, Amsterdam, v. 11, p. 162–174, jul. 2014.

AKAI, M. *et al.* Life-cycle analysis of a fossil-fuel power plant with CO₂ recovery and a sequestering system. **Energy**, Oxford, v. 22, n. 2–3, p. 249–255, oct.1997.

ALLAM, R. *et al.* Demonstration of the Allam cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture. **Energy Procedia**, Lausanne, v. 114, p. 5948–5966, nov. 2016.

ALVARENGA, R. A. F. *et al.* Exergy-based accounting for land as a natural resource in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 18, n. 5, p. 939–947, mar. 2013.

ANDERI, G. *et al.* **Avaliação do ciclo de vida**: ontologia terminológica. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - Ibict, 2014.

ANDERSON, R. E. *et al.* Adapting gas turbines to zero emission oxy-fuel power plants. In: ASME TURBO EXPO, 2008, Berlin,. **Proceedings[...]**. Berlin: ASME Turbo Expo, 2008.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de informações de geração**: capacidade de geração do Brasil. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 15 out. 2017.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis. **Gás natural**. 2017. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/gas-natural>. Acesso em: 5 jul. 2017.

ASIMPTOTE. **Cycle-Tempo**. 2018. Disponível em: <http://www.asimptote.nl/software/cycle-tempo/>. Acesso em: 15 jun. 2018.

AYRES, R. U.; AYRES, L. W.; MARTINA, K. Exergy , waste accounting , and life-cycle analysis. **Energy**, Oxford, v. 23, n. 5, p. 355–363, may. 1998.

BAES, C. F. *et al.* The collection, disposal, and storage of carbon dioxide. In: BACK, W. *et al.* **Interactions of Energy and Climate**. Münster: D. Reidel Publishing Company, 1980. p. 495–520.

BAKSHI, B. R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers and Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 24, p. 1767–1773, feb. 2002.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design and optimization**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996. 542p.

BELAISSAOUI, B. *et al.* Energy efficiency of oxygen enriched air production technologies: cryogeny vs membranes. **Separation and Purification Technology**, Amsterdam, v. 125, p. 142–150, feb. 2014.

BENEDET JÚNIOR, G. **Avaliação de incertezas em inventários do ciclo de vida**. 2007. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BILGEN, S. Calculation and interpretation of the standard chemical exergies of elements using the chemical reference species. **Wuli Huaxue Xuebao/ Acta Physico - Chimica Sinica**, Beijing, v. 25, n. 8, p. 1645–1649, jun. 2009.

BOGART, S. **SankeyMATIC (BETA)**. 2020. Disponível em: <https://www.sankeymatic.com>. Acesso em: 25 jan. 2020.

BOLLAND, O.; SAETHER, S. New concepts for natural gas fired power plants which simplify the recovery of carbon dioxide. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 33, n. 5, p. 467–475, aug. 1992.

BÖSCH, M. E. *et al.* Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 12, n. 3, p. 181–190, nov. 2006.

BRANCO, D. A. C. *et al.* Emissions reduction potential from CO₂ capture: a life-cycle assessment of a Brazilian coal-fired power plant. **Energy Policy**, Kidlington, v. 61, p. 1221–1235, out. 2013.

BRANDÃO, M. *et al.* Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 18, n. 1, p. 230–240, jan. 2013.

BREEZE, P. **Electricity generation and the environment**. Chennai: Joe Hayton, 2017. 108p.

BRUNDTLAND, G. H. **Our common future**: report of the world commission on environment and development. Oxford: Oxford University Press, 1987, 300p.

BUHRE, B. J. P. *et al.* Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 31, n. 4, p. 283–307, oct. 2005.

BUI, M. *et al.* Carbon capture and storage (CCS): the way forward. **Energy & Environmental Science**, Cambridge, v. 11, p. 1062–1176, mar. 2018.

BURDYN, T.; STRUCHTRUP, H. Hybrid membrane/cryogenic separation of oxygen from air for use in the oxy-fuel process. **Energy**, Oxford, v. 35, n. 5, p. 1884–1897, mai. 2010.

CAMPOLINA, J. M. Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 735–750, mai. 2015.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. Boston: McGraw-Hill, 2002. 1018p.

CLIMENT BARBA, F. *et al.* A technical evaluation, performance analysis and risk assessment of multiple novel oxy-turbine power cycles with complete CO₂ capture. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 133, p. 971–985, oct. 2016.

COBO, M. J. *et al.* SciMAT: a new science mapping analysis software tool. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, New York, v. 63, n. 8, p. 1609–1630, aug. 2012.

COELHO JUNIOR, L. M. *et al.* Carbon footprint of the generation of bioelectricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol industry. **International Journal of Global Warming**, Geneva, v. 17, n. 3, p. 235, jan. 2019.

COMGAS - Companhia de gás de São Paulo. **Comgás: perguntas frequentes: qual a área de concessão da Comgás?** 2018. Disponível em: <http://ri.comgas.com.br/m/ptb/perguntas-frequentes>. Acesso em: 2 mar. 2018.

BRASIL, Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. **Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**. Publicada no DOU nº 1, Seção 1, p. 131-137, 2007.

CORNELISSEN, R. L. **Thermodynamics and sustainable development: the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility**. 1997. 170p. Thesis - University of Twente, Overijssel, 1997.

CORNELISSEN, R. L.; HIRS, G. G. The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 43, n. 9–12, p. 1417–1424, jun. 2002.

CORSTEN, M. *et al.* Environmental impact assessment of CCS chains - Lessons learned and limitations from LCA literature. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 13, p. 59–71, mar. 2013.

CROISSET, E., THAMBIMUTHU, K.V. NO_x and SO₂ emissions from O₂/CO₂ recycle coal combustion. **Fuel**, Amsterdam, v. 80, p. 2117–2121, nov. 2001.

CUÉLLAR-FRANCA, R. M.; AZAPAGIC, A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. **Journal of CO₂ Utilization**, Oxford, v. 9, p. 82–102, mar. 2015.

CZYPEREK, M. *et al.* Gas separation membranes for zero-emission fossil power plants: MEM-BRAIN. **Journal of membrane science**, Amsterdam, v. 359, n. 1, p. 149–159, apr. 2010.

D'ALESSANDRO, D. M.; SMIT, B.; LONG, J. R. Carbon dioxide capture: prospects for new materials. **Angewandte Chemie - International Edition**, Weinheim, v. 49, n. 35, p. 6058–6082, aug. 2010.

DAHLQUIST, A.; GENRUP, M. Optimization of an oxyfuel combined cycle regarding performance and complexity level. *In*: ASME TURBO EXPO, 2013, San Antonio. **Proceedings[...]**. San Antonio: ASME Turbo Expo, 2013

DARDE, A. *et al.* Air separation and flue gas compression and purification units for oxy-coal combustion systems. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 1, n. 1, p. 527–534, feb. 2009.

DEWULF, J. *et al.* Cumulative exergy extraction from the natural environment (CEENE): a comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 41, p. 8477–8483, dec. 2007.

DEWULF, J. *et al.* Exergy : its potential and limitations in environmental science and technology. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 42, n. 7, p. 2221–2232, feb. 2008.

DEWULF, J.; VAN LANGENHOVE, H. Assessment of the sustainability of technology by means of a thermodynamically based life cycle analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, Basel, v. 9, n. 4, p. 267–273, jul. 2002.

DILLON, D. J. *et al.* Oxy-combustion processes for CO₂ capture from advanced supercritical PF and NGCC power plant. **Greenhouse Gas Control Technologies**, Oxford, v. I, sep. 2004.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. Exergy as a driver for achieving sustainability. **International Journal of Green Energy**, New York, v. 1, n. 1, p. 37–41, feb. 2004.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Exergy: energy, environment and sustainable development**. 2.ed. Oshawa: Elsevier, 2013. 576p.

DOUGLAS, P.L.; SINGH, D.; CROISET, E.; DOUGLAS, M.A. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion. **Energy Conversion & Management**, Oxford, v. 44, p. 3073–3091, jan. 2003.

DUNSMORE, H. E. A geological perspective on global warming and the possibility of carbon dioxide removal as calcium carbonate mineral. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 33, n. 5–8, p. 565–572, may. 1992.

EC- JRC - European Commission - Joint Research Centre. **(ILCD) Handbook: general guide for life cycle assessment: detailed guidance**. Luxembourg: 2010.

ECOINVENT. **Login databases**. 2020a. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/login-databases.html>. Acesso em: 19 jan. 2020.

ECOINVENT. **Why ecoinvent**. 2020b. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/database/buy-a-licence/why-ecoinvent/why-ecoinvent.html>. Acesso em: 19 jan. 2020.

ECOINVENT. **FAQs**. 2020c. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/support/faqs/methodology-of-ecoinvent-3/what-is-a-market-and-how-is-it-created.html>. Acesso em: 19 jan. 2020.

EES - Engineering Equation Solver. **F-Chart software**. 2020a. Disponível em: <http://www.fchartsoftware.com/ees/>. Acesso em: 19 jan. 2020.

EES - Engineering Equation Solver. **Manual**. 2020b. Disponível em: http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/ees_manual.pdf. Acesso em: 19 jan. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy**. 2016a. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>. Acesso em: 05 jan 2018.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição**. 2016b. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economia-circular_Updated_08-12-15.pdf. Acesso em: 14 out 2018.

EMAE - Empresa Metropolitana de Águas e Energia. **Estudo de impacto ambiental da modernização e ampliação da UTE Piratininga, volume 1: apresentação e caracterização do empreendimento**. São Paulo: 2002

EMAE - Empresa Metropolitana de Águas e Energia. **Proposta da administração: assembleia geral extraordinária**. São Paulo: 2017.

EPE. **Matriz energética nacional 2030, MME**. 2007. Disponível em: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>. Acesso em: 29 fev. 2017.

FÉREY, G. *et al.* Why hybrid porous solids capture greenhouse gases? **Chemical Society Reviews**, London, v. 40, n. 2, p. 550–562, jan. 2011.

FINNVEDEN, G. *et al.* Recent developments in life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 91, n. 1, p. 1–21, oct. 2009.

FINNVEDEN, G.; ARUSHANYAN, Y.; BRANDÃO, M. Exergy as a measure of resource use in life cycle assessment and other sustainability assessment tools. **Resources**, Basel, v. 5, n. 3, p. 23, jun. 2016.

FINNVEDEN, G.; ÖSTLUND, P. Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications. **Energy**, Oxford, v. 22, n. 9, p. 923–931, 1997.

FORRESTER, J. W. **Principle of systems**. 2.ed. Cambridge: Wright-Allen Press, 1968. 197p.

FORRESTER, J. W. **World dynamics**. 2.ed. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971. 145p.

FRANCO, F. J. *et al.* Characteristics of cycle components for CO₂ capture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREENHOUSE GAS CONTROL TECHNOLOGIES, 8., 2006, Trondheim, **Proceedings[...]**. Trondheim: International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2006.

FRISCHKNECHT, R. *et al.* **Implementation of life cycle impact assessment methods, Ecoinvent report No. 3, v2.0**. Dübendorf: 2007.

FRISCHKNECHT, R. *et al.* Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 20, n. 7, p. 957–969, jul. 2015.

FROSCHE, R. A.; GALLOPOULOS, N. E. Strategies for manufacturing. **Scientific American**, New York, v. 189, n. 3, p. 1–7, jun. 1989.

FU, C.; GUNDERSEN, T. Using exergy analysis to reduce power consumption in air separation units for oxy-combustion processes. **Energy**, Oxford, v. 44, n. 1, p. 60–68, aug. 2012.

GASNET. **Gasodutos de transporte em operação no Brasil**. 2011. Disponível em: <https://www.gasnet.com.br/gasodutos/gasodutos.asp>. Acesso em: 15 mar. 2018.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008. 220p.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **CO₂ capture technologies**. Palo Alto: EPRI, 2012. 16p.

GOEDKOOP, M. *et al.* **Introduction to LCA with SimaPro**. 2016. Disponível em: <https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>. Acesso em: 15 jan 2018.

GOMES, A. P. P. **Gestão ambiental da água produzida na indústria de petróleo: melhores práticas e experiências internacionais**. 2014. 120p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GONG, M.; WALL, G. On exergetics, economics and optimization of technical processes to Meet environmental conditions. **Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems**, Beijing, p. 463–510, jun. 1997.

GUERRA, J. P. M. *et al.* Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 19, n. 4, p. 814–825, jan. 2014.

GUINÉE, J. *et al.* Life cycle assessment : past, present and future. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 45, n. 1, p. 90–96, jan. 2011.

HARTONO, B.; HEIDEBRECHT, P.; SUNDMACHER, K. Combined branch and bound method and exergy analysis for energy system design. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 51, n. 44, p. 14428–14437, out. 2012.

HOPPE, W.; THONEMANN, N.; BRINGEZU, S. Life cycle assessment of carbon dioxide–based production of methane and methanol and derived polymers. **Journal of Industrial Ecology**, New Jersey, v. 22, n. 2, p. 327–340, apr. 2018.

IEA - International Energy Agency. **Energy technology perspectives**. Paris: IEA Publications, 2015. 412p.

IEA - International Energy Agency. **Energy and air pollution: world energy outlook: special report**. Paris: IEA Publications, 2016. 262p.

IEA - International Energy Agency. **Key world energy statistics**. Paris: IEA Publications, 2017. 95p.

IEAGHG. **A brief history of CCS and current status**. 2013. Disponível em: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Publications/Information_Sheets_for_CCS_2.pdf. Acesso em: 18 jan 2016.

IEAGHG - IEA Greenhouse gas R&D programme. **Oxy-combustion turbine power plants 2015/05**. Cheltenham: IEAGHG, 2015. 636p.

IEMA - Instituto de energia e meio ambiente. **Uso de água em termoeletricas**. São Paulo: IEMA, 2016. 33p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special report on carbon dioxide capture and storage**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 442p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge: University Press, 2014. 16p.

JARAMILLO, P.; GRIFFIN, W. M.; MATTHEWS, H. S. Comparative life-cycle air emissions of coal, domestic natural gas, LNG, and SNG for electricity generation. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 41, n. 17, p. 6290–6296, jul. 2007.

JERICHA, H.; SANZ, W.; GÖTTLICH, E. Design concept for large output Graz cycle gas turbines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v. 130, n. 1, p. 1–10, jan. 2008.

JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; KIM, S.; OVERCASH, M. R. Methodology for developing gate-to-gate life cycle information. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg v. 5, n. 3, p. 153–159, mar. 2000.

JOHNSSON, F.; ANDERSSON, K.; MONCKERT, P.; MAIER, J.; SCHEFFNECHT, G. Combustion and flame characteristics of oxy-fuel combustion – Experimental activities within the ENCAP project. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREENHOUSE GAS CONTROL TECHNOLOGIES, 2006, Trondheim. **Proceedings[...]**. Trondheim: ICGCT, 2006.

JONES, D. *et al.* Optimal design and integration of an air separation unit (ASU) for an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant with CO₂ capture. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 92, n. 9, p. 1685–1695, sep. 2011.

JØRGENSEN, A. *et al.* Methodologies for social life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 13, n. 2, p. 96–103, jan. 2008.

KANNAN, R. *et al.* Gas fired combined cycle plant in Singapore: energy use, GWP and cost-a life cycle approach. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 46, n. 13–14, p. 2145–2157, aug. 2005.

KARIMI, F.; KHALILPOUR, R. Evolution of carbon capture and storage research: trends of international collaborations and knowledge maps. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 37, p. 362–376, jun. 2015.

KIS, Z.; PANDYA, N.; KOPPELAAR, R. H. E. M. Electricity generation technologies : comparison of materials use , energy return on investment , jobs creation and CO₂ emissions reduction. **Energy Policy**, Kidlington, v. 120, p. 144–157, may. 2018.

KLOEPFFER, W. Life cycle sustainability assessment of products. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 13, n. 2, p. 89–95, feb. 2008.

KOHL, A. L.; NIELSEN, R. B. **Gas purification**. 5.ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1997. 1414p.

KOORNNEEF, J. *et al.* Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 2, n. 4, p. 448–467, oct. 2008.

KORRE, A.; NIE, Z.; DURUCAN, S. Life cycle modelling of fossil fuel power generation with post-combustion CO₂ capture. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 289–300, mar. 2010.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. London: Anchor Brendon Ltd, 1985. 311p.

KUMAR, R. **Research methodology: a step-by-step guide for beginners**. 3.ed. London: SAGE Publications Ltd, 2011. 441p.

KVAMSDAL, H. M.; JORDAL, K.; BOLLAND, O. A quantitative comparison of gas turbine cycles with CO₂ capture. **Energy**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 10–24, jan. 2007.

LANFANG, L. *et al.* Integrating G2G , C2C and resource flow analysis into life cycle assessment framework : A case of construction steel ' s resource loop. **Resources, Conservation & Recycling**, Amsterdam, v. 102, p. 143–152, sep. 2015.

LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 39, p. 426–443, nov. 2014.

LIMA, V. **Armazenamento geológico de CO₂ em aquíferos salinos: reatividade química em selos e rochas reservatório da bacia do Paraná**. 2010. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - PUC Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LIMITED, W. P. **Oxy-fuel combustion for power generation and carbon dioxide (CO₂) capture**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. 374p.

LLOYD, S. M.; RIES, R. Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: a survey of quantitative approaches. **Journal of Industrial Ecology**, New Jersey, v. 11, n. 1, p. 161–179, out. 2007.

LOISEAU, E. *et al.* Green economy and related concepts: an overview. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 139, p. 361–371, dec. 2016.

LOMBARDI, L. Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of a semi-closed gas turbine cycle with CO₂ chemical absorption. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 42, n. 1, p. 101–114, jan. 2001.

LOMBARDI, L. Life cycle assessment comparison of technical solutions for CO₂ emissions reduction in power generation. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 44, p. 93–108, jan. 2003.

LOPES SILVA, D. A. *et al.* Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 32, p. 532–547, apr. 2014.

LOZANO, M. A.; VALERO, A. Theory of the exergetic cost. **Energy**, Oxford, v. 18, n. 9, p. 939–954, sep. 1993.

MARKEWITZ, P. *et al.* Ecological evaluation of coal-fired oxyfuel power plants -cryogenic versus membrane-based air separation. **Energy Procedia**, Oxford, v. 37, p. 2864–2876, aug. 2013.

MATHIEU, P.; NIHART, R. Sensitivity analysis of the MATIANT cycle. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 40, n. 15, p. 1687–1700, oct. 1999.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: remarking the way we make things**. New York: North Point Press, 2002. 193p.

MEADOWS, D. H. *et al.* **The limits to growth**. New York: Universe Books, 1972. 205p.

MEADOWS, D.; RANDERS, J.; MEADOWS, D. **Limits to growth: the 30-year update**. London: James & James, 2005. 338p.

MEESTER, B. DE *et al.* An improved calculation of the exergy of natural resources for exergetic life cycle assessment (ELCA). **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 40, n. 21, p. 6844–6851, sep. 2006.

MEIER, P. J. *et al.* US electric industry response to carbon constraint: a life-cycle assessment of supply side alternatives. **Energy Policy**, Kidlington, v. 33, n. 9, p. 1099–1108, jun. 2005.

- MEIRELLES, J. C. DE S. **O fortalecimento do gás natural na matriz energética paulista**. 2017. Disponível em: <http://www.aspacer.com.br/wp-content/uploads/2017/06/ABERTURA-JO%C3%83O-CARLOS-DE-S-MEIRELLES-SECRET%C3%81RIO.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019.
- MEISEN, A.; SHUAI, X. Research and development issues in CO₂ capture. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 38, n. 96, p. S37–S42, 1997.
- MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de impacto do ciclo de vida: revisão dos principais métodos. **Production**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 160–175, jan. 2016.
- MEYER, L. *et al.* Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. **Energy**, Oxford, v. 34, n. 1, p. 75–89, jan. 2009.
- MICHAELIS, P.; JACKSON, T.; CLIFT, R. Exergy analysis of the life cycle of steel. **Energy**, Oxford, v. 23, n. 3, p. 213–220, mar. 1998.
- MIYATAKE, Y. Technology development and sustainable construction. **Journal of Management in Engineering**, Reston, v. 12, n. 4, p. 23–27, jul. 1996.
- MLETZKO, J.; EHLERS, S.; KATHER, A. Comparison of natural gas combined cycle power plants with post combustion and oxyfuel technology at different CO₂ capture rates. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 86, p. 2–11, jan. 2016.
- MORRIS, D. R.; SZARGUT, J. Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet earth. **Energy**, Oxford, v. 11, n. 8, p. 733–755, aug. 1986.
- NEMITALLAH, M. A. *et al.* Oxy-fuel combustion technology: current status, applications, and trends. **International Journal of Energy Research**, New York, v. 41, p. 1670–1708, feb. 2017.
- NEMITALLAH, M. A.; HABIB, M. A.; BADR, H. M. **Oxyfuel combustion for clean energy applications**. Cham: Springer, 2019. 368p.
- NETL - National Energy Technology Laboratory. **NETL unit process library**. 2019. Disponível em: netl.doe.gov/node/2573. Acesso em: 03 mar. 2019.
- NIE, Z. G.; KORRE, A.; DURUCAN, S. Life cycle modelling and comparative assessment of the environmental impacts of oxy-fuel and post-combustion CO₂ capture, transport and injection processes. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 4, p. 2510–2517, 2011.
- ODEH, N. A.; COCKERILL, T. T. Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. **Energy Policy**, Kidlington, v. 36, n. 1, p. 367–380, jan. 2008.
- PATTERSON, M.; MCDONALD, G.; HARDY, D. Is there more in common than we think? convergence of ecological footprinting, emergy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 362, p. 19–36, oct. 2017.

PEHNT, M.; HENKEL, J. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 3, n. 1, p. 49–66, jan. 2009.

PETRESCU, L. *et al.* Life cycle assessment for supercritical pulverized coal power plants with post-combustion carbon capture and storage. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 157, p. 10–21, jul. 2017.

PIPITONE, G.; BOLLAND, O. Power generation with CO₂ capture: technology for CO₂ purification. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 3, n. 5, p. 528–534, sep. 2009.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 2.ed. Barueri: Manole, 2011. 480p.

RIEMER, P. Greenhouse gas mitigation technologies, an overview of the CO₂ capture, storage and future activities of the IEA greenhouse gas R&D programme. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 37, n. 6–8, p. 665–670, jul. 1996.

ROCCO, M. V. *et al.* Exergy life cycle assessment of soil erosion remediation technologies: an Italian case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 3007–3017, jan. 2016.

ROCCO, M. V.; COLOMBO, E.; SCIUBBA, E. Advances in exergy analysis: a novel assessment of the extended exergy accounting method. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 113, p. 1405–1420, jan. 2014.

ROCHELLE, G. Amine scrubbing for CO₂ capture. **Science**, Washington, v. 325, p. 1652–1654, sep. 2009.

ROSEN, M. A.; DINCER, I. On exergy and environmental impact. **International Journal of Energy Research**, New York, v. 21, p. 643–654, dec. 1997.

SAIC - Scientific Applications International Corporation. **Life cycle assessment: principles and practice**. Ohio: EPA/600/R-06/060, 2006. 80p.

SANZ, W. *et al.* Qualitative and quantitative comparison of two promising oxy-fuel power cycles for CO₂ capture. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v. 130, n. 3, may. 2008.

SCHREIBER, A.; MARX, J.; ZAPP, P. Environmental assessment of a membrane-based air separation for a coal-fired oxyfuel power plant. **Journal of Membrane Science**, Amsterdam, v. 440, p. 122–133, aug. 2013.

SCIUBBA, E.; WALL, G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. **International Journal of Thermodynamics**, Lincoln, v. 10, n. 1, p. 1–26, feb. 2007.

SEM-GESP. **Balanco energético do estado de São Paulo 2017 (ano base 2016)**. 2017.

Disponível em:

<http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalsev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/BalancoEnergetico.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2018.

SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Guidelines for life-cycle assessment: a “code of practice”. **Environmental Science & Pollution Research International**, Heidelberg, v. 1, p. 55, mar. 1994.

SILABAN, A.; HARRISON, D. P. High temperature capture of carbon dioxide: characteristics of the reversible reaction between CaO(s) and $\text{CO}_2\text{(g)}$. **Chemical Engineering Communications**, Oxfordshire, v. 137, n. 1, p. 177–190, mar. 1995.

SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. H.; PONGPAT, P. Sustainability assessment of sugarcane biorefinery and molasses ethanol production in Thailand using eco-efficiency indicator. **Applied Energy**, Oxford, v. 160, p. 603–609, jul. 2015.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. 207p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, D. A. L. **Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e o monitoramento ambiental de processos de manufatura: procedimento e estudos de caso**. 2016. 317p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, F. *et al.* Análise comparativa de procedimentos para a estimativa de incertezas em ACV: um estudo baseado na produção de blocos cerâmicos de alvenaria. *In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA*, 5., 2016, Fortaleza, **Anais[...]**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2016.

SIMAPRO. **LCA software for fact-based sustainability**. 2019. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 19 jan. 2020.

SINGH, B. *et al.* Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 5, n. 3, p. 457–466, may. 2011.

SINGH, B.; STROMMAN, A. H.; HERTWICH, E. G. Comparative impact assessment of CCS portfolio: life cycle perspective. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 4, p. 2486–2493, mar. 2011a.

SINGH, B.; STROMMAN, A. H.; HERTWICH, E. G. Comparative life cycle environmental assessment of CCS technologies **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, Amsterdam, v. 5, p. 911-921, jul. 2011b.

SOUNDARARAJAN, R. **Efficiency loss analysis for oxy-combustion CO_2 capture process**. 2011. 99p. Master Thesis (Master's Programme in Innovative Sustainable Energy Engineering) - Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2011.

SPATH, P. L.; MANN, M. K. **Life cycle assessment of a natural gas combined - cycle power generation system** Colorado: NREL/TP-570-27715, 2000. 32p.

STAICOVICI, M. D. Further research zero CO₂ emission power production: the “COOLENERG” process. **Energy**, Oxford, v. 27, n. 9, p. 831–844, sep. 2002.

STANEK, W. **Thermodynamics for sustainable management of natural resources**. Cham: Springer International Publishing, 2017. 511p.

STANGER, R. *et al.* Oxyfuel combustion for CO₂ capture in power plants. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 40, p. 55–125, sep. 2015.

STEENEVELDT, R.; BERGER, B.; TORP, T. A. CO₂ capture and storage: closing the knowing-doing gap. **Chemical Engineering Research and Design**, London, v. 84, n. 9 A, p. 739–763, sep. 2006.

STRAZZA, C.; DEL BORGHI, A.; GALLO, M. Development of specific rules for the application of life cycle assessment to carbon capture and storage. **Energies**, Basel, v. 6, n. 3, p. 1250–1265, mar. 2013.

SUI, X. *et al.* Exergetic life cycle assessment of cement production process with waste heat power generation. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 88, p. 684–692, dec. 2014.

SUMIDA, K. *et al.* Carbon dioxide capture in metal-organic frameworks. **Chemical Reviews**, Washington, v. 112, n. 2, p. 724–781, jan. 2012.

SWARR, T. E. *et al.* Environmental life-cycle costing: a code of practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 16, p. 389–391, apr. 2011.

SZARGUT, J. Analysis of cumulative exergy consumption. **International Journal of Energy Research**, New York, v. 11, n. 4, p. 541–547, oct. 1987.

SZARGUT, J. **Exergy method: technical and ecological applications**. Southampton: WIT Press, 2005. 164p.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R. Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes. **International Journal of Energy Research**, New York, v. 11, n. 2, p. 245–261, apr. 1987.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes**. New York: Hemisphere, 1988. 332p.

TANG, Y. T. *et al.* Energy analysis and environmental impacts of a MSW oxy-fuel incineration power plant in China. **Energy Policy**, Kidlington, v. 60, p. 132–141, sep. 2013.

TASCA, J. E. *et al.* An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs. **Journal of European Industrial Training**, Bingley, v. 34, n. 7, p. 631–655, aug. 2010.

THORBERGSSON, E. *et al.* A comparative analysis of two competing mid-size oxy-fuel combustion cycles. In: ASME TURBO EXPO, 2012, Copenhagen. **Proceedings[...]**. Copenhagen: ASME Turbo Expo, 2012.

TROY, S.; SCHREIBER, A.; ZAPP, P. Life cycle assessment of membrane-based carbon capture and storage. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Heidelberg, v. 18, n. 6, p. 1641–1654, may. 2016.

TZANIDAKIS, K. *et al.* Illustrative national scale scenarios of environmental and human health impacts of carbon capture and storage. **Environment International**, Oxford, v. 56, p. 48–64, 2013.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Life cycle management: a business guide to sustainability**. Paris: UNEP, 2007. 51p.

UNEP. **Resource efficiency: potential and economic implications. a report of the international resource panel**. Paris: UNESCO, 2017. 330p.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOSviewer : a computer program for bibliometric mapping. **Erim Report Series Research in Management**, Rotterdam, p. 886–897, feb. 2009.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, Heidelberg, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VARAGANI, R.K.; CHATEL-PELAGE, F.; GAUTIER, F.; PRANDA, P.; MCDONALD, D.; DEVALT, D.; SCHOFF, R.L.; CIFERNO, J.; BOSE, A.C. Oxy-combustion process for CO₂ capture from coal fired power plants: an overview of techno-economic study and engineering feasibility analysis. *In*: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREENHOUSE GAS CONTROL TECHNOLOGIES, 2006, Trondheim. **Proceedings[...]**. Trondheim: ICGGCT, 2006.

Verein Deutscher Ingenieure. **VDI 4600: cumulative energy demand (KEA): terms, definitions, methods of calculation**. Düsseldorf: 2012.

VICTORIA, A. H. R. **Metodologia de análise e avaliação exergoambiental de plantas termoeletricas operando em combustão combinada carvão - biomassa**. 2012. 177p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

VIEBAHN, P. *et al.* Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 1, n. 1, p. 121–133, apr. 2007.

WAKU, H. *et al.* Life cycle analysis of fossil power plant with CO₂ recovery and sequestering system. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 36, n. 6–9, p. 877–880, jun. 1995.

WALL, G. **Exergy: a useful concept within resource accounting**. Göteborg: Chalmers University of Technology and University of Göteborg, 1977. n. 77-42, 58p.

WALL, G.; GONG, M. On exergy and sustainable development—Part 1: conditions and concepts. **Exergy, an International Journal**, Oxford, v. 1, n. 3, p. 128–145, mar. 2001.

WEISSER, D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. **Energy**, Oxford, v. 32, n. 9, p. 1543–1559, sep. 2007.

WILBERFORCE, T. *et al.* Outlook of carbon capture technology and challenges. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 657, p. 56–72, mar. 2019.

XU, G. *et al.* An improved CO₂ separation and purification system based on cryogenic separation and distillation theory. **Energies**, Basel, v. 7, n. 5, p. 3484–3502, may. 2014.

YANG, H. J. *et al.* Evaluation of design performance of the semi-closed oxy-fuel combustion combined cycle. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v. 134, n. 11, p. 1–10, sep. 2012.

YANTOVSKI, E. I. Stack downward: zero emission fuel-fired power plants concept. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 37, n. 6–8, p. 867–877, jun. 1996.

YAWS, C. L. **The Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds**. New York: 2003. 776p.

YUJIA, W.; ZHAOFENG, X.; ZHENG, L. Lifecycle analysis of coal-fired power plants with CCS in China. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 63, p. 7444–7451, jun. 2014.

ZIĘBIK, A.; GLADYSZ, P. Analysis of the cumulative exergy consumption of an integrated oxy-fuel combustion power plant. **Archives of Thermodynamics**, Warsaw, v. 34, n. 3, p. 105–122, sep. 2013.

APÊNDICE A – ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

Os fluxos não materiais dos pontos estudados, são apresentados na Tabela 23, na qual são mostradas as potências geradas em cada turbina a gás e turbina a vapor das UTE. A exergia destruída nos principais componentes de cada ciclo são apresentadas na Tabela 24.

Tabela 23 - Exergia dos fluxos não materiais (potência)

Ponto (i)	Descrição	Ex _i (MW)	
		NGCC	OCC
44	Trabalho de eixo líquido da TG	402,72	334,42
46	Trabalho líquido da TG	382,59	318,65
48 / 50	Trabalho de eixo líquido da TV	193,88	193,88
52	Trabalho líquido da TV	184,18	184,18

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 24 - Exergia dos fluxos não materiais (exergia destruída)

Ponto (i)	Equipamento	Ex _i (MW)	
		NGCC	OCC
56 / 57 / 58 / 59	Bombas	0,46	0,51
51	Gerador da TV	9,69	9,69
54	Desaerador	17,48	17,49
45	Gerador da TG	20,14	16,77
55	Condensador	5,97	5,97
40	Compressor da TG	53,06	184,92
47 / 49	Turbina a vapor	26,38	26,38
53	Caldeira de Recuperação	70,71	126,31
42	Turbina a gás	33,35	22,45
41	Câmara de combustão	591,39	569,50

Nota: TG (Turbina a gás), TV (Turbina a vapor)

Fonte: Produção do próprio autor

APÊNDICE B – CEXC E CUSTO EXERGÉTICO UNITÁRIO

Para as UTE sem captura de CO₂, a Matriz estrutural, de acordo com o nível de desagregação ilustrado nas Figura 30 e Figura 31, é determinada por meio da aplicação do volume de controle em cada equipamento gerando as equações apresentadas nos Quadro 11 e Quadro 12, de acordo com a proposição 1 de Lozano e Valero (1993). Como a matriz estrutural $[m \times n]$ ou $[\text{subsistemas} \times \text{fluxos}]$ ou $[\text{equações} \times \text{incógnitas}]$ começa a ser gerada por meio da proposição 1 (P1), o sistema de equações inicialmente é representado de acordo com as Equações (24) (NGCC) e (25) (OCC).

$$A[23 \times 63] \times B^*[23 \times 1] = 0 \quad (18)$$

$$A[27 \times 85] \times B^*[27 \times 1] = 0 \quad (19)$$

São necessárias ainda 40 (NGCC) e 58 (OCC) equações para determinar os custos exergéticos dos fluxos. Em forma matricial, isso corresponde a declarar elementos de uma nova matriz α (matriz produtiva) e um vetor coluna ω , de dimensão $[40 \times 1]$ e $[58 \times 1]$, informando ao sistema as equações auxiliares necessárias.

$$\alpha[40 \times 63] \times B^*[40 \times 1] = \omega[40 \times 1] \quad (20)$$

$$\alpha[58 \times 85] \times B^*[58 \times 1] = \omega[58 \times 1] \quad (21)$$

$$A[63 \times 63] \times B^*[63 \times 1] = Y^*[63 \times 1] \quad (22)$$

$$A[85 \times 85] \times B^*[85 \times 1] = Y^*[85 \times 1] \quad (23)$$

$$A[63 \times 63] = [A[23 \times 63]/\alpha[40 \times 63]]^t \quad (24)$$

$$A[85 \times 85] = [A[27 \times 85]/\alpha[58 \times 85]]^t \quad (25)$$

$$Y^*[63 \times 1] = [-Y^*[23 \times 1]\omega[40 \times 1]]^t \quad (26)$$

$$Y^*[85 \times 1] = [-Y^*[27 \times 1]\omega[58 \times 1]]^t \quad (27)$$

A partir das equações geradas por meio da proposição 1 (P1), determinou-se o restante das equações por meio das proposições 2, 3, 4a e 4b, que são apresentadas também nos Quadro 11 e Quadro 12. Para isso necessitou-se classificar os fluxos exergéticos como insumo (F), produto (P) ou perdas (L). Os fluxos exergéticos e sua classificação em cada equipamento são apresentados nos Quadro 13 e Quadro 14.

Quadro 11 - Equações que constituem a matriz estrutural (NGCC)

(continua)

Equações	Equipamento	Número	Proposição
$B^*_{11} + B^*_{43} - B^*_{44} - B^*_2 - B^*_{40} = 0$	CP AR	1	1
$B^*_3 + B^*_2 - B^*_4 - B^*_{41} = 0$	CC	2	1
$B^*_4 - B^*_5 - B^*_{43} - B^*_{42} = 0$	TG	3	1
$B^*_{44} - B^*_{46} - B^*_{45} = 0$	GTG	4	1
$B^*_5 + B^*_{100} - B^*_{13} - B^*_{72} = 0$	HP-SH 2	5	1
$B^*_6 + B^*_{71} - B^*_{11} - B^*_{72} = 0$	RH	6	1
$B^*_{103} + B^*_{72} - B^*_{100} - B^*_{73} = 0$	HP-SH 1	7	1
$B^*_{104} + B^*_{73} - B^*_{103} - B^*_{74} = 0$	HP-EVAP	8	1
$B^*_{108} + B^*_{74} - B^*_{104} - B^*_{75} = 0$	HP-ECO 2	9	1
$B^*_{109} + B^*_{75} - B^*_{76} - B^*_{12} = 0$	IP-SH	10	1
$B^*_{110} + B^*_{76} - B^*_{109} - B^*_{77} = 0$	IP-EVAP	11	1
$B^*_7 + B^*_{77} - B^*_{108} - B^*_{78} = 0$	HP-ECO 1	12	1
$B^*_8 + B^*_{78} - B^*_{110} - B^*_{79} = 0$	IP-ECO	13	1
$B^*_9 + B^*_{79} - B^*_{14} - B^*_{10} = 0$	PH	14	1
$B^*_{28} - B^*_{29} - B^*_{47} - B^*_{48} = 0$	TV HP	15	1
$B^*_{25} - B^*_{26} - B^*_{27} - B^*_{49} - B^*_{50} = 0$	TV IP	16	1
$B^*_{48} + B^*_{50} - B^*_{51} - B^*_{52} - B^*_{56} - B^*_{57} - B^*_{58} - B^*_{59} = 0$	GTV	17	1
$B^*_{27} + B^*_{23} - B^*_{21} - B^*_{24} - B^*_{55} = 0$	COND	18	1
$B^*_{16} + B^*_{26} + B^*_{19} - B^*_{54} = 0$	DES	19	1
$B^*_{17} + B^*_{57} - B^*_7 = 0$	B 1	20	1
$B^*_{18} + B^*_{58} - B^*_8 = 0$	B 2	21	1
$B^*_{21} + B^*_{59} - B^*_{22} = 0$	B 3	22	1
$B^*_{15} + B^*_{56} - B^*_{16} = 0$	B 4	23	1
$B^*_{11} = B_1$	AR no CP	24	2
$B^*_3 = B_3$	GN na CC	25	2
$B^*_{40} = 0$	Perdas CP	26	3
$B^*_{41} = 0$	Perdas CC	27	3
$B^*_{42} = 0$	Perdas TG	28	3
$B^*_{45} = 0$	Perdas GTG	29	3
$B^*_{47} = 0$	Perdas TV HP	30	3
$B^*_{49} = 0$	Perdas TV IP	31	3
$B^*_{51} = 0$	Perdas GTV	32	3
$B^*_{55} = 0$	Perdas COND	33	3
$B^*_{54} = 0$	Perdas DES	34	3
$k_{10} = 0$	CR	35	3
$B^*_5 - \frac{B^*_{71}}{B^*_{72}} B^*_{71} = 0$	HP-SH2	36	4a
$B^*_{71} - \frac{B^*_{72}}{B^*_{73}} B^*_{72} = 0$	RH	37	4a
$B^*_{72} - \frac{B^*_{73}}{B^*_{74}} B^*_{73} = 0$	HP-SH 1	38	4a

Quadro 11 - Equações que constituem a matriz estrutural (NGCC)

(continuação)

Equações	Equipamento	Número	Proposição
$B^*_{73} - \frac{B_{73}}{B_{74}} B^*_{74} = 0$	HP-EVAP	39	4a
$B^*_{74} - \frac{B_{74}}{B_{75}} B^*_{75} = 0$	HP-ECO 2	40	4a
$B^*_{75} - \frac{B_{75}}{B_{76}} B^*_{76} = 0$	IP-SH	41	4a
$B^*_{76} - \frac{B_{76}}{B_{77}} B^*_{77} = 0$	IP-EVAP	42	4a
$B^*_{77} - \frac{B_{77}}{B_{78}} B^*_{78} = 0$	HP-ECO 1	43	4a
$B^*_{78} - \frac{B_{78}}{B_{79}} B^*_{79} = 0$	IP-ECO	44	4a
$B^*_{13} - \frac{B_{13}}{B_{28}} B^*_{28} = 0$	MF 28	45	4a
$B^*_{12} - \frac{B_{12}}{B_6} B^*_6 = 0$	MF 29	46	4a
$B^*_{11} - \frac{B_{11}}{B_{25}} B^*_{25} = 0$	MF 25	47	4a
$B^*_{22} - \frac{B_{22}}{B_9} B^*_9 = 0$	MF 22	48	4a
$B^*_{20} - \frac{B_{20}}{B_{17}} B^*_{17} = 0$	MF 20	49	4a
$B^*_{20} - \frac{B_{20}}{B_{18}} B^*_{18} = 0$	MF 20	50	4a
$B^*_{19} - \frac{B_{19}}{B_{20}} B^*_{20} = 0$	MF 19	51	4a
$B^*_{14} - \frac{B_{14}}{B_{15}} B^*_{15} = 0$	MF 15	52	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{57}} B^*_{57} = 0$	B 1	53	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{58}} B^*_{58} = 0$	B 2	54	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{59}} B^*_{59} = 0$	B 3	55	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{56}} B^*_{56} = 0$	B 4	56	4a
$B^*_{27} - \frac{B_{27}}{B_{21}} B^*_{21} = 0$	COND	57	4a

Quadro 11 - Equações que constituem a matriz estrutural (NGCC)

(conclusão)

Equações	Equipamento	Número	Proposição
$B^*_{23} - \frac{B_{23}}{B_{24}} B^*_{24} = 0$	COND	58	4a
$B^*_4 - \frac{B_4}{B_5} B^*_5 = 0$	TG	59	4a
$B^*_{29} - \frac{B_{29}}{B_{28}} B^*_{28} = 0$	TV-HP	60	4a
$B^*_{25} - \frac{B_{25}}{B_{27}} B^*_{27} = 0$	TV-IP	61	4a
$B^*_{44} - \frac{B_{44}}{B_{43}} B^*_{43} = 0$	TG	62	4b
$B^*_{26} - \frac{B_{26}}{B_{27}} B^*_{27} = 0$	TV-IP	63	4b

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 12 - Equações que constituem a matriz estrutural (OCC)

(continua)

Equações	Equipamento	Número	Proposição
$B^*_1 + B^*_{43} - B^*_{44} - B^*_2 - B^*_{40} = 0$	CP CO ₂	1	1
$B^*_3 + B^*_{30} + B^*_{33} - B^*_{31} - B^*_{41} = 0$	CC	2	1
$B^*_4 - B^*_5 - B^*_{43} - B^*_{42} = 0$	TG	3	1
$B^*_{44} - B^*_{46} - B^*_{45} - B^*_{61} - B^*_{62} - B^*_{67} = 0$	GTG	4	1
$B^*_5 + B^*_{100} - B^*_{13} - B^*_{72} = 0$	HP-SH2	5	1
$B^*_6 + B^*_{71} - B^*_{11} - B^*_{72} = 0$	RH	6	1
$B^*_{103} + B^*_{72} - B^*_{100} - B^*_{73} = 0$	HP-SH 1	7	1
$B^*_{104} + B^*_{73} - B^*_{103} - B^*_{74} = 0$	HP-EVAP	8	1
$B^*_{108} + B^*_{74} - B^*_{104} - B^*_{75} = 0$	HP-ECO ₂	9	1
$B^*_{109} + B^*_{75} - B^*_{76} - B^*_{12} = 0$	IP-SH	10	1
$B^*_{110} + B^*_{76} - B^*_{109} - B^*_{77} = 0$	IP-EVAP	11	1
$B^*_7 + B^*_{77} - B^*_{108} - B^*_{78} = 0$	HP-ECO 1	12	1
$B^*_8 + B^*_{78} - B^*_{110} - B^*_{79} = 0$	IP-ECO	13	1
$B^*_9 + B^*_{79} - B^*_{14} - B^*_{10} = 0$	PH	14	1
$B^*_{28} - B^*_{29} - B^*_{47} - B^*_{48} = 0$	TV HP	15	1
$B^*_{25} - B^*_{26} - B^*_{27} - B^*_{49} - B^*_{50} = 0$	TV IP	16	1
$B^*_{48} + B^*_{50} - B^*_{51} - B^*_{52} - B^*_{56} - B^*_{57} - B^*_{58} - B^*_{59} = 0$	GTV	17	1
$B^*_{27} + B^*_{23} - B^*_{21} - B^*_{24} - B^*_{55} = 0$	COND	18	1
$B^*_{16} + B^*_{26} + B^*_{19} - B^*_{54} = 0$	DES	19	1
$B^*_{17} + B^*_{57} - B^*_7 = 0$	B 1	20	1
$B^*_{18} + B^*_{58} - B^*_8 = 0$	B 2	21	1

Quadro 12 - Equações que constituem a matriz estrutural (OCC)

(continuação)

Equações	Equipamento	Número	Proposição
$B_{21}^* + B_{59}^* - B_{22}^* = 0$	B 3	22	1
$B_{15}^* + B_{56}^* - B_{16}^* = 0$	B 4	23	1
$B_{63}^* + B_{61}^* - B_{64}^* - B_{65}^* - B_{66}^* = 0$	ASU	24	1
$B_{64}^* + B_{67}^* - B_{68}^* - B_{33}^* = 0$	COMP O ₂	25	1
$B_{36}^* + B_{62}^* - B_{69}^* - B_{70}^* - B_{80}^* = 0$	CPU	26	1
$B_{34}^* + B_{38}^* - B_{35}^* - B_{37}^* - B_{39}^* - B_{60}^* = 0$	COND CO ₂	27	1
$B_3^* = B_3$	GN na CC	28	2
$B_{63}^* = B_{63}$	Ar na ASU	29	2
$B_{40}^* = 0$	Perdas CP	30	3
$B_{41}^* = 0$	Perdas CC	31	3
$B_{42}^* = 0$	Perdas TG	32	3
$B_{45}^* = 0$	Perdas GTG	33	3
$B_{47}^* = 0$	Perdas TV HP	34	3
$B_{49}^* = 0$	Perdas TV IP	35	3
$B_{51}^* = 0$	Perdas GTV	36	3
$B_{55}^* = 0$	Perdas COND	37	3
$B_{54}^* = 0$	Perdas DES	38	3
$B_{60}^* = 0$	COND CO ₂	39	3
$B_{37}^* = 0$	COND CO ₂	40	3
$B_{66}^* = 0$	Perdas ASU	41	3
$B_{68}^* = 0$	Perdas CP O ₂	42	3
$B_{80}^* = 0$	Perdas CPU	43	3
$B_{65}^* = 0$	N ₂ do ar	44	3
$B_{70}^* = 0$	Purificação CO ₂	45	3
$B_5^* - \frac{B_5}{B_{71}} B_{71}^* = 0$	HP-SH 2	46	4a
$B_{71}^* - \frac{B_{71}}{B_{72}} B_{72}^* = 0$	RH	47	4a
$B_{72}^* - \frac{B_{72}}{B_{73}} B_{73}^* = 0$	HP-SH 1	48	4a
$B_{73}^* - \frac{B_{73}}{B_{74}} B_{74}^* = 0$	HP-EVAP	49	4a
$B_{74}^* - \frac{B_{74}}{B_{75}} B_{75}^* = 0$	HP-ECO 2	50	4a
$B_{75}^* - \frac{B_{75}}{B_{76}} B_{76}^* = 0$	IP-SH	51	4a
$B_{76}^* - \frac{B_{76}}{B_{77}} B_{77}^* = 0$	IP-EVAP	52	4a
$B_{77}^* - \frac{B_{77}}{B_{78}} B_{78}^* = 0$	HP-ECO 1	53	4a

Quadro 12 - Equações que constituem a matriz estrutural (OCC)

(continuação)

Equações	Equipamento	Número	Proposição
$B^*_{78} - \frac{B_{78}}{B_{79}} B^*_{79} = 0$	IP-ECO	54	4a
$B^*_{79} - \frac{B_{79}}{B_{10}} B^*_{10} = 0$	PH	55	4a
$B^*_{13} - \frac{B_{13}}{B_{28}} B^*_{28} = 0$	MF 28	56	4a
$B^*_{12} - \frac{B_{12}}{B_6} B^*_6 = 0$	MF 29	57	4a
$B^*_{11} - \frac{B_{11}}{B_{25}} B^*_{25} = 0$	MF 25	58	4a
$B^*_{22} - \frac{B_{22}}{B_9} B^*_9 = 0$	MF 22	59	4a
$B^*_{20} - \frac{B_{20}}{B_{17}} B^*_{17} = 0$	MF 20	60	4a
$B^*_{20} - \frac{B_{20}}{B_{18}} B^*_{18} = 0$	MF 20	61	4a
$B^*_{19} - \frac{B_{19}}{B_{20}} B^*_{20} = 0$	MF 19	62	4a
$B^*_{14} - \frac{B_{14}}{B_{15}} B^*_{15} = 0$	MF 15	63	4a
$B^*_{10} - \frac{B_{10}}{B_{34}} B^*_{34} = 0$	MF 10	64	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{57}} B^*_{57} = 0$	B 1	65	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{58}} B^*_{58} = 0$	B 2	66	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{59}} B^*_{59} = 0$	B 3	67	4a
$B^*_{52} - \frac{B_{52}}{B_{56}} B^*_{56} = 0$	B 4	68	4a
$B^*_{27} - \frac{B_{27}}{B_{21}} B^*_{21} = 0$	COND	69	4a
$B^*_{23} - \frac{B_{23}}{B_{24}} B^*_{24} = 0$	COND	70	4a
$B^*_{35} - \frac{B_{35}}{B_1} B^*_1 = 0$	MF 1	71	4a
$B^*_{35} - \frac{B_{35}}{B_{36}} B^*_{36} = 0$	MF 1	72	4a
$B^*_2 - \frac{B_2}{B_{30}} B^*_{30} = 0$	MF 21	73	4a

Quadro 12 - Equações que constituem a matriz estrutural (OCC)

(conclusão)

Equações	Equipamento	Número	Proposição
$B^*_{22} - \frac{B_{22}}{B_{32}} B^*_{32} = 0$	MF 21	74	4a
$B^*_4 - \frac{B_4}{(B_{31} + B_{32})} (B^*_{31} + B^*_{32}) = 0$	MF 16	75	4a
$B^*_{34} - \frac{B_{34}}{B_{35}} B^*_{35} = 0$	COND CO ₂	76	4a
$B^*_{38} - \frac{B_{38}}{B_{39}} B^*_{39} = 0$	COND CO ₂	77	4a
$B^*_{27} - \frac{B_{27}}{B_{25}} B^*_{25} = 0$	TV-IP	78	4a
$B^*_4 - \frac{B_4}{B_5} B^*_5 = 0$	TG	79	4a
$B^*_{46} - \frac{B_{46}}{B_{61}} B^*_{61} = 0$	ASU	80	4a
$B^*_{46} - \frac{B_{46}}{B_{67}} B^*_{67} = 0$	COMP O ₂	81	4a
$B^*_{46} - \frac{B_{46}}{B_{62}} B^*_{62} = 0$	CPU	82	4a
$B^*_{44} - \frac{B_{44}}{B_{43}} B^*_{43} = 0$	TG	83	4b
$B^*_{29} - \frac{B_{29}}{B_{28}} B^*_{28} = 0$	TV-HP	84	4b
$B^*_{26} - \frac{B_{26}}{B_{27}} B^*_{27} = 0$	TV-IP	85	4b

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 13 - Fluxos exergeticos classificados como Insumo, Produto ou Perdas (NGCC)

Componentes	Sub sistema	Insumos (F)	Produtos (P)	Perdas (L)
Compressor de ar	1	$B^*_{1}, (B^*_{43} - B^*_{44})$	B^*_2	B^*_{40}
Câmara de combustão	2	B^*_3, B^*_2	B^*_4	B^*_{41}
Turbina a gás	3	B^*_4	B^*_5, B^*_{44}	B^*_{42}
Gerador da TG	4	B^*_{44}	B^*_{46}	B^*_{45}
HP-SH2	5	B^*_5, B^*_{100}	B^*_{13}, B^*_{71}	-
RH	6	B^*_6, B^*_{71}	B^*_{11}, B^*_{72}	-
HP-SH1	7	B^*_{72}, B^*_{103}	B^*_{73}, B^*_{100}	-
HP-EVAP	8	B^*_{73}, B^*_{104}	B^*_{74}, B^*_{103}	-
HP-ECO2	9	B^*_{74}, B^*_{108}	B^*_{75}, B^*_{104}	-
IP-SH	10	B^*_{75}, B^*_{109}	B^*_{12}, B^*_{76}	-
IP-EVAP	11	B^*_{76}, B^*_{110}	B^*_{77}, B^*_{109}	-
HP-ECO1	12	B^*_7, B^*_{77}	B^*_{78}, B^*_{108}	-
IP-ECO	13	B^*_8, B^*_{78}	B^*_{79}, B^*_{110}	-
PH	14	B^*_9, B^*_{79}	B^*_{10}, B^*_{14}	-
Turbina a vapor HP	15	B^*_{28}	B^*_{29}, B^*_{48}	B^*_{47}
Turbina a vapor IP	16	B^*_{25}	$B^*_{26}, B^*_{27}, B^*_{50}$	B^*_{49}
Gerador da TV	17	B^*_{50}	$B^*_{52}, B^*_{56}, B^*_{57}, B^*_{58}, B^*_{59}$	B^*_{51}
Condensador	18	B^*_{23}, B^*_{27}	B^*_{21}, B^*_{24}	B^*_{55}
Desaerador	19	B^*_{16}, B^*_{26}	B^*_{19}	B^*_{54}
Bomba 1	20	B^*_{17}	$(B^*_7 - B^*_{57})$	-
Bomba 2	21	B^*_{18}	$(B^*_8 - B^*_{58})$	-
Bomba 3	22	B^*_{21}	$(B^*_{22} - B^*_{59})$	-
Bomba 4	23	B^*_{15}	$(B^*_{16} - B^*_{56})$	-

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 14 - Fluxos exergeticos classificados como Insumo, Produto ou Perdas (OCC)

Componentes	Sub sistema	Insumos (F)	Produtos (P)	Perdas (L)
Compressor de CO ₂	1	$B^*_{1}, (B^*_{43} - B^*_{44})$	B^*_2	B^*_{40}
Câmara de combustão	2	$B^*_3, B^*_{30}, B^*_{33}$	B^*_{31}	B^*_{41}
Turbina a gás	3	B^*_4	B^*_5, B^*_{44}	B^*_{42}
Gerador da TG	4	B^*_{44}	B^*_{46}	B^*_{45}
HP-SH2	5	B^*_5, B^*_{100}	B^*_{13}, B^*_{71}	-
RH	6	B^*_6, B^*_{71}	B^*_{11}, B^*_{72}	-
HP-SH1	7	B^*_{72}, B^*_{103}	B^*_{73}, B^*_{100}	-
HP-EVAP	8	B^*_{73}, B^*_{104}	B^*_{74}, B^*_{103}	-
HP-ECO2	9	B^*_{74}, B^*_{108}	B^*_{75}, B^*_{104}	-
IP-SH	10	B^*_{75}, B^*_{109}	B^*_{12}, B^*_{76}	-
IP-EVAP	11	B^*_{76}, B^*_{110}	B^*_{77}, B^*_{109}	-
HP-ECO1	12	B^*_7, B^*_{77}	B^*_{78}, B^*_{108}	-
IP-ECO	13	B^*_8, B^*_{78}	B^*_{79}, B^*_{110}	-
PH	14	B^*_9, B^*_{79}	B^*_{10}, B^*_{14}	-
Turbina a vapor HP	15	B^*_{28}	B^*_{29}, B^*_{48}	B^*_{47}
Turbina a vapor IP	16	B^*_{25}	$B^*_{26}, B^*_{27}, B^*_{50}$	B^*_{49}
Gerador da TV	17	B^*_{50}	$B^*_{52}, B^*_{56}, B^*_{57}, B^*_{58}, B^*_{59}$	B^*_{51}
Condensador	18	B^*_{23}, B^*_{27}	B^*_{21}, B^*_{24}	B^*_{55}
Desaerador	19	B^*_{16}, B^*_{26}	B^*_{19}	B^*_{54}
Bomba 1	20	B^*_{17}	$(B^*_7 - B^*_{57})$	-
Bomba 2	21	B^*_{18}	$(B^*_8 - B^*_{58})$	-
Bomba 3	22	B^*_{21}	$(B^*_{22} - B^*_{59})$	-
Bomba 4	23	B^*_{15}	$(B^*_{16} - B^*_{56})$	-
ASU	24	B^*_{61}, B^*_{63}	B^*_{64}, B^*_{65}	B^*_{66}
COMP O ₂	25	B^*_{64}, B^*_{67}	B^*_{33}	B^*_{68}
CPU	26	B^*_{36}, B^*_{62}	B^*_{69}, B^*_{70}	B^*_{80}
COND CO ₂	27	B^*_{34}, B^*_{38}	$B^*_{35}, B^*_{37}, B^*_{39}$	B^*_{60}

Fonte: Produção do próprio autor