

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta será disponibilizado somente a partir de 24/09/2021.

TATIANE TOBIAS DA CRUZ

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

Tatiane Tobias da Cruz

**Avaliação exergetica 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

Cruz, Tatiane Tobias da
C957a 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. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. IVONETE ÁVILA
Orientadora / UNESP/FEG



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



p/ **Prof. Dr. 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 oxicombustão 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 oxicombustão.....	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 exerгético)

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: Oxicombustão.....	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 exergética.....	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).

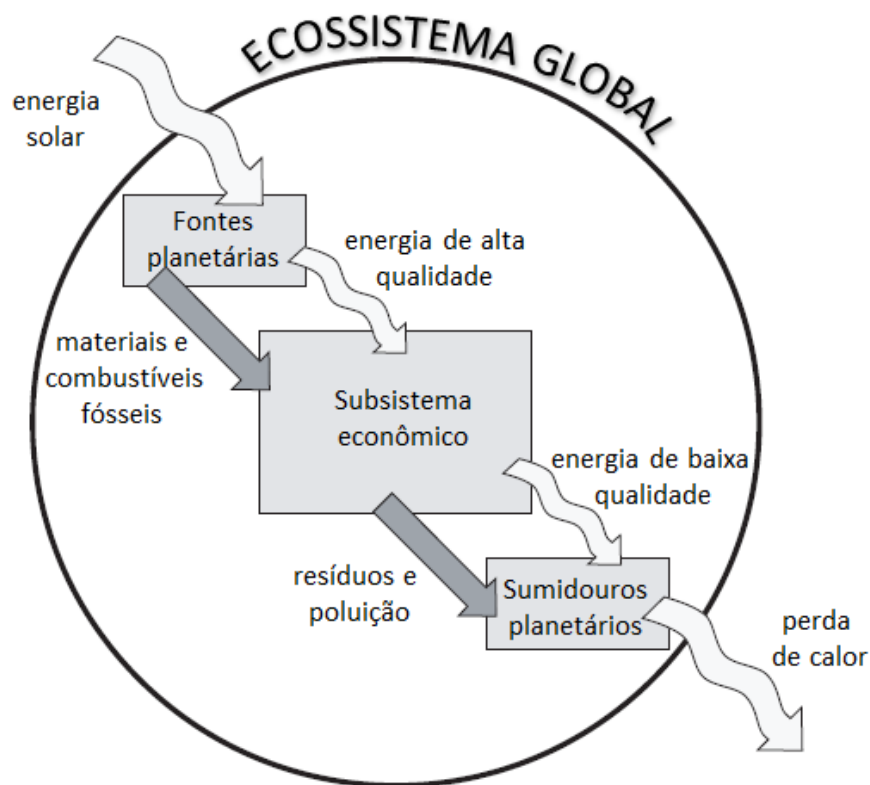
³ Também denominada ecosfera, é o conjunto dos ecossistemas da terra, também denominado ecossistema global.

⁴ Proposição do ecossistema industrial funcionar analogamente aos ecossistemas biológicos, visando o desenvolvimento econômico sem afetar o meio ambiente (FROSCHE; 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, mestrados 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>	<i>OR</i>	<i>“life cycle analysis”</i>	<i>OR</i>	<i>lca</i>
		<i>AND</i>			
exergia	<i>exerg*</i>				
		<i>AND</i>			
captura de carbono	<i>“carbon capture”</i>	<i>OR</i>	<i>“co2 capture”</i>	<i>OR</i>	<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 diminuiu 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 exérgica	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 exérgica 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 exérgica	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, Ziebik (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 (<i>TEC_{LCA}</i>).	Usina a carvão com captura de CO ₂ por oxicombustão.	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 <i>GWP₁₀₀</i> .	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 <i>et al.</i> (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 (ANDERI *et al.*, 2014).

Quadro 2 - Aspectos metodológicos e principais resultados dos artigos selecionados

(conclusão)

Autor / Revista	Aspectos metodológicos e principais resultados			Principais resultados
	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 oxidação.

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 oxidcombustão 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 contribuiriam 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).

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 oxicombustão;
- 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 oxicombustão.

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.; CROISSET, 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.

FROSC, 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 termelétricas**. 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.

JOHANSSON, 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 CO₂(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 CO₂ 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.

STAIKOVICI, 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.