

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

# A Sustentabilidade sob a Perspectiva da Termodinâmica

Bruno Picciarelli e Sousa

SÃO CARLOS  
2023

# A Sustentabilidade sob a perspectiva da Termodinâmica

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

SÃO CARLOS - SP

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**BANCA EXAMINADORA**

Trabalho de Graduação apresentado no dia 28 de agosto de 2023 perante a seguinte banca  
examinadora:

Orientador: Gustavo Dias Maia, DEQ/ UFSCar

Convidado: Felipe Fernando Furlan, DEQ/ UFSCar

Professor da Disciplina: Ernesto Antonio Urquieta Gonzalez, DEQ/ UFSCar

## **DEDICATÓRIA**

Dedico o presente trabalho aos meus familiares,  
que foram minha maior fortaleza e inspiração  
durante todos os momentos da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus e à minha família, que fizeram tudo o que podiam para me apoiar e guiar em minha trajetória de vida. Assim como sou grato aos meus amigos que me acompanharam durante minha formação, tornando todas as adversidades obstáculos mais fáceis de vencer.

Agradeço imensamente ao professor, orientador e, principalmente, amigo Gustavo Maia por todo o conhecimento, parceria e suporte prestado a mim tanto no âmbito acadêmico como pessoal. E ainda deixo registrado meu agradecimento a todos que prestaram auxílio nos momentos de dificuldade.

Aos professores Ernesto Urquieta e ao Felipe Furlan por aceitarem avaliar minha defesa e participar dessa etapa final da minha formação.

## RESUMO

A sustentabilidade é um conceito cada vez mais relevante na atualidade, buscando promover o desenvolvimento econômico, social e ambiental de forma equilibrada. No contexto dos processos químicos industriais, a sustentabilidade desempenha um papel fundamental, visto que esses processos muitas vezes apresentam impactos significativos no meio ambiente, no consumo de recursos naturais e na geração de resíduos. Dentro desse contexto, a Termodinâmica apresenta um conjunto de ferramentas que nos permite prever a quantidade de energia a ser recuperada e, conseqüentemente, o impacto das propostas de alteração na matriz energética dos processos industriais e seu reflexo na sustentabilidade desses processos. Assim sendo, o presente trabalho de conclusão de curso fornece um panorama sobre as aplicações mais atuais do balanço exergético em processos industriais e fornecer caminhos para o cálculo da sustentabilidade de processos através das pesquisas mais recentes nesse assunto. Foram 4 métodos apresentados: CExC (Consumo Cumulativo de Exergia), TEC (Custo Termoecológico), EEC (Método Estendido Cumulativo de Exergia) e o ExF (Trilha Exergética). Além disso, outro objetivo consistiu na descrição das metodologias disponíveis para o cálculo de sustentabilidade de processos utilizando ferramentas termodinâmicas, analisando suas semelhanças e diferenças. Dois processos foram analisados e discutidos, a análise exergética da combustão de uma caldeira e o Custo Termo-Ecológico (TEC) da produção de ferro-gusa em alto-forno. Foi identificada a impossibilidade de quantificar ou medir a sustentabilidade em si através de métodos termodinâmicos, uma vez que não existe um valor atribuível a ela. Nesse contexto, ganham relevância as metodologias propostas para avaliar a sustentabilidade, que se fundamentam na análise exergética, associada a indicadores ambientais e econômicos. Assim, surge uma abordagem inovadora com potencial significativo para ser adotada na avaliação dos processos industriais sob a perspectiva energética.

Palavras chave: exergia, sustentabilidade, análise exergética, termodinâmica, eficiência, indicadores ambientais.

## ABSTRACT

Sustainability is an increasingly relevant concept in contemporary times, aiming to promote balanced economic, social, and environmental development. In the context of industrial chemical processes, sustainability plays a crucial role, given that these processes often have significant impacts on the environment, natural resource consumption, and waste generation. Within this context, Thermodynamics offers a set of tools that allow us to predict the amount of recoverable energy and, consequently, the impact of proposed changes to the energy matrix of industrial processes and their reflection on the sustainability of these processes. Four methods were presented: CExC (Cumulative Exergy Consumption), TEC (Thermoecological Cost), EEC (Extended Exergy Consumption), and ExF (Exergy Footprint). Therefore, this thesis provides an overview of the most current applications of exergy analysis in industrial processes and offers pathways for calculating process sustainability through the latest research in this field. Additionally, another objective was to describe the available methodologies for calculating process sustainability using thermodynamic tools, analyzing their similarities and differences. Two processes were analyzed and discussed, the exergy analysis of the combustion on a boiler and the Thermo Ecological Cost (TEC) of the production of pig iron in a blast furnace. It was recognized that sustainability itself cannot be quantified or measured through thermodynamic methods, as there is no assignable value to it. Within this context, the proposed methodologies for evaluating sustainability gain prominence, grounded in exergy analysis, linked to environmental and economic indicators. Thus, an innovative approach emerges with significant potential to be adopted in assessing industrial processes from an energy perspective.

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1.	DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA .....	2
2.2.	EXERGIA .....	2
2.3.	TIPOS DE EXERGIA.....	3
2.4.	BALANÇO DE EXERGIA.....	8
2.5.	ANÁLISE EXERGÉTICA DE PROCESSOS .....	9
2.6.	ANÁLISE EXERGÉTICA DE FONTES RENOVÁVEIS .....	12
2.7.	APLICAÇÕES DA EXERGIA NA INDÚSTRIA.....	19
2.8.	SUSTENTABILIDADE TERMODINÂMICA .....	25
3.	MÉTODOS DE ANÁLISE EXERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE.....	30
3.1.	O CONSUMO CUMULATIVO DE EXERGIA (CEXC).....	30
3.2.	ANÁLISE DO CUSTO TERMOECOLÓGICO (TEC).....	32
3.3.	CONSUMO CUMULATIVO DE EXERGIA ESTENDIDO .....	37
3.4.	A TRILHA EXERGÉTICA .....	41
4.	ANÁLISE EXERGÉTICA E DE SUSTENTABILIDADE.....	43
4.1.	ANÁLISE EXERGÉTICA PARA UMA CALDEIRA.....	43
4.2.	ANÁLISE DE CUSTO TERMOECOLÓGICO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS .....	59
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b>	Componentes da exergia e nomenclaturas	28
<b>Figura 2.2.</b>	Energia líquida convertida por sistemas de energia renovável e não renovável em função do tempo desde o início da construção da usina.	32
<b>Figura 2.3.</b>	Energia líquida produzida por sistemas de energia renovável e não renovável em função do tempo desde o início da construção da usina.	32
<b>Figura 2.4.</b>	Energia produzida por energia investida para diferentes fontes energéticas.	33
<b>Figura 2.5.</b>	Fluxo de entrada e saída de energia para diferentes fontes energéticas.	34
<b>Figura 2.6.</b>	Diagrama de processo com combustor e trocador de calor.	35
<b>Figura 2.7.</b>	Diagrama de fluxo de exergia no combustor.	36
<b>Figura 2.8.</b>	Diagrama de fluxo de exergia no trocador de calor.	36
<b>Figura 2.9.</b>	Exergia percentual global do processo.	37
<b>Figura 3.1.</b>	Volume de controle do método de consumo cumulativo de exergia.	48
<b>Figura 3.2.</b>	Balanco de Custo Termoeológico.	52
<b>Figura 3.3.</b>	Volume de controle do TEC (Análise de Custo Termoeológico).	54
<b>Figura 3.4.</b>	Fluxograma do método estendido cumulativo de exergia.	56
<b>Figura 3.5.</b>	Volume de controle do EEC.	58
<b>Figura 3.6.</b>	Abordagem produtiva do EEC.	59
<b>Figura 4.1.</b>	Esquema de uma caldeira a vapor utilizada como exemplo para o cálculo de eficiência exergética.	62
<b>Figura 4.2.</b>	Esquema da planta de alto-forno.	78
<b>Figura 4.3.</b>	Características energéticas do processo para o alto-forno.	79
<b>Figura 4.4.</b>	Balanco exergético da planta de alto-forno.	81
<b>Figura 4.5.</b>	Influência do PCI e temperatura nas perdas exergéticas no alto-forno	82
<b>Figura 4.6.</b>	Custos termoeológicos para a produção de ferro-gusa.	83

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b>	Coeficientes empíricos para combustíveis	29
<b>Tabela 2.2.</b>	Eficiências de plantas com fontes renováveis e não-renováveis.	32
<b>Tabela 4.1.</b>	Dados operacionais da caldeira.	60
<b>Tabela 4.2.</b>	Dados de entrada e calculados para a caldeira.	62
<b>Tabela 4.3.</b>	Quantidade específica de elementos particulares em combustíveis.	64
<b>Tabela 4.4.</b>	Balances de massa para a caldeira.	65
<b>Tabela 4.5.</b>	Cálculos provenientes dos balances de massa aplicados ao processo analisado.	66
<b>Tabela 4.6.</b>	Entalpia física e entropia dos gases de combustão.	67
<b>Tabela 4.7.</b>	Entalpia e Entropia dos gases de combustão.	67
<b>Tabela 4.8.</b>	Equações das perdas energéticas devido às entalpias física e química dos gases de combustão e dos produtos sólidos.	68
<b>Tabela 4.9.</b>	Valores percentuais das perdas devido entalpias (entropia gerada percentualmente).	68
<b>Tabela 4.10.</b>	Dados de vazão mássica da caldeira.	<b>69</b>
<b>Tabela 4.11.</b>	Exergias químicas dos combustíveis.	<b>71</b>
<b>Tabela 4.12.</b>	Exergias químicas e físicas dos gases de combustão, cinzas de topo e de fundo.	<b>72</b>
<b>Tabela 4.13.</b>	Resultados relativos de exergia.	<b>73</b>
<b>Tabela 4.14.</b>	Resultados das análises energética e exérgica para a caldeira.	<b>75</b>

## NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidade	Seção
$\alpha$	Coefficiente econométrico derivado do orçamento exergético global do país	-	[3]
$\alpha$	Coefficiente de contração das cinzas	-	[4]
$A_C$	Área da seção transversal	m <sup>2</sup>	[2]
$a_{ij}$	Coefficiente de consumo do i-ésimo produto por unidade do j-ésimo produto principal	-	[3]
$a_{rj}$	Coefficiente de consumo do r-ésimo produto semi-acabado importado por unidade do j-ésimo produto principal	-	[3]
$B$	Exergia associada ao sistema	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$\dot{B}$	Exergia em forma de taxa	$\frac{kJ}{s}$	[2]
$B$	Exergia global associada a um sistema	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$b$	Exergia específica	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$\beta$	Coefficiente econométrico derivado do orçamento exergético global do país	-	[3]
$B_{ch}$	Exergia química	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$b_{ch,1}$	Exergia química do carvão	$\frac{kJ}{kg}$	[4]
$b_{ch,2}$	Exergia química do carvão residual	$\frac{kJ}{kg}$	[4]
$b_{ch,3}$	Exergia química da biomassa	$\frac{kJ}{kg}$	[4]
$B_{ec}$	Exergia cinética	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$B_{ep}$	Exergia potencial	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$B_f$	Exergia física	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$B_F$	Exergia de entrada do processo	kW	[4]
$B_{nu}$	Exergia nuclear	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$B_P$	Exergia contida nos produtos	kW	[4]
$b_{sj}$	Exergia do s-ésimo recurso natural não renovável imediatamente consumido no processo em consideração por unidade do j-ésimo produto	$\frac{J}{kg}$ ou $\frac{J}{mol}$	[3]

$c_1$	Fração mássica de carbono C para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$c_2$	Fração mássica de carbono C para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$c_3$	Fração mássica de carbono C para biomassa	kg/kg de combustível	[4]
[CO]	Fração molar de CO	mol/mol ss	[4]
[CO <sub>2</sub> ]	Fração molar de CO <sub>2</sub> nos gases de combustão	mol/mol ss	[4]
$c_{pd}$	Fração mássica de carbono na cinza de fundo	-	[4]
$c_{pl}$	Fração mássica de carbono na cinza de topo	-	[4]
$c_{st}$	Capacidade calorífica específica	kJ/(kgK)	[4]
$\delta$	Diferencial de massa		[2]
$\delta B_D$	Perdas internas de exergia na caldeira	kW	[4]
$\delta B_L$	Perdas externas de exergia na caldeira	kW	[4]
DCP	Produto cumulativo bruto do setor doméstico	$\frac{\$}{kg}$	[3]
$\sigma_k$	Índice monetário de nocividade do k-ésimo resíduo	$\frac{\$}{kg}$	[3]
$\dot{E}$	Taxa de Exergia	$\frac{J}{s}$	[3]
$\xi$	Grau de insustentabilidade	-	[3]
$\dot{E}E$	Taxa de exergia estendida	$\frac{J}{s}$	[3]
$\xi_k$	Consumo cumulativo de exergia de fontes não-renováveis devido a emissão do k-ésimo resíduo	$\frac{J}{kg}$ ou $\frac{J}{mol}$	[3]
$\dot{E}_{total,NR}$	consumo anual de exergia não-renovável das fontes de uma região específica	$\frac{J}{kg}$ ou $\frac{J}{mol}$	[3]
$f_{ij}$	coeficiente de co-produção do i-ésimo produto por unidade do j-ésimo produto principal	-	[3]
$g$	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>	[2]
$\Delta G_f$	Energia livre de Gibbs padrão de formação de um composto	$\frac{kJ}{mol}$	[2]
$g_{pd}$	Quantidade específica de cinzas de fundo	$\frac{kg}{kg \text{ carvão}}$	[4]
$g_{pl}$	Quantidade específica de cinzas de topo	$\frac{kg}{kg \text{ carvão}}$	[4]
$h_1$	Fração mássica de hidrogênio H para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$h_2$	Fração mássica de hidrogênio H para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$h_3$	Fração mássica de hidrogênio H para biomassa	kg/kg de combustível	[4]
$I$	Irreversibilidade de processo	$\frac{kJ}{kg}$	[2]

$m_{F,1}$	Vazão mássica do carvão	$\frac{kg}{s}$	[4]
$m_{F,2}$	Vazão mássica do carvão residual	$\frac{kg}{s}$	[4]
$m_{F,3}$	Vazão mássica da biomassa	$\frac{kg}{s}$	[4]
$(Mh)_{ss}$	Entalpia física dos gases de combustão	$\frac{kJ}{kmol\ s.s.}$	[4]
$M_{nu}$	Massa molar do nuclídeo	$\frac{kg}{mol}$	[2]
$m_p$	Vazão mássica de vapor	kg/s	[4]
$(Ms)_{ss}$	Entropia dos gases de combustão	$\frac{kJ}{kmol\ s.s.}$	[4]
$n$	Número de mols		[2]
$n_1$	Fração mássica de nitrogênio N para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$n_2$	Fração mássica de nitrogênio N para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$[N_2]$	Fração molar de Nitrogênio em gases de combustão	mol/mol ss	[4]
$n_3$	Fração mássica de nitrogênio N para biomassa	kg/kg de combustível	[4]
$N_A$	Número de Avogadro	$\frac{átomos}{mol}$	[2]
$\Phi$	Exergia calculada para sistemas fechados	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$o_1$	Fração mássica de oxigênio O para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$o_2$	Fração mássica de oxigênio O para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$[O_2]$	Fração molar de Oxigênio nos gases de combustão	mol/mol ss	[4]
$o_3$	Fração mássica de oxigênio O para biomassa	kg/kg de combustível	[4]
$P$	Pressão do sistema	Pa	[2]
$p_1$	Fração mássica de cinzas para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$p_2$	Fração mássica de cinzas para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$p_3$	Fração mássica de cinzas para biomassa	kg/kg de combustível	[4]
$\rho_j, \rho_i$	custo termoecológico específico do j-ésimo produto e i-ésimo processo	$\frac{J}{kg}$ ou $\frac{J}{mol}$	[3]
$P_k$	emissão anual do k-ésimo efluente rejeitado no ambiente	kg ou kmol	[3]
$P_{kj}$	quantidade do k-ésimo componente agressivo rejeitado no ambiente natural por unidade do j-ésimo produto		[3]

$P_{ot}$	Pressão ambiente	Mpa	[4]
$P_p$	Pressão do vapor	MPa	[4]
$\rho_r$	custo termoecológico específico o produto r semi-acabado	$\frac{J}{kg}$ ou $\frac{J}{mol}$	[3]
$P_{sp}$	Pressão dos gases de exaustão	Mpa	[4]
$P_{wz}$	Pressão da água de alimentação	MPa	[4]
Q	Calor transferido	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
S	Entropia ou Perdas de Exergia	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$s_1$	Fração mássica de enxofre S para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$s_2$	Fração mássica de enxofre S para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$s_3$	Fração mássica de enxofre S para biomassa	kg/kg de combustível	[4]
$S_{f,pd}$	Entropia física da cinza de fundo	kJ/(kgK)	[4]
$S_{f,pl}$	Entropia física da cinza de topo	kJ/(kgK)	[4]
$S_{st,ch}$	Perda devido à entalpia química dos produtos sólidos da combustão	%	[4]
$S_{st,f}$	Perda devido à entalpia física dos produtos sólidos da combustão	%	[4]
$S_{wch}$	Perda devido à entalpia química dos gases de combustão	%	[4]
$S_{wfl}$	Perda devido à entalpia física dos gases de combustão	%	[4]
T	Temperatura	K	[2]
$T_{ot}$	Temperatura ambiente	°C	[4]
$T_p$	Temperatura do vapor	°C	[4]
$T_{sp}$	Temperatura dos gases de exaustão	°C	[4]
$T_{wz}$	Temperatura da água de alimentação	°C	[4]
u	Energia Interna	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$\varphi_{ot}$	Umidade relativa ambiente	%	[4]
V	Volume	m <sup>3</sup>	[2]
v	Velocidade de escoamento	m/s	[2]
$V_n$	Velocidade local normal	m/s	[2]
$w_1$	Fração mássica de umidade H <sub>2</sub> O para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$w_2$	Fração mássica de umidade H <sub>2</sub> O para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$w_3$	Fração mássica de umidade H <sub>2</sub> O para biomassa	kg/kg de	[4]

		combustível	
$W_d$	Poder calorífico inferior. LHV (Lower Heating Value)	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$W_{d1}$	Valor de (LHV) para o carvão	kg/kg de combustível	[4]
$W_{d2}$	Valor de (LHV) para o carvão residual	kg/kg de combustível	[4]
$W_{d3}$	Valor de aquecimento inferior (LHV) para biomassa	kg/kg de combustível	[4]
$W_g$	Poder calorífico superior. HHV (Higher Heating Value)	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$W_{rev}$	Trabalho reversível	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$W_u$	Trabalho útil	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$x_{ch,i}$	Exergia química específica do i-ésimo componente	$\frac{kJ}{kmol}$	[2]
$X_{pl}$	Proporção de cinza de topo	kg pl/kg pd	[4]
$X_{z,a}$	Grau molar de umidade do ar de combustão	$\frac{kmol H_2O}{kmol s. s.}$	[4]
$X_{z,s}$	Grau de umidade em gases de combustão	$\frac{kmol H_2O}{kmol s. s.}$	[4]
$\psi$	Exergia específica por unidade de massa	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$\Psi$	Exergia calculada para sistemas com escoamento	$\frac{kJ}{kg}$	[2]
$z_i$	Fração molar do i-ésimo componente em um estado específico	-	[2]
$z_{i,ot}$	Fração molar do i-ésimo componente no ambiente	-	[2]

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

De acordo com Sciubba (2021), depois de anos de extenso debate, as considerações ambientais foram aceitas como uma parte essencial e necessária da avaliação dos sistemas de conversão de energia. Segundo o autor, vários paradigmas estavam em vigor para identificar e quantificar o “impacto ambiental antropogênico”, e as principais agências ambientais e governamentais abandonaram o "controle do nível de emissão" dos anos 80 para proceder uma análise abrangente e detalhada das implicações locais e globais das interações dos processos antrópicos com a biosfera (tanto local quanto globalmente). De fato, a grande maioria das regulamentações atuais vai muito além da simples "avaliação de danos ecológicos" (entendida simplesmente como “poluição”).

Os quantificadores dessas interações, conhecidos como Indicadores Ambientais (IA), foram e ainda estão sendo propostos e aplicados a diferentes sistemas em diversos cenários e com diferentes limites, para fornecer uma base de apoio à decisão suficientemente precisa e confiável para os tomadores de decisão. Uma definição de IA confiável e robusta invariavelmente apresenta alguns problemas, como, por exemplo, o fato de os IAs mais populares serem baseados em um número restrito de parâmetros de controle (qualidade do ar, saúde pública, igualdade social etc.) e oferecem apenas uma medida incompleta do impacto ambiental real.

Além disso, a maioria dos indicadores de "sustentabilidade" adotados atualmente em biociências e engenharia de processos não se baseia em princípios termodinâmicos rigorosos e, muitas vezes, exige decisões "ponderadas" arbitrárias por parte do analista, o que pode gerar confusão entre os usuários finais. Do ponto de vista da Termodinâmica, fica imediatamente claro que, se o problema for abordado a partir de princípios fundamentais, será necessária uma redefinição termodinâmica do próprio conceito de sustentabilidade. De fato, a Segunda Lei nega a possibilidade de qualquer sistema aberto e em evolução se manter em um estado "sustentável" sem se valer de um suprimento contínuo de insumos de baixa entropia (Sciubba, 2021).

Nesse sentido, a Termodinâmica apresenta um conjunto de ferramentas que nos permite estabelecer conexões entre as suas leis e o moderno conceito de sustentabilidade, sobretudo no contexto dos processos industriais. Assim sendo, o objetivo do presente trabalho de conclusão de curso é fornecer um panorama descritivo simplificado de algumas das mais recentes abordagens que nos permitem estabelecer estas conexões.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA

O contínuo desenvolvimento da humanidade em um mundo onde enormes quantidades de energia são convertidas ou processadas como energia térmica (calor), eletricidade, combustíveis, energia química, energia mecânica (trabalho), bioenergia e várias outras formas, resultaram inevitavelmente em efeitos colaterais severos, como o aumento da poluição e as mudanças climáticas. Isso impõe avaliações de qualidade e definições para atividades humanas que incluem o uso de energia que vão além da análise de eficiência energética com base na Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica (Zevenhoven, 2021).

Neste sentido, o conceito de disponibilidade energética, representado do ponto de vista termodinâmico como a propriedade exergia, passa a representar uma ferramenta importante na criação de relações que permitam descrever e quantificar processos energéticos de uma maneira mais abrangente do que a limitada análise de eficiência.

O termo *disponibilidade* foi popularizado nos Estados Unidos pela Escola de Engenharia do Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT) nos anos 1940. Hoje, a palavra *exergia*, introduzida na Europa nos anos 1950, encontrou aceitação global – em parte por ser um nome mais curto e rimar com energia e entropia (Çengel e Boles, 2013).

### 2.2. EXERGIA

Segundo Bakshi et al. (2011), cada processo de transformação é realizado por meio de um arranjo de dispositivos, sistemas de processamento de materiais e sistemas de conversão de energia interagindo entre si, com recursos e com o ambiente natural. A seleção, avaliação e adoção de um arranjo específico envolve a resolução e reconciliação de muitas questões científicas, técnicas, econômicas, ambientais, sociais e de segurança complexas e conflitantes. Uma discussão completa dessas questões é de importância decisiva, mas o autor sugere que alguns questionamentos relacionados à termodinâmica são particularmente relevantes:

- 1) Quais são os estados reais de entrada, saída e fim da tarefa e das fontes de energia usadas em um determinado arranjo?
- 2) Quais são as interações ótimas exigidas pelos estados especificados de entrada, saída e fim da tarefa?

- 3) Quais são as interações ótimas que poderiam ser fornecidas pelas fontes de energia empregadas se essas fontes fossem usadas da melhor maneira fisicamente possível?
- 4) Se as respostas às perguntas 2 e 3 forem diferentes, quais aspectos do arranjo são as causas da diferença?
- 5) O que pode ser feito para mudar a diferença entre as respostas às questões 2 e 3?
- 6) Qual é a medida universal de tal diferença que caracteriza a eficiência com que a tarefa é realizada por um determinado arranjo?

O conceito de ótimo utilizado neste contexto é delimitado apenas pelas leis da física, não por restrições impostas por considerações econômicas, sociais e ambientais ou pela tecnologia atual. Como tal, pode muito bem ser secundário a todas as outras preocupações. No entanto, ele fornece um limite que não pode ser excedido em nenhuma circunstância. Portanto, estabelecer o máximo aproveitamento energético em uma transformação constitui uma tarefa primordial em se tratando de análises que tenham como foco a avaliação da sustentabilidade.

Nesse sentido, Çengel & Boles (2013) descrevem a importância em se estabelecer uma maneira de quantificar o potencial de trabalho em uma transformação. Os autores concluem que um sistema fornece o máximo de trabalho possível ao passar por um processo reversível do estado inicial especificado para o estado do seu ambiente, conhecido como estado morto. Isso representa o potencial de trabalho útil do sistema em um dado estado, sendo chamado de exergia. Os autores também destacam a importância na percepção de que a exergia não representa a quantidade de trabalho que um dispositivo efetivamente produz, mas sim um limite superior da quantidade de trabalho que pode ser produzida por este dispositivo ou processo sem violar nenhuma das leis da Termodinâmica.

Sempre haverá uma diferença entre a exergia e o trabalho que realmente será produzido por um dispositivo ou processo. Essa diferença representa o espaço que os engenheiros têm para introduzir melhorias e aperfeiçoamentos e, portanto, constitui foco da análise para a convergência de metodologias que possam relacionar essas mudanças com a melhoria das condições de sustentabilidade dos processos.

## 2.3. TIPOS DE EXERGIA

### 2.3.1 Exergia mecânica (cinética e potencial)

Por se tratar de uma energia mecânica, a energia cinética pode ser convertida totalmente em trabalho, ou seja, a exergia é idêntica à determinação desse tipo de energia.

$$B_{ec} = ec = \frac{V^2}{2} \text{ (kJ/kg)} \quad (2.1)$$

Onde “V” é a velocidade do sistema em relação ao ambiente.

De forma semelhante, a exergia da energia potencial é igual à própria:

$$B_{ep} = ep = gz \text{ (kJ/kg)} \quad (2.2)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $z$  a altura do sistema em relação a um referencial.

Apesar das energias cinéticas e potenciais estarem 100% disponíveis para conversão de trabalho, a energia interna ( $u$ ) e entalpia ( $h$ ) não se apresentam mesma disponibilidade.

Outros importantes conceitos são os de trabalho reversível e irreversibilidade de um processo. O trabalho reversível é quantidade máxima de trabalho útil que pode ser produzida (ou trabalho mínimo fornecido) à medida que um sistema passa por um processo entre estados inicial e final especificados. Quando o estado final é o estado morto, o trabalho reversível é igual à exergia. Em processos que consomem trabalho, o  $W_{rev}$  é a quantidade mínima de trabalho necessária ao processo.

Já a irreversibilidade é definida a partir da diferença entre o trabalho útil e o trabalho reversível. Esta propriedade é categorizada como potencial de trabalho desperdiçado, representa a energia que poderia ter sido convertida em trabalho, mas não foi. Possui uma relação indiretamente proporcional com o trabalho produzido, quanto menor a irreversibilidade, maior o trabalho produzido/consumido. Logo, para otimizar o desempenho de um sistema ou processo, é preciso diminuir as irreversibilidades associadas.

$$I = W_{rev,sai} - W_{u,sai} \text{ ou } I = W_{u,entra} - W_{rev,sai} \quad (2.3)$$

### 2.3.2 Exergia em trânsito

A exergia pode ser transferida de um sistema para outro através de 3 grandezas: Calor, Trabalho e Fluxo de Massa. A primeira situação apresentada por Çengel & Boles (2013) determina que a exergia é uma grandeza que tem fluxo conforme a transferência de calor

(Equação 2.4). Calor é uma forma desorganizada de energia, por isso, apenas parte dele é convertida em trabalho (energia organizada). Quando a temperatura de um sistema está acima da temperatura ambiente, produz-se trabalho por meio do calor, transferindo-o para uma máquina térmica que rejeita calor para o ambiente. Logo, a transferência de calor é sempre acompanhada pela transferência de exergia.

$$B_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (2.4)$$

Quando  $T > T_0$ , tanto transferência de calor quanto a de exergia estão nas mesmas direções, já as direções da exergia e do calor, quando  $T < T_0$ , são opostas. Isto é, a energia do meio frio aumenta por causa da transferência de calor, mas a exergia diminui.

Por outro lado, a transferência de exergia por trabalho é igual ao próprio trabalho  $W$ . No caso em que há trabalho de fronteira, como não pode ser transferido, deve ser, portanto, subtraído da equação. Isso se deve ao fato de que o trabalho realizado nas fronteiras de um sistema não está disponível para nenhuma utilização, sendo desconsiderado da avaliação de trabalho útil.

$$B_{trabalho} = \begin{cases} W - W_{viz} & (\text{com trabalho de fronteira}) \\ W & (\text{sem trabalho de fronteira}) \end{cases} \quad (2.5)$$

No caso da transferência de massa, exergia está associada à massa de um sistema, assim como entropia e energia. Dessa maneira,  $\psi$  é a exergia específica de um componente de um sistema, que segue a equação 2.6 para determinar a exergia de um fluxo mássico.

$$B_{massa} = m\psi \quad (2.6)$$

Quando a massa de um sistema aumenta, a exergia aumenta e, vice-versa. A variação da massa de um sistema acontece ao longo do tempo e pela área de escoamento, sendo expressa conforme a equação 2.7:

$$\dot{B}_{massa} = \int_{A_e} \psi \rho V_n dA_c \quad e \quad B_{massa} = \int \psi \delta m = \int_{\Delta t} \dot{B}_{massa} dt \quad (2.7)$$

Em sistemas adiabáticos, a exergia é nula, bem como para sistemas fechados, ou seja, que não possuem fluxo mássico. A transferência total de exergia é zero para sistemas

isolados, quando não envolvem calor, trabalho ou fluxo de massa.

### 2.3.3. Exergia de sistemas fechados

A exergia de um sistema fechado é calculada na ausência de reações, apenas as energias sensível e latente são significativas para a energia interna de um sistema fechado (deixando de lado as energias química e nuclear). A expressão matemática que define a exergia ( $\Phi$ ) de um sistema fechado ( $\Phi$ ), em relação à unidade básica de massa (kg) é:

$$\begin{aligned} \Phi = (u - u_0) + P_0(V - V_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz = (e_1 - e_0) + \\ + P_0(V_1 - V_0) - T_0(s_1 - s_0) \end{aligned} \quad (2.8)$$

O balanço exerético é, portanto, calculado a partir da diferença entre as exergias do estado 1 e do estado 2:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (u_2 - u_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + \\ + g(z_2 - z_1) = (e_2 - e_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(s_2 - s_1) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Observe que a exergia é uma propriedade, e que o valor de uma propriedade não varia, a menos que o estado mude. Por exemplo, a variação de exergia dos dispositivos com escoamento em regime permanente tais como bocais, compressores, turbinas, bombas e trocadores de calor em determinado ambiente, é zero durante operação estável (Çengel & Boles, 2013).

### 2.3.4 Exergia de sistemas abertos

O trabalho de fluxo é essencialmente o trabalho de fronteira realizado por uma porção de fluido no fluido à jusante, portanto, a exergia associada ao trabalho de fluxo é equivalente ao da associada ao trabalho de fronteira. Uma vez que o trabalho de fluxo é  $PV$  e o trabalho realizado contra o ar atmosférico é  $P_0V$ , a exergia associada ao escoamento é expressa por:

$$B_{fluxo} = PV - P_0V = (P - P_0)V \quad (2.10)$$

Diante disso, determina-se que a exergia de um fluido escoando é somar à expressão para uma massa fixa, a parcela exergética do fluxo de fluido, ou seja:

$$\begin{aligned}
 B_{\text{fluido escoando}} &= B_{\text{fluido sem escoamento}} + B_{\text{fluxo}} \\
 &= (u - u_0) + P_0(V - V_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz + (P - P_0)V \\
 &= (u + PV) - (u_0 + P_0V_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \\
 &= (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

A exergia de escoamento é dada, finalmente por:

$$\Psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \tag{2.12}$$

Já o balanço exergético, por sua vez, não atinge o “estado morto”, portanto é calculado para 2 estados diferentes:

$$\Delta\Psi = \Psi_2 - \Psi_1 = (h_2 - h_1) + T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \tag{2.13}$$

### 2.3.5 Exergia Química

A exergia química padrão de qualquer composto químico, por sua vez, pode ser calculada por meio do balanço de exergia para a reação de formação desse composto. A exergia química reativa é calculada nesse caso por meio da equação 2.14:

$$B_{ch} = \Delta G_f + \sum_i n_i x_{ch,i} \tag{2.14}$$

### 2.3.6 Exergia Nuclear

A exergia nuclear da fissão precisa ser reduzida pela energia de fissão associada aos

neutrinos. Além disso, pode-se supor que a mudança na entropia devido à temperatura elevada e a mudança na concentração dos produtos da fissão nuclear em relação ao ambiente podem ser ambas negligenciadas. A exergia do nuclídeo por unidade de massa do nuclídeo pode ser calculada a partir da equação 2.15.

$$B_{nu} = \frac{N_A}{M_{nu}} X_{fis} \quad (2.15)$$

Onde  $N_A$  é o número de Avogadro,  $M_{nu}$  é a massa molar do nuclídeo físsil em kg/mol e  $X_{fis}$  é a exergia nuclear de uma fissão simples em MJ/fissão.

#### 2.4. BALANÇO DE EXERGIA

Entendendo que a natureza da exergia e da entropia são opostas, já que a exergia só pode ser destruída e não gerada (Çengel & Boles), o princípio da diminuição da exergia é representado por:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Entrada} \\ \text{total de} \\ \text{exergia} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Saída} \\ \text{total de} \\ \text{exergia} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Destruição} \\ \text{total de} \\ \text{exergia} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Variação total} \\ \text{da exergia do} \\ \text{sistema} \end{array} \right)$$

$$B_{ent} - B_{sai} - B_{destruída} = \Delta B_{sistema} \quad (2.16)$$

O balanço de exergia é definido pelo enunciado: a variação da exergia de um sistema durante um processo é igual à diferença entre a transferência líquida de exergia através das fronteiras do sistema e a exergia destruída dentro das fronteiras do sistema como resultado de irreversibilidades, Çengel & Boles (2013). A forma geral de qualquer (transferência de calor, trabalho ou fluxo de massa) balanço de exergia de um sistema, em forma de taxa, é:

$$\dot{B}_{ent} - \dot{B}_{sai} - \dot{B}_{destruída} = dB_{sistema}/dt \quad (2.17)$$

Ao considerar um sistema fechado, temos as seguintes expressões, uma com medidas fixas e outra com a equação sobre o tempo:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - [W - P_0(V_2 - V_1)] - T_0 \dot{S}_{ger} = B_2 - B_1 \quad (2.18)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{sistema}}{dt}\right) - T_0 \dot{S}_{ger} = \frac{dB_{sistema}}{dt} \quad (2.19)$$

Onde as grandezas com “k” se referem a quantidade de locais de medição de temperatura e quantidades de calor trocado. Ao dividir a equação pelo intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) tendendo a zero, obtém-se a forma de taxa do balanço

Para sistemas com escoamento em regime permanente, por sua vez, a expressão fica conforme a equação 2.20:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{ent} \dot{m}\psi - \sum_{sai} \dot{m}\psi - \dot{X}_{destruída} = 0 \quad (2.20)$$

A expressão de exergia destruída é  $T_0 \dot{S}_{ger}$ . Já o balanço exergético para sistemas abertos, seguindo a definição da seção 2.2.3., não atinge o “estado morto”, portanto é calculado levando em consideração 2 estados diferentes, com apenas 1 corrente de entrada e 1 de saída:

$$\Delta\Psi = \Psi_2 - \Psi_1 = (h_2 - h_1) + T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (2.21)$$

## 2.5. ANÁLISE EXERGÉTICA DE PROCESSOS

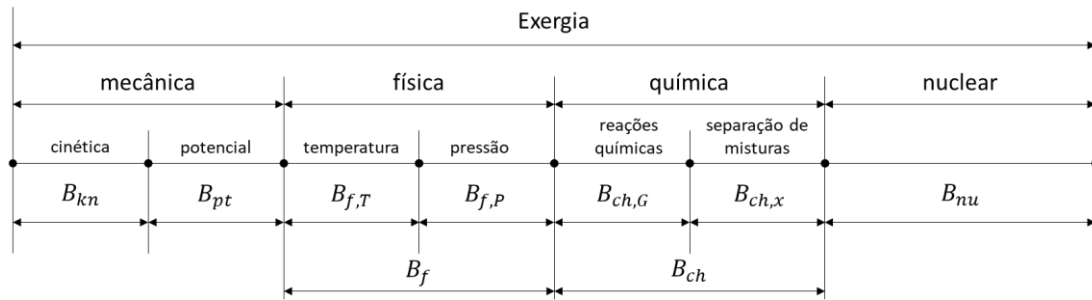
De acordo com a Figura 2.1., os seguintes componentes de exergia são geralmente considerados nas análises técnicas e ecológicas, presente em Stanek et al. (2017).

Exergia física ( $B_f$ ) resulta da diferença de temperatura (T) e pressão (p) do meio termodinâmico considerado em relação à temperatura ambiente ( $T_0$ ) e pressão ambiente ( $P_0$ ) de referência.

Exergia química ( $B_{ch}$ ) resulta da diferença da composição química do meio termodinâmico ou sistema considerado em relação à composição comum encontrada no ambiente de referência



**Figura 2.1:** Componentes da exergia e nomenclaturas



**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017)

Exergia cinética ( $B_{kn}$ ) resulta da velocidade do sistema em relação ao ambiente de referência.

Exergia potencial ( $B_{pt}$ ) resulta da altura medida em relação ao ambiente de referência.

Exergia nuclear ( $B_{nu}$ ) resulta da energia das fissões diminuída pela energia dos neutrinos emitidos que não interagem com a matéria.

A exergia física  $B_f$  é dividida em dois componentes:  $B_{f,P}$  é resultante da diferença de pressão no sistema P e na pressão do ambiente de referência  $P_0$ .  $B_{f,T}$  é resultante da diferença entre a temperatura no sistema T e a temperatura do ambiente de referência  $T_0$ .

A exergia química do meio termodinâmico  $B_{ch}$  pode ser dividida em dois componentes:  $B_{ch,G}$ , na determinação deste componente, as reações químicas que ocorrem no sistema termodinâmico são levadas em consideração, já o termo  $B_{ch,x}$ , na determinação desta parte, processos como compressão, expansão, mistura e separação são considerados. Este componente dependerá da concentração do meio termodinâmico em relação à concentração no ambiente de referência.

Ambos os componentes da exergia química  $B_{ch,G}$ ,  $B_{ch,x}$  desempenham um papel importante na determinação da qualidade dos recursos naturais. O primeiro, especialmente no caso de recursos de energia primária.

O cálculo da exergia química de compostos pode ser efetivamente apoiado pela aplicação gratuita "Calculadora de Exergia" disponível no portal exergo-ecológico ([www.exergoecology.com](http://www.exergoecology.com)). Entre outras coisas, a aplicação inclui um banco de dados detalhado com informações sobre a energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) de compostos. Para substâncias sólidas e gasosas, assumindo que elas podem ser tratadas como soluções perfeitas, a seguinte equação pode ser aplicada para o cálculo da exergia química específica,

como indicado por Stanek (2017).

$$b_{ch} = b_{ch,R} + b_{ch,x} = \sum_i z_i b_{ch,i} + RT_0 \sum_i z_i \ln(z_i) \quad (2.20)$$

A equação (2.20) pode ser aplicada, por exemplo, para determinar a exergia química de combustíveis gasosos. No caso de combustíveis líquidos e sólidos, a suposição de soluções perfeitas não é correta e, por esse motivo, a equação (2.20) não pode ser aplicada. Para combustíveis sólidos e líquidos, são aplicadas equações empíricas a serem discutidas posteriormente.

Para o meio gasoso contendo apenas os componentes do ar atmosférico e tratado como um gás perfeito ou ideal, a exergia química pode ser expressa, seguindo Stanek (2017), como:

$$b_{ch} = T_0 R \sum_i z_i \ln\left(\frac{z_i}{z_{i,ot}}\right) \quad (2.21)$$

Nas análises práticas de engenharia, a exergia química dos combustíveis pode ser estimada para os valores conhecidos de Poder Calorífico Inferior (PCI) ou Poder Calorífico Superior (PCS) a partir da equação simplificada:

$$b_{ch} = aW_d = bW_g \quad (2.22)$$

Os coeficientes empíricos da Eq. (2.22) para combustíveis básicos são apresentados na tabela presente em Figura 2.2.

Para combustíveis líquidos, a relação entre a exergia química e a energia química expressa pelo Valor Calorífico Inferior (LHV, Low Heating Value) pode ser determinada utilizando a equação, para determinar o coeficiente  $\beta$  da equação 2.24:

$$\beta = 1,0401 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0628 \frac{h}{c}\right) \quad (2.23)$$

Onde  $c, h, o$  e  $s$  representam as frações mássicas de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, respectivamente.

A exergia química do combustível sólido contendo enxofre e levando em conta o teor

de umidade e cinzas é calculada como:

$$b_{ch} = (W_d + rw)\beta + (b_{ch,s} - W_{d,s})_s + b_{ch,p}p + b_{ch,w}w \quad (2.24)$$

**Tabela 2.1.:** Coeficientes empíricos para combustíveis.

Combustível	a	b
Carvão Mineral	1,09	1,03
Lignito	1,17	1,04
Coque	1,06	1,04
Óleo combustível	1,07	0,99
Gasolina	1,07	0,99
Gás Natural	1,04	0,99
Gás de Forno de Coque	1	0,89
Gás de Alto-Forno	0,98	0,97

Onde  $r$  é a entalpia de vaporização. As frações mássicas de umidade, enxofre e cinzas são  $w$ ,  $s$  e  $p$ , respectivamente. Os termos  $b_{ch,w}$ ,  $b_{ch,s}$ ,  $b_{ch,p}$  são as exergias específicas da umidade, enxofre e cinzas, respectivamente. Já o  $W_{d,s}$  é valor calorífico inferior do enxofre.

Para combustíveis sólidos orgânicos contendo C, H, O, N e com uma razão  $o/c < 0,667$ , como carvão mineral, lignito e coque, o coeficiente  $\beta$  pode ser calculado a partir da seguinte equação.

$$\beta = \frac{b_{ch}}{W_d} = 1,0437 + 0,1896 \frac{h}{c} + 0,0617 \frac{o}{c} + 0,0428 \frac{n}{c} \quad (2.25)$$

## 2.6. ANÁLISE EXERGÉTICA DE FONTES RENOVÁVEIS

Segundo o estudo apresentado em Koroneos (2003), as crises do petróleo nos últimos anos tornaram mais óbvia a dependência das economias dos combustíveis fósseis. Por consequência, a necessidade de novas fontes de energia tornou-se mais urgente. Fontes de energia renovável, por sua vez fornecem uma possível solução para o problema, pois são inesgotáveis e têm efeitos menos adversos no meio ambiente do que os combustíveis fósseis.

No entanto, a tecnologia de fontes de energia renováveis não atingiu um padrão elevado para ser considerado competitivo em relação aos combustíveis fósseis. Diante disso,

conduziu-se uma análise exergética da energia solar, eólica e geotérmica. Isto é, o uso real de energia da energia disponível existente das fontes de energia renováveis é comparado com as fontes de energia não renováveis com base na eficiência.

Ao comparar fontes renováveis de energia com não renováveis, observa-se uma diferença importante, fontes renováveis são inesgotáveis e de valor econômico baixo ou nulo antes de serem convertidas para uma forma útil. Apenas o custo restringe o dispositivo que é necessário para captação de energia, por exemplo, o da construção de rede para captação de radiação solar.

Koroneos (2003) argumenta que os sistemas que usam energia não renovável, como os combustíveis fósseis, convertem parte da energia consumida em energia útil. Já os sistemas que utilizam fontes de energia renováveis também convertem a energia disponível em energia útil, que é adicionada às reservas de energia, mas a uma taxa menor. Por exemplo, um sistema de energia solar converte uma porcentagem menor da energia solar disponível em energia elétrica útil do que um sistema de conversão de óleo diesel em energia elétrica.

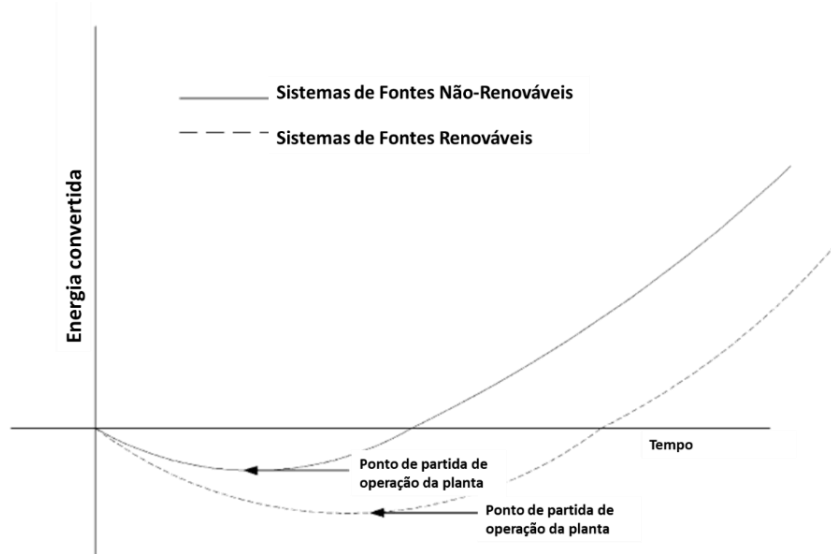
No entanto, a energia líquida produzida torna-se positiva para sistemas que usam energia renovável enquanto permanece negativa para os sistemas que usam energia não renovável. Isso acontece porque os sistemas que utilizam fontes renováveis utilizam fontes inesgotáveis de energia, como solar, eólica, etc., que não pode ser esgotado por seu uso. Por outro lado, os sistemas não renováveis fazem uso de fontes esgotáveis. Assim, o uso de combustíveis fósseis pode levar a produção de energia, mas a energia produzida em relação à energia utilizada é menor e os estoques totais de energia estão se esgotando.

Os sistemas de energia renovável podem ter uma energia líquida convertida maior ou menor em relação à energia investida para construção da usina, dependendo do uso da energia produzida. Por exemplo, sistemas que produzem energia térmica provenientes da energia solar têm mais energia líquida convertida em relação à energia investida para a construção da usina do que aquelas que utilizam gás natural ou petróleo, Koroneos (2003).

O que deve ser mencionado é que as plantas mostradas na Tabela 2.2 têm o mesmo período de vida. O estudo apresentado por Koroneos (2003) afirma que a vida útil dos sistemas que usam fontes de energia renovável é maior do que a dos sistemas que usam combustíveis fósseis, assumindo que a disponibilidade da matriz energética renovável é infinitamente maior que a matriz de combustíveis fósseis a longo prazo.

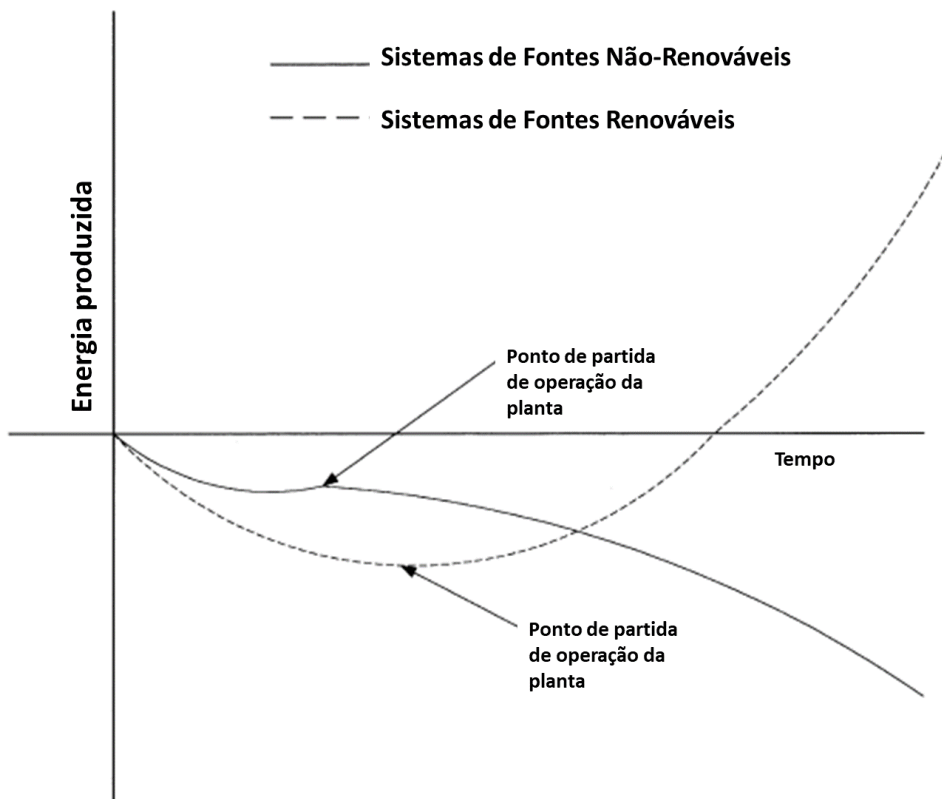
A base utilizada para comparação desses sistemas, realizada por Koroneos (2003) é o preço por unidade de energia produzida na forma útil. Com este sistema de cálculo, o valor futuro das não renováveis de energia é reduzido.

**Figura 2.2:** Energia líquida convertida por sistemas de energia renovável e não renovável em função do tempo desde o início da construção da usina.



Fonte: Koroneos (2003)

**Figura 2.3:** Energia líquida produzida por sistemas de energia renovável e não renovável em função do tempo desde o início da construção da usina.



Fonte: Koroneo (2003)

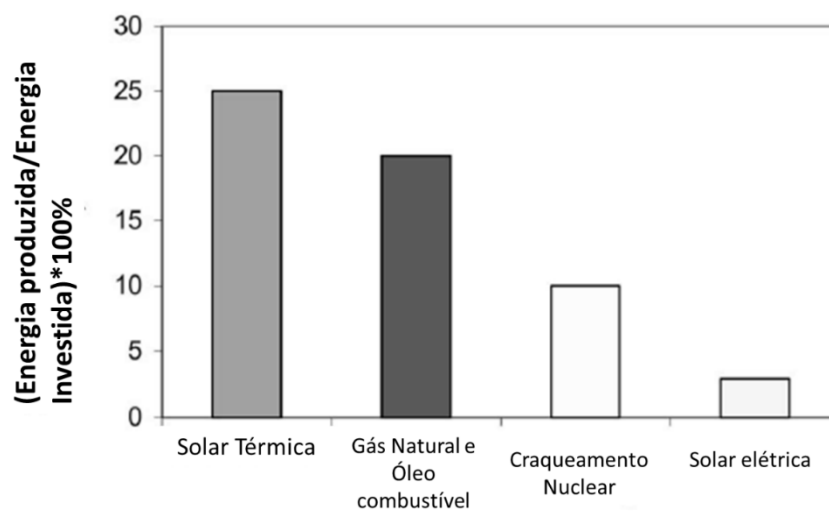
**Tabela 2.2:** Eficiências de plantas com fontes renováveis e não-renováveis.

	Eficiência 1 <sup>a</sup> (%)	Eficiência 2 <sup>b</sup> (%)
Solar térmica	25	52
Gás Natural e Óleo combustível	20	48
Lignito		34
Craqueamento Nuclear	10	
Solar elétrica	3	12,75
Eólica		39
Geotérmica		35,6

**Fonte:** Koroneo (2003)

A partir dos resultados, pode-se ver que alguns dos sistemas parecem ter alta eficiências e, em alguns casos, são maiores do que a eficiência dos sistemas que usam fontes de energia não renováveis. A energia convertida das fontes não renováveis diminui porque a energia total do sistema, no caso o planeta Terra, está reduzindo sua disponibilidade, enquanto a renovável está aproveitando o trabalho útil disponível através da diferença entre as entropias do fluxo de energia vinda do sistema solar e a que o planeta devolve para o universo. A Figura 2.4 apresenta o percentual de energia produzida por energia investida para diferentes fontes energéticas.

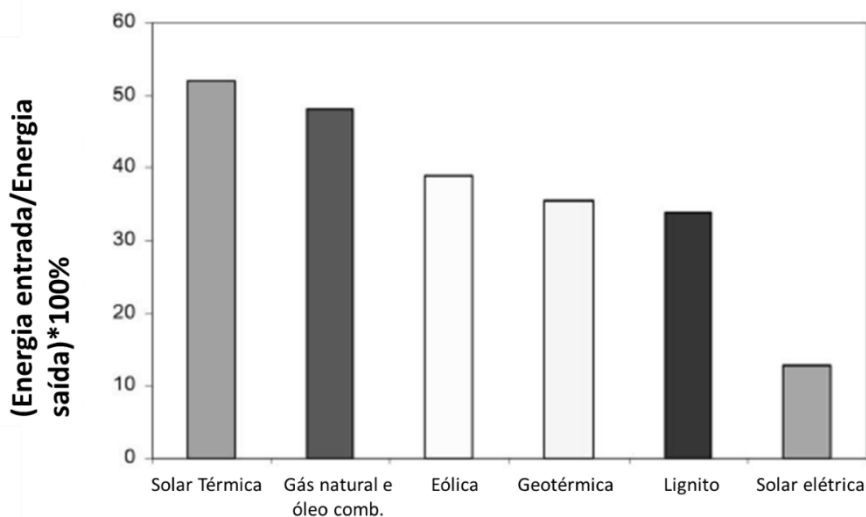
**Figura 2.4:** Energia produzida por energia investida para diferentes fontes energéticas.



**Fonte:** Koroneos (2003)

Koroneos (2003) argumenta que uma vantagem significativa do uso de sistemas de energia renovável é que eles têm impacto ambiental mínimo, uma vez que emitem muito poucos poluentes perigosos. Por outro lado, sua principal desvantagem reside na incapacidade de tirar vantagem de uma grande parte da energia disponível. Isso é compensado pelo fato de que as fontes de energia renovável são inesgotáveis.

**Figura 2.5:** Fluxo de entrada e saída de energia para diferentes fontes energéticas.



**Fonte:** Koroneos (2003)

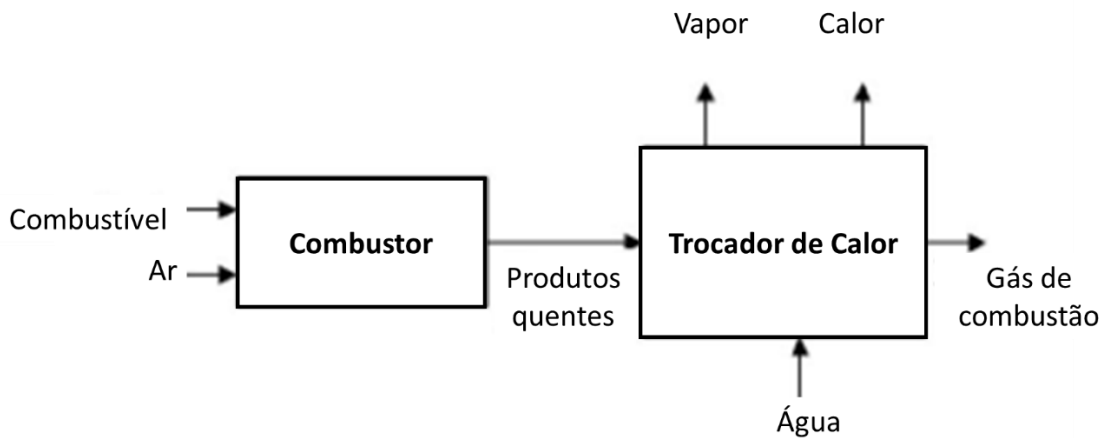
Koroneos (2003) ao conduzir o estudo cita a Grécia como um exemplo de análise, uma vez que se trata de um país cuja incidência solar é bastante intensa e presente ao longo do ano. Além disso, as ilhas e costas sustentam a instalação de aerogeradores para exploração da elevada capacidade eólica existente nestas áreas. Finalmente, existem algumas fontes geotérmicas, que permanecem inexplorados, segundo Koroneos (2003). Ao usar essas fontes de energia, a Grécia poderia atender, portanto, grande parte de suas necessidades energéticas, tornando sua dependência de combustíveis fósseis significativamente menor.

Segundo o estudo conduzido em Saidur (2012), a energia solar como uma fonte alternativa disponível, barata e ambientalmente amigável tem sido objeto de muitos estudos teóricos e experimentais. A integração da energia solar com diferentes tipos de sistemas desempenha um papel importante na política de economia energética. No caso de combinar a energia fotovoltaica e componentes térmicos solares, calor e eletricidade podem ser produzidos a partir do mesmo sistema, desempenhando papel significativo na redução do consumo de energia.

Em Saidur (2010) está presente um estudo sobre energia, eficiência energética, perdas

de energia e a destruição de exergia para uma caldeira, composta por um trocador de calor e um combustor. Nota-se que o uso de energia da caldeira pode ser reduzido de várias maneiras, por exemplo, controlando o excesso de ar, aumentando a taxa de transferência de calor, melhorando eficiência de combustão, uso de combustível mais ecológico, recuperando o calor residual, recuperando o condensado, evitando vazamentos e fornecendo isolamento adequado.

**Figura 2.6:** Diagrama de processo com combustor e trocador de calor.



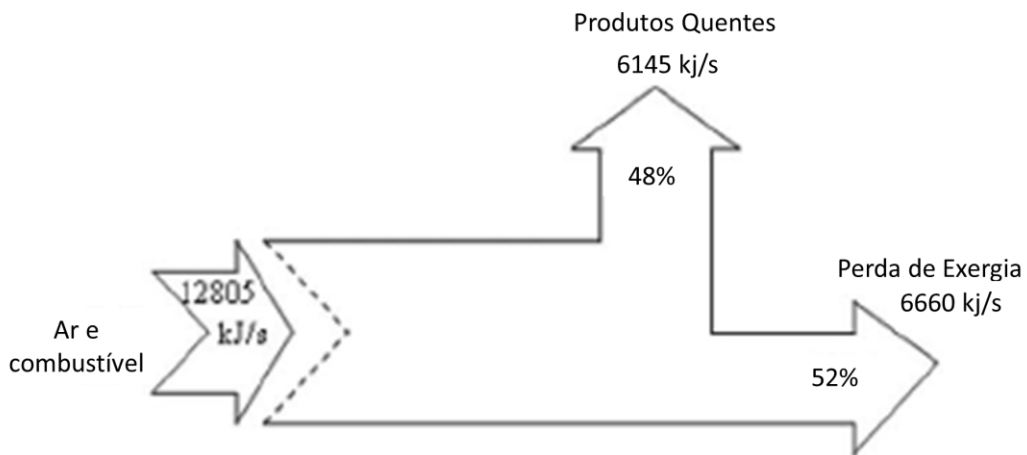
**Fonte:** Çengel & Boles (2006)

É importante notar que as destruições exérgicas são devidas a irreversibilidades na turbina, bomba e condensador. A primeira maneira de manter a destruição de exergia em processo de combustão dentro de um limite razoável, para reduzir sua reversibilidade na condução de calor é através do controle adequado dos processos físicos e das reações químicas. Assim resultando em alto valor da temperatura da chama, mas valores mais baixos de gradientes de temperatura dentro do sistema.

Neste estudo, a análise exérgica em uma caldeira é feita de acordo com o método utilizado por Rosen (1999) e Aljundi (2009). Como a caldeira é usada em muitas aplicações industriais e usa uma quantidade significativa de energia, sua melhoria de eficiência e redução da destruição de exergia terá um papel significativo na economia de energia e mitigação da poluição ambiental. O resultado obtido mostra a eficiência exérgica menor que a eficiência energética, além da maior destruição de exergia e maior irreversibilidade ser calculada no trocador de calor e no combustor, conforme os diagramas 2.7 e 2.8.

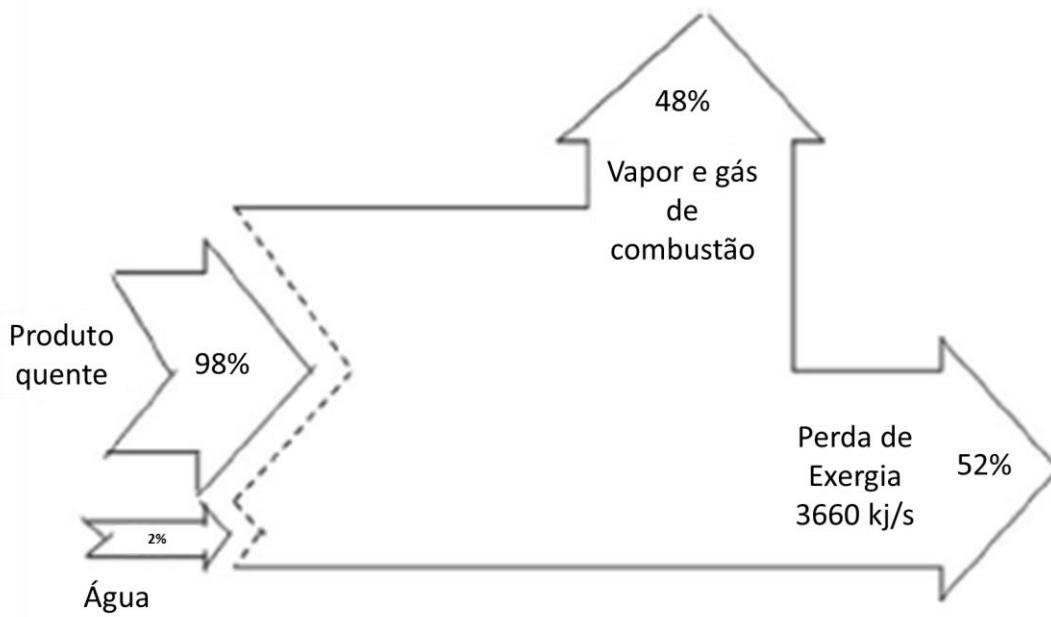


**Figura 2.7:** Diagrama de fluxo de exergia no combustor.



Fonte: Saidur (2010)

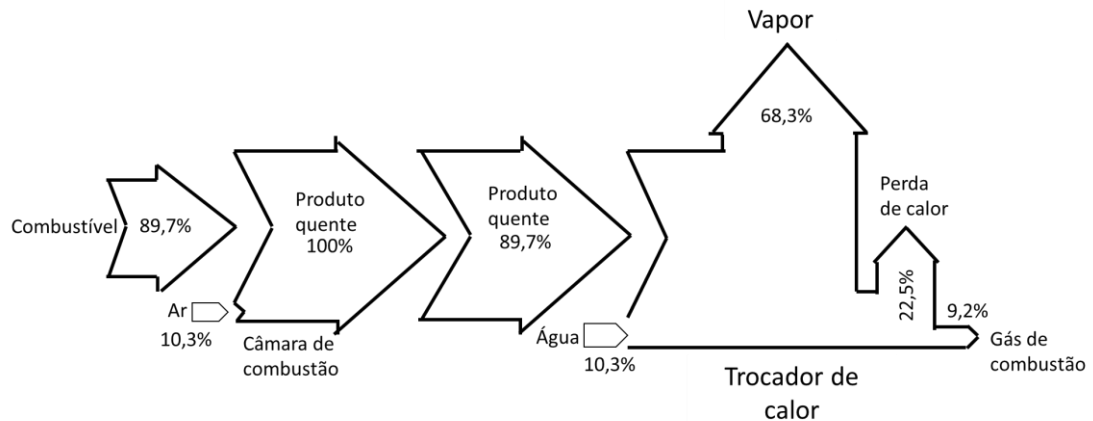
**Figura 2.8.:** Diagrama de fluxo de exergia no trocador de calor.



Fonte: Saidur (2010)

Como se observa nos diagramas, a exergia destruída (ou perdida) representa 52% da taxa total de saída dos processos, tanto no combustor, como no trocador de calor. Diferentemente do fluxo de energia em toda a caldeira, que, ao final do processo, tem uma perda por transferência de calor de 22,5%.

**Figura 2.9:** Exergia percentual global do processo.



**Fonte:** Adaptado Saidur (2010)

Diante disso, pode-se confirmar que a exergia é uma propriedade mais difícil de ser aproveitada ao final de um processo, devido à sua relação inversa com as irreversibilidades.

## 2.7. APLICAÇÕES DA EXERGIA NA INDÚSTRIA

De acordo com Dincer e Rosen (2021), muitos pesquisadores e engenheiros referem-se aos métodos exergeticos como ferramentas poderosas para analisar, avaliar, projetar, melhorar e otimizar sistemas e processos. Não é surpreendente, portanto, que os métodos de exergia sejam usados em algumas indústrias.

Outros autores também notaram um aumento no uso dos balanços exergeticos pela indústria. Por exemplo, Kotas (1995) escreveu no prefácio de seu livro sobre exergia, “...desde o início dos anos 70, tem havido um crescimento constante no interesse pela análise exergetica na indústria...”. Além disso, Bejan (2001) escreveu: “...Com o início do novo século, estamos testemunhando mudanças revolucionárias na forma como a termodinâmica é praticada... Os métodos de análise exergetica ... são as formas mais visíveis e estabelecidas dessa mudança...”.

Alguns exemplos podem ajudar a ilustrar estas observações. Algumas empresas de geração elétrica utilizam métodos de exergia para projetar melhores estações, melhorar a eficiência e evitar a deterioração do desempenho nas estações existentes. Além disso, algumas instalações de cogeração (ou calor e energia combinados) usam métodos de exergia para melhorar a eficiência e resolver problemas econômicos de custos e preços.

Dado que a análise de exergia é, antes de mais nada, uma ferramenta técnica para orientar os esforços de melhoria da eficiência na engenharia e áreas afins, seria de se esperar que a indústria adotasse de todo o coração o uso da exergia. No entanto, a análise exergética é usada apenas com moderação por muitas indústrias e não por outras. Claramente, portanto, a exergia não é geralmente e amplamente aceita pela indústria no momento (Dincer e Rosen, 2021).

Segundos os autores, houve várias iniciativas para melhorar esta situação. Um sucesso importante foi a formação em 2006 de um grupo intitulado “*Exergy Analysis for Sustainable Buildings*”, dentro da American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). A sua missão e objetivos estratégicos são os seguintes:

#### Missão:

- A Análise Exergética para Edifícios Sustentáveis preocupa-se com todos os aspectos exergéticos de energia e utilização de energia de sistemas e equipamentos para conforto e serviço, avaliação de seu impacto no meio ambiente e desenvolvimento de técnicas de análise, metodologias e soluções para ambientes mais seguros, sustentáveis e de baixa exergia. edifícios.

#### Metas estratégicas:

- Fazer da “Análise de Exergia” uma ferramenta primária para projeto, análise e melhoria de desempenho de sistemas HVAC de construção para melhor ambiente e sustentabilidade.
- Desenvolver pacotes de análise simples de entender e fáceis de aplicar, mas muito eficazes e abrangentes.
- Desenvolver a análise exergética como uma métrica comum de engenharia ecológica.
- Desenvolver novas políticas e estratégias exergéticas para complementar as políticas e estratégias energéticas para uma melhor sustentabilidade global.
- Desenvolver definições robustas, contínuas e fáceis de entender, equações simplificadas, gráficos, tabelas etc. para edifícios verdes que sejam de fácil aplicação para todas as disciplinas envolvidas (arquitetos, construtores, tomadores de decisão etc.).

- Desenvolver e manter produtos e serviços para atender às necessidades dos membros da ASHRAE e da comunidade de engenharia em geral; desenvolver guias, padrões, capítulos de manuais, organizar Cursos de Desenvolvimento Profissional (CDPs), material de curso de e-learning, manter um site robusto, organizar simpósios, fóruns, seminários, publicar boletins técnicos, cooperar com outras organizações.
- Criar uma cultura de inovação exergética, resiliência e flexibilidade dentro da ASHRAE que reconheça e responda às necessidades tecnológicas e ecológicas do HVAC e da indústria da construção.
- Desenvolver parâmetros de design e avaliação relacionados à exergia, algoritmos a serem usados em vários códigos de certificação e avaliação, como LEED.
- Desenvolver um sistema de classificação de equipamentos semelhante ao EER (por exemplo, Eficiência Exergética (EE), Taxa de Melhoria Exergética (EIR)).
- Estreitar a coordenação e cooperação com outros Comitês Técnicos da ASHRAE, grupos e outras associações nacionais e internacionais: identificar instituições dentro e fora da ASHRAE e selecionar os contatos do grupo para essas instituições.
- Desenvolver uma Biblioteca de Nomenclatura e Definições de Exergia comum e interdisciplinar.
- Identificar diferentes perímetros de análise exergética como perímetros incorporados, operacionais e outros na Análise Exergética atribuídos a este grupo, como a energia/exergia necessária para produzir e montar os materiais de que o edifício é feito (upstream) e destruição exergética (downstream) e impacto ambiental.
- Otimizar o uso da análise de energia e exergia para os projetos de próxima geração e otimize o tempo dos voluntários.

### *2.7.1. Questões acerca do uso da exergia em indústrias*

O uso relativamente limitado de métodos de exergia pela indústria atualmente leva a várias questões pertinentes:

- Por que os métodos de análise exergética não são mais amplamente utilizados pela indústria?
- O que pode ser feito para aumentar o uso da indústria – ou mesmo a aceitação – da exergia?

- O uso mínimo de exergia pela indústria é apropriado?
- Devem ser tomadas medidas para tornar os métodos de exergia mais amplamente utilizados pela indústria?

Além disso, surgem dúvidas devido à observação de que o uso de métodos exergeticos parece variar geograficamente. Por exemplo, mais empresas na Europa do que na América do Norte parecem utilizar métodos de exergia para melhorar e manter o desempenho da planta. Talvez essa situação seja atribuível ao fato de que as empresas europeias geralmente adotam uma visão de longo prazo das medidas de eficiência do que suas contrapartes na América do Norte e, portanto, os métodos exergeticos são mais naturalmente considerados na Europa. Mas talvez existam outras razões, que merecem ser investigadas. Para responder melhor a essas questões, é útil examinar algumas das vantagens e desvantagens dos métodos exergeticos (Dincer e Rosen, 2021).

#### 2.7.2. *Vantagens e benefícios da análise exergetica*

Segundo Dincer e Rosen (2021) os benefícios da análise exergetica são numerosos, especialmente em comparação com a análise energética. Normalmente os benefícios são claramente identificáveis e às vezes são notáveis.

- Eficiências baseadas em exergia, diferentemente daquelas baseadas em energia, são sempre medidas que se aproximam da verdadeira idealidade, e, portanto, fornecem informações mais significativas ao avaliar o desempenho dos sistemas de energia. Além disso, as perdas de exergia identificar claramente os locais, causas e fontes de desvios da idealidade em um sistema.
- Em sistemas complexos com múltiplos produtos (por exemplo, usinas de cogeração e trigerção), os métodos de exergia podem ajudar a avaliar os valores termodinâmicos das formas de energia do produto, mesmo que normalmente exibam características radicalmente diferentes.
- Os métodos baseados em exergia evoluíram e podem ajudar nas atividades relacionadas ao design. Por exemplo, alguns métodos (por exemplo, exergoeconomia e termoeconomia) podem ser usados para melhorar as avaliações econômicas. Outros métodos (por exemplo, ambiental) podem auxiliar nas avaliações ambientais.

- A análise exérgica pode melhorar a compreensão de termos como conservação de energia e crise de energia, facilitando melhores respostas para os problemas.

Além disso, os métodos exérgicos podem auxiliar nas atividades de otimização. Berg (1980) observou essa vantagem ao examinar os diferentes graus de uso da exergia na indústria. Ele escreveu: “...*Em algumas indústrias, particularmente as concessionárias de energia elétrica, o uso da análise da segunda lei em várias formas tem sido uma prática de longa data no projeto. Em outras indústrias, as técnicas mais diretas de análise da segunda lei não eram amplamente utilizadas; outras técnicas menos diretas e menos exigentes foram usadas em seu lugar. Mesmo que a abordagem de otimização nos últimos casos tenha sido mais lenta e, em última análise, menos perfeita, a abordagem foi feita...*”. Consequentemente, muitas aplicações de projeto de análise exérgica têm ocorrido com o objetivo de avaliar, comparar, melhorar ou otimizar sistemas de energia.

Muitos exemplos podem ser usados para ilustrar como o uso da exergia esclarece as medidas de eficiência e perdas termodinâmicas. Apenas alguns poucos são apresentados aqui. No entanto, são necessárias ilustrações mais claras, tanto para educar quanto para convencer as pessoas sobre os benefícios dos métodos exérgicos.

Considere uma máquina térmica de Carnot operando entre uma fonte de calor a uma temperatura de 600K e um dissipador de calor a 300K. A eficiência energética deste dispositivo é de 50% (ou seja,  $1 - 300/600 = 0,5$ ). No entanto, uma máquina de Carnot é ideal. Claramente, a eficiência energética é enganosa, pois indica que existe uma margem significativa para melhoria quando na verdade não há. A eficiência exérgica deste dispositivo é de 100%, indicando corretamente sua natureza ideal de forma direta e clara.

Em outra análise, considere um aquecedor de ambientes de resistência elétrica. Quase toda a eletricidade que entra na unidade é dissipada para aquecer o espaço interno. Assim, a eficiência energética é de quase 100% e quase não há perdas de energia. No entanto, a eficiência exérgica de tal dispositivo é tipicamente inferior a 10%, indicando que o mesmo aquecimento ambiente pode, em teoria, ser alcançado usando um décimo da eletricidade. Na realidade, algumas dessas economias máximas no uso de eletricidade podem ser alcançadas usando uma bomba de calor. Mesmo o uso de uma bomba de calor relativamente ineficiente pode reduzir a eletricidade usada para atingir o mesmo aquecimento em um terço.

Claramente, o uso de eficiências e perdas de energia é bastante enganoso para sistemas de aquecimento elétrico.

Como último exemplo, considere um tanque de armazenamento de energia térmica

enterrado. Uma corrente aquecida flui através de um trocador de calor para dentro do sistema de forma que o calor é transferido para o dispositivo de armazenamento. Depois de algum tempo, um fluido frio passa pelo trocador de calor e o calor é transferido do dispositivo de armazenamento para o fluido frio. A quantidade de calor assim recuperada depende de quanto calor escapou do armazenamento para o solo circundante e por quanto tempo o fluido de recuperação é passado através do trocador de calor. Porém, surge um problema na avaliação da eficiência energética deste armazenamento porque a eficiência energética pode ser aumentada simplesmente aumentando o tempo que o fluido de recuperação circula, favorecendo a troca de calor. O que é negligenciado aqui é o fato de que a temperatura na qual o calor é recuperado diminui continuamente em direção à temperatura ambiente do solo à medida que o fluido circula. Assim, embora a energia recuperada aumente à medida que o fluido de recuperação continua a circular, a exergia recuperada dificilmente aumenta após um certo tempo, refletindo o fato de que a recuperação de calor em temperaturas próximas às ambientais não torna um armazenamento termodinamicamente mais eficiente.

Portanto, a análise da eficiência energética e exérgica fornecem diferentes tipos de informação em diferentes contextos e sua associação promove um entendimento mais profundo e adequado sobre as interações energéticas em um processo.

### *2.7.3. Desvantagens e inconvenientes da análise exérgica*

Aqueles na indústria que optam por não utilizar exergia geralmente o fazem por vários motivos, alguns dos quais são descritos:

- Os métodos de análise exérgica são considerados muito complicados ou complexos por alguns usuários. Por exemplo, a necessidade de escolher um ambiente de referência na análise exérgica é considerada por alguns como um processo que torna a técnica muito desafiadora.
- Os resultados das análises exérgicas são considerados por alguns como difíceis de interpretar, entender e utilizar.
- Muitos usuários em potencial simplesmente não estão familiarizados com a exergia, sendo instruídos sobre energia e, portanto, mais confortáveis com seu uso.
- Talvez o mais importante, alguns engenheiros práticos simplesmente não encontraram métodos de análise exérgica para levar a resultados tangíveis e diretos.

É importante considerar esses motivos com cuidado, pois eles podem fornecer informações sobre as quais ações são necessárias para melhorar a situação.

Certamente, existem opiniões variadas sobre o uso da exergia pela indústria. Muitos pontos de vista relacionados à exergia e à indústria foram expressos em uma sessão de painel em 1996 sobre a Segunda Lei na Educação em Engenharia, no Congresso e Exposição Internacional de Engenharia Mecânica da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (Dincer e Rosen, 2021). Os painelistas eram da academia e da indústria. Alguns palestrantes explicaram a necessidade de educação em métodos exergéticos para o benefício da indústria, enquanto outros pensavam o contrário, questionando até que ponto a segunda lei da termodinâmica deveria ser ensinada. Segundo os autores este ponto é relevante porque a indústria sente os impactos do ensino de termodinâmica. Há aqui um certo direcionamento ao se evitar análises aprofundadas da segunda lei, considerando que ela é considerada por muitos engenheiros uma ferramenta desafiadora e, por vezes, abstrata.

## 2.8. SUSTENTABILIDADE TERMODINÂMICA

Segundo Zevenhoven (2021), durante a década de 1940, enquanto o mundo estava em chamas, Schrödinger descreveu a vida como uma estrutura de nível de energia muito alto, um sistema de baixa entropia que continuamente tem que receber o que ele descreve como “entropia negativa”. Isso ocorre para manter esse estado muito longe do equilíbrio, porque o equilíbrio para uma coisa viva significa a morte. Assim, produzir entropia é simplesmente parte da definição de estar vivo: a vida e os sistemas vivos são, aparentemente, a maneira através da qual a natureza produz entropia mais rapidamente em nosso universo. Por um lado, isso parece ser um ponto de partida infeliz para uma vida sustentável e o uso sustentável de recursos, sugerindo que o “desenvolvimento sustentável” pode ser uma contradição em si. Por outro lado, nossa compreensão da termodinâmica e da “caixa de ferramentas” que ela apresenta pode levar ao desenvolvimento reversível como uma meta inalcançável. A sustentabilidade pode então ser definida como o nível de reversibilidade que os recursos da Terra permitem enquanto são usados.

O exposto acima sugere que o desafio em questão, formulado como tecnologia de energia de “emissão zero” usando recursos “renováveis” e tecnologia “sustentável” que também processa e usa recursos materiais de maneira “sustentável” pode ser bem definido do ponto de vista da termodinâmica da engenharia. É uma sorte que, embora o uso atual de



fontes de combustíveis fósseis dê grandes mudanças de energia da crosta terrestre para a atmosfera e hidrosfera (resultando em um transporte de entalpia experimentado como aquecimento global e mudança climática), a maioria dos elementos na crosta terrestre na forma sólida permanecerá conosco na Terra em forma sólida. Cobre, como um recurso mineral, permanecerá na Terra qualquer que seja o processamento e a reciclagem empreendido. Mas pode ser possível atingir um nível de diluição de certos elementos em certos produtos feitos pelo homem que farão a recuperação para reutilização praticamente impossível com os recursos energéticos da Terra, incluindo o influxo constante de energia da irradiação solar.

No mundo de hoje, as metas e definições de sustentabilidade entram em conflito com o crescimento econômico ilimitado, a menos que os limites dos recursos sejam reconhecidos e contabilizados nos modelos de negócios. Mais ação é necessária; mas quem faz o quê e quando? São necessárias liderança e governança imparciais, o que implica responsabilidade, muitas vezes andando de mãos dadas com a corrupção. Mecanismos de controle financeiro, como impostos e subsídios, aumentam a confusão que paralisa a ação (Zevenhoven, 2021).

### 2.8.1. *Sustentabilidade, um conceito perene e estimado*

O conceito de sustentabilidade surge na década de 1960, quando a visão dominante de que a tecnologia impulsiona o crescimento econômico sofre críticas genéricas sob uma percepção de que a qualidade do meio ambiente está ligada ao desenvolvimento econômico. Em 1972, o Clube de Roma publica o livro “Limites do Crescimento”, que reúne resultados de uma simulação computadorizada do planeta Terra conduzida por pesquisadores do MIT (Massachusetts Institute of Technology), apontando que limitações devem ser impostas à humanidade e à produção de bens materiais para a manutenção do homem e do planeta (Sciuba, 2021).

Três anos depois, o WWI (Worldwatch Institute) criou o termo “desenvolvimento sustentável”, que viria a ser oficializado pela ONU (Organização das Nações Unidas). Em 1987, a Comissão Brundtland, em seu livro “Nosso Futuro Comum” definiu a sustentabilidade como “*satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades*”. A comissão levou o sobrenome da sua presidente à época, Gro Harlem Brundtland, mas oficialmente recebe o título de Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento.

Adentrando o século XXI, no ano de 2000, a ONU declara 8 objetivos do milênio, que

deveriam ser cumpridos até 2015, compromissando líderes mundiais a lutar contra a fome, a miséria, as doenças, intolerância, degradação do meio ambiente e a discriminação contra as minorias. Em 2002, a Cúpula Mundial de Desenvolvimento Sustentável, mediada pela ONU, publica a primeira declaração política (Declaração de Joanesburgo) definindo metas de acesso à água, saneamento e abastecimento energético. Seu objetivo é dissociar a degradação ambiental do crescimento econômico, a fim de atingir padrões sustentáveis de consumo e produção.

Atualmente, existem quase 140 países em desenvolvimento no mundo que buscam maneiras de atender às suas necessidades de desenvolvimento, mas com a crescente ameaça da mudança climática, devem-se fazer esforços concretos para garantir que o desenvolvimento atual não afete negativamente as gerações futuras. No próprio ano “limite” para o cumprimento dos objetivos do milênio, a ONU ampliou ODM (Objetivos de Desenvolvimento do Milênio) a data para 2030 e a quantidade de objetivos, agora ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) para 17.

### *2.8.2. Lacunas na definição de Sustentabilidade*

Quando se analisa os documentos que tratam da temática de desenvolvimento sustentável, percebe-se que os conceitos de necessidades e problemas sustentáveis são pouco elucidativos. As necessidades, principalmente no documento da Comissão Brundtland se referem às necessidades individuais, incluindo as socioeconômicas. Porém, fica no subtexto dois questionamentos: “quem ou o que será encarregado de definir um padrão para as necessidades e que sejam aplicáveis para a população mundial?” e “qual autoridade internacional é responsável por atualizar as definições dessas necessidades a fim de compreender as necessidades locais?”. Tudo isso sob uma visão de que o desenvolvimento sustentável exige decisões políticas de longo prazo, resta muita incerteza quanto as necessidades das futuras gerações.

No estudo realizado em Scciuba (2021), a definição de desenvolvimento sustentável é condicionada a uma falta de fundamento científico para defini-la. A crítica feita é na descrição dos passos para atingir o desenvolvimento sustentável, que partem de uma mudança de atitude na produção e no consumo concomitante aos avanços tecnológicos, sem diretrizes precisas. A falta de rigor científico corrobora com a demanda por métricas embasadas pelas ciências exatas, evitando qualquer viés subjetivo.

Determina-se, portanto, que a partir de técnicas e propriedades oriundas da

Termodinâmica podem ser utilizados como “filtro” para quantificadores socioeconômicos. Isto é, ao antecipar uma análise, esta área do conhecimento sustenta os pilares do conceito de sustentabilidade, uma vez que fundamenta a concepção de métodos que permitam quantificá-la.

Em Sciuba (2021), o autor inicia seu documento afirmando que diversos paradigmas estão em vigor para identificar e quantificar o "impacto ambiental antropogênico", e importantes Agências Ambientais e Governamentais deixaram de lado o rudimentar "controle do nível de emissões" dos anos 80 para prescrever uma análise abrangente e detalhada das implicações locais e globais das interações dos processos antrópicos com a biosfera (tanto localmente quanto em escala ampla).

De fato, a grande maioria das regulamentações atuais vai muito além da simples "avaliação de danos ecológicos" (entendida meramente como "poluição"). Quantificadores de tais interações, conhecidos como Indicadores Ambientais (IA a seguir), têm sido e ainda estão sendo propostos e aplicados a diferentes sistemas em diversos cenários e com diferentes limites de sistema, a fim de fornecer uma base de apoio à tomada de decisões suficientemente precisa e confiável para os tomadores de decisão. A definição de um IA confiável e robusto inevitavelmente apresenta alguns problemas: por exemplo, alguns dos IA mais populares baseiam-se em um número restrito de parâmetros de controle (qualidade do ar, saúde pública, equidade social etc.) e oferecem apenas uma medida incompleta do impacto ambiental real.

Indicadores Ambientais são estudados em Dale (2001), onde o autor comenta que estes podem ser utilizados para avaliar o estado do ambiente, fornecer um sinal de alerta precoce de mudanças no ambiente ou diagnosticar a causa de um problema ambiental. Idealmente, a série de indicadores deve representar informações-chave sobre a estrutura, função e composição do sistema ecológico.

Três preocupações dificultam o uso de indicadores ecológicos como ferramenta de gestão de recursos. (1) Programas de monitoramento frequentemente dependem de um pequeno número de indicadores e deixam de considerar a completa complexidade do sistema ecológico. (2) A escolha de indicadores ecológicos é confundida em programas de gestão que possuem objetivos vagos e de longo prazo. (3) Programas de gestão e monitoramento frequentemente carecem de rigor científico devido à sua falha em usar um protocolo definido para identificar indicadores ecológicos.

Portanto, os indicadores ecológicos precisam capturar as complexidades do ecossistema, mas permanecer simples o suficiente para serem monitorados de maneira fácil

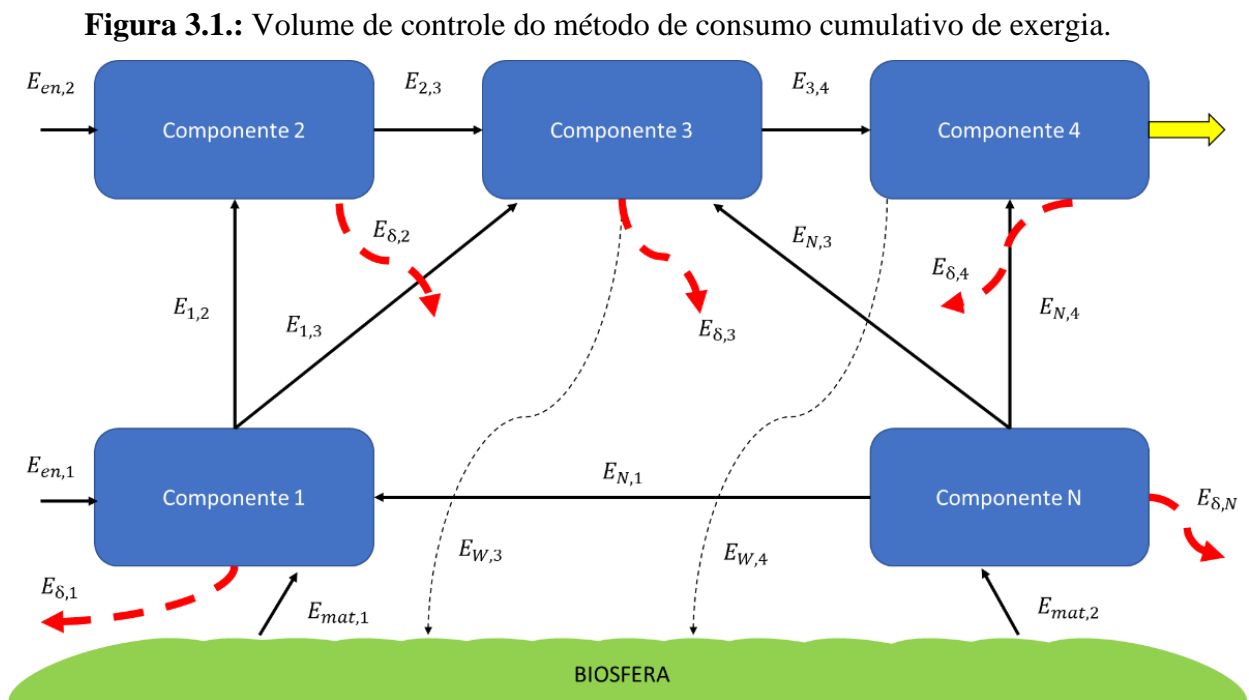
e rotineira. Os indicadores ecológicos devem atender aos seguintes critérios: ser de fácil medição, ser sensíveis a estresses no sistema, responder ao estresse de maneira previsível, ser antecipatórios, prever mudanças que podem ser evitadas por ações de gestão, ser integrativos, ter uma resposta conhecida a perturbações, estresses antropogênicos e mudanças ao longo do tempo, e ter baixa variabilidade de resposta. O desafio é derivar um conjunto gerenciável de indicadores que atendam a esses critérios de forma conjunta.

Considerando todas as informações elencadas, podemos estabelecer que métodos termodinâmicos que permitam quantificar parâmetros de sustentabilidade em processos seriam uma ferramenta valiosa e promissora considerando a atual preocupação com o tema. Algumas das propostas para se estabelecer essa conexão estão descritas na sessão seguinte.

### 3. MÉTODOS DE ANÁLISE EXERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

#### 3.1. O CONSUMO CUMULATIVO DE EXERGIA (CEXC)

Este método consiste em analisar energeticamente toda a cadeia produtiva desde a matéria-prima até o produto final. Foi introduzido por Szargut (1967) e aprimorado por sua equipe (Szargut et al. 1988; Szargut, 1999) e seu volume de controle é representado pela figura 3.1:



Fonte: Adaptado de Scciuba (2021)

A lógica do CExC é que os gastos exergéticos necessários de um processo produtivo ou de transformação, isto é, a exergia incorporada, é igual à soma de toda as inserções de exergia ao longo da linha de produção. Para tal, assume-se que:

- Todas as matérias-primas que entram no volume de controle diretamente do meio ambiente possuem uma “exergia bruta” igual à sua exergia de referência.
- Materiais que entram no volume de controle após terem submetidos a um pré-tratamento são atribuídos um teor de exergia igual ao seu valor bruto mais todos os gastos de exergia necessário para o pré-tratamento.

- A cada  $i$ -ésima etapa de produção genérica, uma parte do fluxo de exergia de entrada é rejeitado para o ambiente em sob a forma de “subprodutos”: esses fluxos, sejam descargas, material de sucata ou energia rejeitada que pode ser, em princípio, recicladas em diferentes linhas de produção, são coletivamente denominado  $\dot{E}_{w,i}$ .
- Os fluxos exergéticos abrangem fontes renováveis e não-renováveis.
- O fluxo de exergia que sai de uma  $i$ -ésima etapa para entrar e produzir a etapa “ $i+1$ ” é considerado produto da etapa “ $i$ ” e combustível da “ $i+1$ ”:  $\dot{E}_{sai,i} = \dot{E}_{entra,i+1}$ . Uma vez que as entradas em “ $i$ ” são substratos para o produto  $\dot{E}_{sai,i}$ , sendo  $\dot{E}_{sai,i} = \dot{E}_{entra,i} - \dot{E}_{w,i} - \dot{E}_{\delta,i}$ , a expressão para um custo cumulativo de exergia para o produto final de uma linha de produção tecnológica é definido por:

$$CExC_N = \frac{\sum \dot{E}_{entra,j}}{\dot{E}_N} = \frac{\dot{E}_{entra,total}}{[\dot{E}_{entra,1} - \sum_1^N \dot{E}_{w,i} - f(\sum_1^N \dot{E}_{\delta,i})]} > 1 \quad (3.1)$$

Onde a função associada ao processo  $f(\sum_1^N \dot{E}_{\delta,i})$  é usada ao invés de uma simples somatória de exergia desperdiçada ( $\sum_1^N \dot{E}_{\delta,i}$ ) para contabilizar cadeias produtivas não lineares. Como por exemplo, as que possuem reciclo no diagrama, a exergia não pode ser somada de maneira direta por conta dos efeitos da realimentação.

Este método constrói uma medida genuína da carga ambiental imposta aos recursos primários disponíveis no ambiente, e, portanto, um indicador ambiental adequado, uma vez que as definições acima implicam que se um produto é gerado a partir dos mesmos materiais brutos por duas linhas tecnológicas diferentes, que possuem diferentes quantidades de perdas irreversíveis, seu  $CExC$  assume dois valores distintos.

Se  $M_X$  kg/ano de uma mercadoria (material ou imaterial) com uma exergia específica  $eX$  [J/kg] são gerados por unidade de tempo, o  $CExC_X$  total é igual a  $CExC * M_X * eX$  [J de exergia primária de recursos/ano]. No caso de múltiplos produtos, regras apropriadas de alocação são sugeridas por Szargut (2005). O  $CExC$  não contém qualquer referência ao circuito monetário da sociedade na qual a planta está localizada e, portanto, é um indicador puramente tecnológico. No entanto, visto que nem a destruição de exergia nem a exergia das descargas são bons indicadores de danos ambientais, o  $CExC$  deve ser considerado apenas como um indicador do grau de exploração de recursos

### 3.2. ANÁLISE DO CUSTO TERMOECOLÓGICO (TEC)

A análise termoeconômica combina a segunda lei da termodinâmica através do conceito de exergia, com economia através do conceito de custo (Valero e Torres (2004), Bejan et al. (1996), El-Sayed (2003), Kotas (1985), Szargut (1988), Valero et al. (2017)). Esta análise ajuda a apontar como, onde e a quantidade de recursos que são consumidos e indica quais melhorias podem ser feitas. Realizado durante a vida útil de uma planta operacional, pode revelar a degradação da eficiência da planta e de seus componentes. A análise termoeconômica é usada, entre outras aplicações, para:

- Avaliar preços racionais da produção da planta com base em critérios físicos.
- Otimizar variáveis de processo específicas para minimizar o custo de produção do sistema, ou seja, otimização global e local.
- Detecção de ineficiências e cálculo de seus efeitos econômicos nas plantas em operação, ou seja, diagnóstico termoeconômico da operação da planta.
- Comparar diversas alternativas de projeto ou decisões de operação e maximização da lucratividade.
- Auditorias energéticas.

Para desenvolver a análise termoeconômica de um sistema energético, é necessário um conjunto de informações que constituem o modelo termoeconômico de um sistema energético. Essas informações incluem: estrutura física, modelo termodinâmico, modelo econômico (nem sempre) e estrutura produtiva.

Existem diversas situações em que não é importante apenas o teor de exergia, mas principalmente a exergia que foi necessária para a produção de um determinado bem. Por exemplo, o teor de exergia de um jarro da Bohemia de belo design, ou de um anel de ouro, ou de uma escultura de pedra é zero em termos práticos. No entanto, grandes quantidades de recursos foram consumidas para produzi-los, e esta é a razão de seu valor. Se os recursos consumidos forem quantificados em termos de exergia, obtém-se a exergia incorporada. Essa exergia incorporada em um determinado bem ou fluxo é o custo exergético desse bem ou fluxo (Valero et al., 2017).

O conceito de custo é intuitivamente bastante claro: o custo de algo é a quantidade de recursos necessários para produzi-lo. Assim, o custo exergético é a quantidade de recursos exergéticos necessários para produzir um fluxo.

Formalmente, o custo exergético é definido da seguinte forma (Valero et al., 2017):

*“Dado um sistema cujos limites, nível de agregação e finalidade de produção de seus componentes foram definidos, o custo exergético do fluxo físico é a quantidade de exergia necessária para produzir esse fluxo.”*

O custo unitário da exergia de um fluxo é o custo da exergia por unidade de exergia.

O custo exergético de um fluxo é uma propriedade emergente, ou seja, só pode ser definido em uma dada estrutura com um conjunto de valores de custo inter-relacionados, ou seja, um valor de custo de um fluxo individual não faz sentido.

A contabilidade do custo da exergia é a base da análise termoeconômica. A teoria do custo da exergia (ECT) fornece uma justificativa para avaliar o custo de produção em sistemas de energia, com base em termos de recursos consumidos e ajuda a diagnosticar e otimizar sistemas de energia complexos.

A teoria do custo de energia pode, então, ser estendida de forma a contemplar também os aspectos ecológicos do processo. A influência desfavorável da atividade humana no ambiente natural pode ser dividida em dois grupos: esgotamento de recursos não renováveis limitados e rejeição de substâncias nocivas. O esgotamento dos recursos não renováveis deve ser minimizado para mantê-los nas próximas gerações (desenvolvimento sustentável).

A exergia pode ser aplicada como uma medida da qualidade dos recursos naturais. A influência das atividades humanas no esgotamento dos recursos naturais pode ser avaliada por meio do cálculo do consumo cumulativo de exergia dos recursos naturais não renováveis (custo termoecológico - TEC).

Em uma cadeia de manufatura, a fase de produção final é precedida pela chamada fase de produção intermediária, que entrega produtos semiacabados ao processo principal. A fase final de fabricação fornece produtos ou sistemas que são usados ou operam de acordo com sua vida útil.

Em seguida, eles podem ser desativados e algumas peças podem ser recicladas e usadas no ciclo de produção novamente. Analisando redes inversas de processos interconectados, sempre chegamos a um estágio preliminar que é a extração de recursos da natureza, mesmo que alguns dos processos sejam baseados em recursos renováveis. As interconexões entre processos ou entre processo e ambiente são representadas por fluxos de materiais, energia, subprodutos, necessidades de transporte e substâncias nocivas.

O objetivo da termoeecologia é expressar um gasto total resultante desses fluxos, e

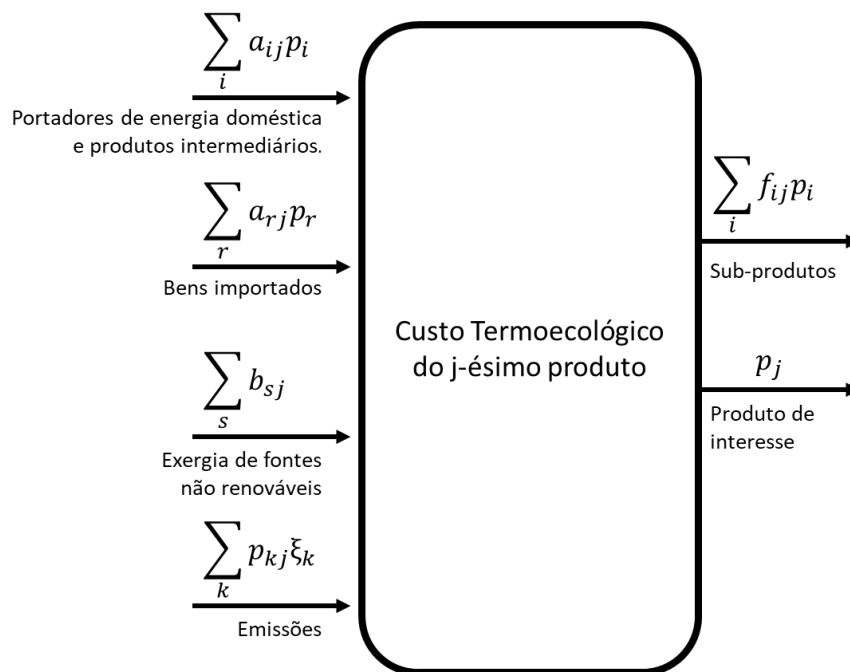


expressá-los como um consumo de recursos naturais retirados do ambiente em uma unidade comum, embora assumindo uma qualidade diferente de/para diferentes recursos. Como diferentes recursos e produtos são consumidos em cada uma das etapas mencionadas da vida operacional da usina, temos que levar em consideração uma medida comum que nos permita comparar todos esses efeitos desfavoráveis (Valero et al., 2017).

A economia da gestão dos recursos naturais depende da acumulação de perdas de exergia em componentes interligados dos sistemas de produção. Essa acumulação pode ser avaliada por meio do custo da exergia. Para aplicar o custo de exergia para recursos naturais, o limite de equilíbrio não pode ser assumido como arbitrário, mas deve atingir o nível de extração de recursos não renováveis da natureza.

Segundo Szargut (Szargut, 1995, 1999; Szargut et al., 2002) o custo termoecológico (TEC) é definido como um consumo cumulativo de exergia não renovável ligada à fabricação de um determinado produto incluindo adicionalmente o consumo resultante da necessidade de compensação de perdas ambientais causadas por a rejeição de substâncias nocivas ao meio ambiente considerando o tempo de vida do processo.

**Figura 3.2:** Balanço de Custo Termoecológico.



**Fonte:** Adaptado de The Exergo Ecology Portal (2020)

O índice de custo termoecológico pode ser determinado pela resolução do conjunto de equações de balanço de custo termoecológico:

$$\rho_j + \sum_i (f_{ij} - a_{ij}) \rho_i - \sum_r a_{rj} \rho_r = \sum_s b_{sj} + \sum_k P_{kj} \xi_k \quad (3.2)$$

Onde  $a_{ij}$  é o coeficiente de consumo do  $i$ -ésimo produto por unidade do  $j$ -ésimo produto principal,  $f_{ij}$  é o coeficiente de co-produção do  $i$ -ésimo produto por unidade do  $j$ -ésimo produto principal,  $a_{rj}$  é o coeficiente de consumo do  $r$ -ésimo produto semi-acabado importado por unidade do  $j$ -ésimo produto principal,  $b_{sj}$  é a exergia do  $s$ -ésimo recurso natural não renovável imediatamente consumido no processo em consideração por unidade do  $j$ -ésimo produto,  $P_{jk}$  é a quantidade do  $k$ -ésimo componente agressivo rejeitado no ambiente natural por unidade do  $j$ -ésimo produto, consumo cumulativo de exergia de recursos não renováveis devido à emissão de uma unidade do  $k$ -ésimo produto residual,  $\xi_k$  representa a parcela de “avaria ambiental” (Equação 3.3),  $p_i$  e  $p_j$  são, respectivamente, custo termoecológico específico do  $i$ -ésimo processo e  $j$ -ésimo produto principal, já o  $p_r$  custo termoecológico específico do produto  $r$ -ésimo importado.

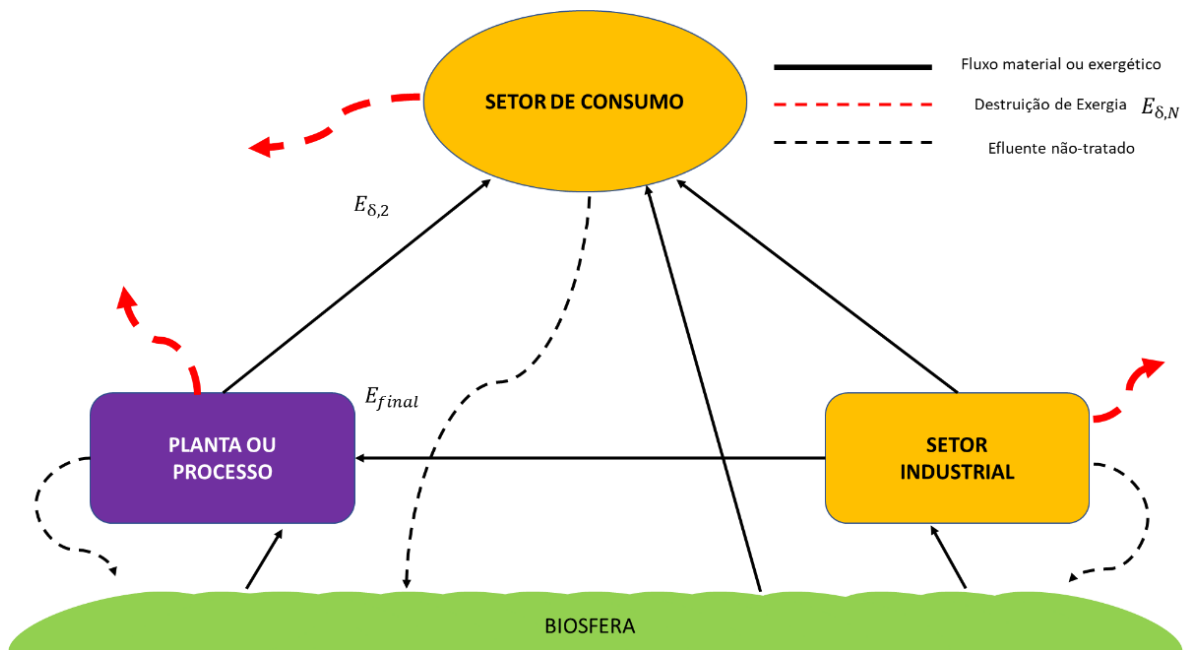
O custo termoecológico (TEC) é calculado como uma razão entre fluxos de exergia e constitui uma medida da exergia primária consumida direta ou indiretamente na linha de produção em análise. Ele pode ser determinado pela resolução de um conjunto de equações de balanço para o custo termoecológico. Com a figura 3.2 de referência, o raciocínio para calcular o custo termoecológico segue as seguintes premissas:

- A entrada de exergia é um consumo líquido de recursos (a extração de minérios e combustíveis fósseis tem um efeito negativo no meio-ambiente);
- O processamento de uma entrada de material e a geração de portadores de energia "secundários" são afetados por duas fontes de danos ambientais potenciais: a exergia gasta na extração e na preparação de materiais acabados e semiacabados (ou seja, sua CExC, que inclui a exergia primária consumida na linha de produção e tem um efeito negativo no meio-ambiente) e as emissões geradas em sua preparação (efeito direto negativo no meio-ambiente);
- Os efluentes podem causar danos potenciais devido à poluição térmica ou química (efeito direto negativo no meio-ambiente);
- Os subprodutos e o produto principal compartilham o TEC de acordo com as regras de alocação baseadas em exergia.

Após o cálculo dos balanços de massa e energia do processo, é possível construir o diagrama de fluxo de exergia (de maneira similar ao da CExC) para identificar a parte não renovável do TEC dos fluxos de materiais e energia ( $\dot{E}_M$  e  $\dot{E}_{NR}$ ). A porção de "avaria ambiental" do TEC para cada fluxo é calculada por meio dos chamados índices monetários de impacto prejudicial. (Szargut, 2005).

$$\xi_k = \frac{\dot{E}_{total,NR} \sigma_k}{DCP + \sum_k P_k \sigma_k} \quad (3.3)$$

**Figura 3.3.:** Volume de controle do TEC (Análise de Custo Termoecológico).



**Fonte:** Adaptado de Scciuba (2021)

Onde  $\dot{E}_{total,NR}$  é o consumo anual de exergia não-renovável das fontes de uma região específica,  $\sigma_k$ , índice monetário de nocividade do k-ésimo resíduo, DCP é o produto cumulativo bruto do setor doméstico na região onde o processo está localizado (Domestic Consumption Product) e  $P_k$ , a emissão anual do k-ésimo efluente rejeitado no ambiente no domínio geográfico de interesse.

O TEC avalia o custo médio em termos de exergia primária gerado pelo "dano ambiental" direto e indireto, causado por cada cadeia tecnológica no país onde está situada. Por exemplo, para um processo em que a única emissão relevante é o  $CO_2$ , o custo total (CExC+TEC) para MX kg/ano do bem X torna-se conforme a equação 3.4.

$$M(cexc * ex_x + tec_{S,CO_2}) = \frac{\dot{E}_{entra,1,S}}{[\dot{E}_{entra,1,S} - \sum_1^N \dot{E}_{w,i,S} - f_s(\sum_1^N \dot{E}_{\delta,i})]} + \sum_k \xi_{k,S} \quad (3.4)$$

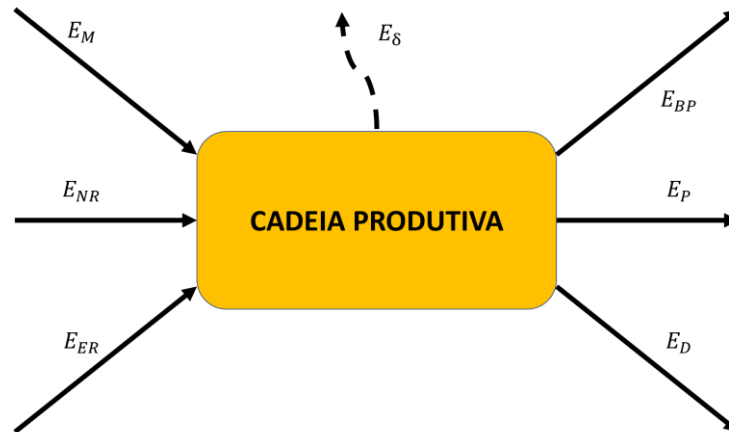
Uma análise de TEC é mais complexa do que uma análise CExC: são necessários dados adicionais, fortemente desagregados, para calcular o consumo total do setor Doméstico, a emissão total de cada poluente no país e o índice monetário de nocividade de cada poluente  $\sigma_j$  necessário para o cálculo do  $w_j$  na equação 3.2. Em sua formulação original, Szargut adotou os valores regulados de taxaço de poluentes, mas também afirmou que um valor mais racional para  $\sigma$  pode ser obtido por meio de uma aplicação iterativa do método TEC.

O TEC tem sido criticado em dois aspectos: em primeiro lugar, seu cálculo é baseado necessariamente em bancos de dados de difícil acesso; em segundo lugar, a definição do índice de impacto prejudicial depende explicitamente do GDPD, que é sabidamente pouco correlacionado à circulação monetária em uma sociedade (Meadows e Randers, 1992; Mebratu, 1998; Mudacumura et al., 2005; Martínez-Alier et al., 2010). Uma dificuldade a ser apresentada aqui é que um baixo TEC não garante sustentabilidade: mesmo que os recursos não renováveis utilizados em um processo de produção sejam completamente substituídos por recursos renováveis, a sociedade como um todo pode ter uma taxa de consumo cumulativo de recursos  $\dot{E}_{acc,H}$  maior do que a disponível no meio-ambiente.

### 3.3. CONSUMO CUMULATIVO DE EXERGIA ESTENDIDO

O método EEC (Sciubba, 1998, 2001, 2021) é, para todos os fins, uma extensão do CExC. Seu axioma fundamental é que os três parâmetros externos (Trabalho, Capital e Custo Ambiental) podem ter atribuídos "valores de exergia equivalentes", sob um conjunto de suposições derivado de um orçamento de exergia da região em que o processo está localizado. Um fluxograma do método estendido cumulativo de exergia se encontra representado na figura 3.4.

**Figura 3.4:** Fluxograma do método estendido cumulativo de exergia.



**Fonte:** Adaptado de Scciuba (2021)

Por se tratar de uma extensão do CExC, existem algumas suposições acerca do método que são idênticas, porém as considerações que os diferenciam são as seguintes:

- O fluxo de entrada de exergia tem origem em fluxos físicos de fontes renováveis e não renováveis e dos fluxos “importados” de exergia material e imaterial de outras regiões;
- Uma “exergia estendida” específica [J/kg ou J/unidade] é definida como a exergia equivalente de cada fator de produção:

$$ee_{energia} = ee_{energia} + ee_{externalidades}$$

$$ee_{material} = ee_{material} + ee_{externalidades}$$

- Uma parte do influxo total de exergia  $\dot{E}_{entra,H}$  é “usada” para sustentar a população (incluída em sua totalidade no setor). Esta porção é chamada de “exergia estendida de trabalho”,  $\dot{E}E_L$ , e é definida igual a  $\alpha \cdot \dot{E}_{in}$ ,  $\alpha < 1$  sendo um coeficiente econométrico externo à teoria que deve ser derivado do orçamento exergético global do país (Sciubba, 2011);
- A circulação monetária em um país,  $M_e$ , é convertido em outro fluxo de exergia, o Capital Exergético Estendido, dado por:

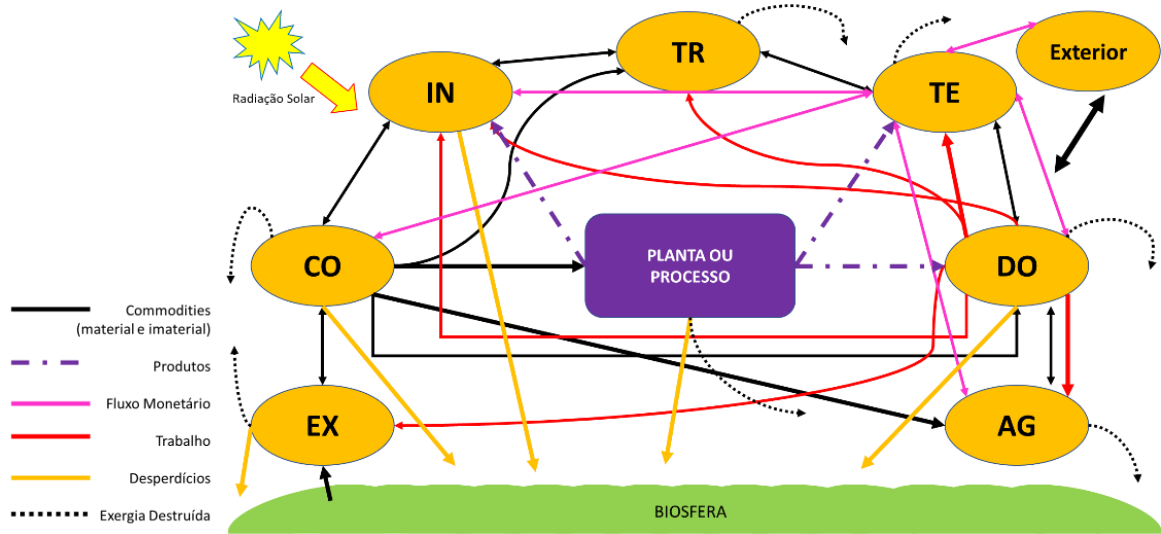
$$\dot{E}E_K = \beta \dot{E}E_L = \alpha \beta \dot{E}_{in} \quad (3.6)$$

- O coeficiente econométrico “ $\beta$ ” é também externo à teoria e deve ser calculada com base nos dados financeiros/monetários para o país sob exame (Sciubba, 2011; Colombo et al., 2013; Biondi e Sciubba, 2021). É possível calcular ambos os indicadores ( $\dot{E}E_L$  e  $\dot{E}E_K$ ) usando estatísticas laborais e monetárias. Essas quantidades representam o montante primário de recursos exergéticos necessários para gerar 1 hora trabalhada e 1 unidade monetária, respectivamente;
- Todas as formas de Exergia Estendida são homogêneas e desfrutam da propriedade aditiva, além de admitirem uma equação de conservação, por serem custos, respeitam o balanço de custos.

A análise da eficiência exergética (EEA) pode ser bem aplicada igualmente nas linhas de produção individuais, mas seus alvos naturais são sistemas complexos, como cidades, distritos industriais e países, nos quais tanto o CExC quanto o TEC podem enfrentar problemas de congruência. No caso de um país, a região na qual o processo está localizado é subdividida em 7 setores (Figura D): doméstico (DO), extrativo (EX), conversão (CO), industrial (IN), transporte (TR), terciário (TE) e agrícola (AG). Cada setor troca fluxos de exergia estendida com outros setores, com o ambiente e/ou com outro sistema chamado "Exterior", que considera as importações/exportações. Cada processo individual “S” troca fluxos de exergia estendida com alguns dos setores; em particular,  $\dot{E}E_L$  é assumido como originado apenas em DO, e  $\dot{E}E_K$  em TE. As commodities importadas são gerenciadas através de TE.

Uma vez que as quantidades acima são conhecidas, é realizado um balanço para a EE (exergia estendida) de cada linha de produção individual, resultando em um custo específico de exergia estendida, EEC [(J) exergia primária / unidade], que reflete a quantidade total de recursos de exergia primária consumidos para a produção de 1 unidade de determinado produto.

**Figura 3.5.: Volume de controle do EEC.**



• **Fonte:** Adaptado de Scciuba (2021)

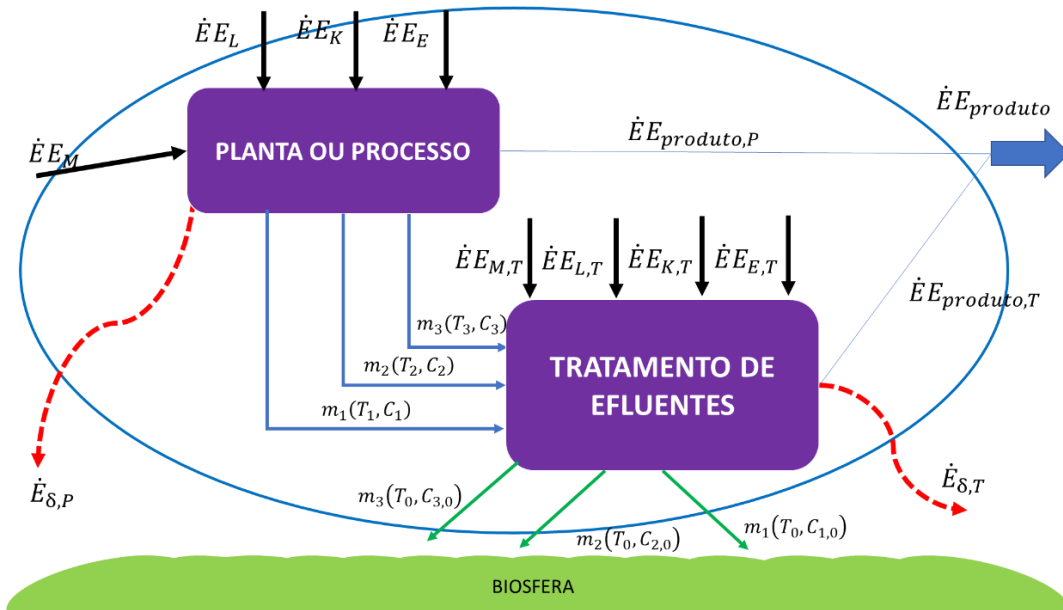
Para calcular a externalidade ambiental, o EEC adota uma abordagem de remediação, conforme o esquema apresentado na figura 3.5, para eliminar ou manter dentro dos limites regulamentados a emissão de  $m_k$  [kg/s] de poluente  $k$ , um processo fictício ou real é inserido a jusante do sistema, que utiliza exergia primária adicional para reduzir a concentração  $C_k$  para o valor limite ( $C_{k0}$  ou  $C_k$ , regulamentado) antes de descarregar o resíduo no meio ambiente. Segue-se a seguinte equação para determinar o EEC:

$$\dot{E}E_{produto} = \dot{E}E_{produto,P} \pm \dot{E}E_{produto,T} + \dot{E}E_{M,T} + \dot{E}E_{E,T} + \dot{E}E_{L,T} + \dot{E}E_{K,T} \quad (3.7)$$

Esse consumo adicional (por unidade de produto do sistema) consiste em materiais ( $\dot{E}E_M$ ), energia ( $\dot{E}E_E$ ), trabalho ( $\dot{E}E_L$ ) e capital ( $\dot{E}E_K$ ): a soma normalizada dessas quantidades, denominada  $ee_{MA}$  (exergia estendida do ambiente), é adicionada ao  $ee_C$  (custo exergético estendido).

O cálculo do  $ee_C$  requer um esforço de coleta de dados semelhante ao do TEC: são necessários dados altamente desagregados para cada setor, para os processos de tratamento de efluentes tecnologicamente viáveis e para os coeficientes econômicos  $\alpha$  e  $\beta$ . Tem-se por fim, uma representação esquemática da abordagem produtiva do EEC ilustrada na figura 3.6.

**Figura 3.6:** Abordagem produtiva do EEC.



**Fonte:** Adaptado de Sciubba (2021)

### 3.4. A TRILHA EXERGÉTICA

A Trilha Exergética ExF (Exergy Footprint) é definida em Sciubba (2012) como a quantidade de exergia primária (em J) consumida globalmente ao longo da vida de uma mercadoria, incluindo custos de materiais, energia, trabalho, capital e remediação ambiental, calculados com base na vida útil.

O ExF é a integral no tempo do EEC. Destaca-se que a Segunda Lei impõe um limite numérico inferior: mesmo que pudéssemos adotar uma "reciclagem perfeita", alguma fonte externa de exergia seria necessária para sustentar o processo e compensar a destruição de exergia. Trata-se aqui a concepção de que a sustentabilidade termodinâmica ( $EEC = 1$  quando calculada para toda a sociedade) é impossível na prática, portanto, seria mais adequado falar de um "grau de insustentabilidade":

$$\xi = \frac{(1 - EEC)}{EEC} \quad (3.8)$$

Esse método propicia informações úteis e particulares dele em diversos níveis, como:

- Se duas cadeias tecnológicas diferentes produzem uma mercadoria X (material ou imaterial), aquela com um ExF menor é mais sustentável;



- Uma vez que o custo de remediação ambiental está incluído no cálculo, tecnologias "mais limpas" têm, *ceteris paribus*, uma ExF menor;
- Se for considerada uma modificação no processo que altera a "mistura energética" da entrada ou da saída (por exemplo, substituir uma caldeira elétrica por uma movida a combustível fóssil ou vice-versa), o ExF automaticamente leva em conta a diferença da "qualidade" da entrada ou saída. O mesmo vale para substituição de materiais: se uma ou mais entradas de materiais forem substituídas por outras com um CExC e um  $ee_c$  diferentes, isso é automaticamente refletido no ExF;
- Em um nível mais agregado, o ExF pode ser usado para avaliar o grau de insustentabilidade de diferentes infraestruturas. Por exemplo, entre dois caminhos planejados para estradas, ou entre uma ponte sobre um rio e um túnel, ou entre dois locais diferentes para um aeroporto, etc.;
- Em um nível ainda mais agregado, o ExF pode fornecer informações exclusivas sobre o diferente grau de insustentabilidade de diferentes políticas sociais, como qual mistura energética adotar, se promover ou não sistemas de conversão de energia específicos ou produções agrícolas, se importar materiais ou bens finitos de outros países ou produzi-los internamente.

Ao se observar as rotinas de cálculo para cada um dos quatro métodos apresentados é possível constatar que a base de todos eles é a análise exérgica dos processos analisados. Ainda que haja outras similaridades entre eles, a exérgia é ponto de partida para o tratamento termodinâmico do conceito de sustentabilidade. Independente do volume de controle que essas técnicas abrangem e das considerações realizadas, o princípio das análises reside no balanço exérgico dos processos.

O EEC (método estendido cumulativo de exérgia) é uma primeira extensão do CExC (cálculo cumulativo de exérgia), onde são adicionadas as externalidades do processo na análise do custo exérgico ao longo de toda a cadeia produtiva. Já a ExF (trilha exérgica) vai alcançar um nível ainda mais complexo de indicador ambiental. De maneira resumida, pode ser chamada de "potência exérgica", uma vez que ela é a integral no tempo do EEC.

Por último, o TEC adiciona externalidades bastantes complexas no que diz respeito às suas mensurações e precisões de dados, como a emissão de poluentes e o índice monetário do volume de controle especificado. É um indicador de robustez significativa quando o

processo analisado e suas variáveis são conhecidos e de fácil medição, ainda que exija um esforço de cálculo sensível e trabalhoso.

#### **4. ANÁLISE EXERGÉTICA E DE SUSTENTABILIDADE**

Dos métodos destacados na seção anterior foram escolhidos dois para a apresentação em forma de exemplos. Considerando que toda e qualquer análise relacionada à sustentabilidade tem como base a análise exergética, o primeiro exemplo apresenta uma análise exergética detalhada para um processo industrial específico, no caso, uma caldeira para geração de vapor.

O segundo método escolhido para exemplificação foi o método TEC, aplicado a um alto forno. Destaca-se que a aplicação do custo termoecológico não é detalhada em etapas de cálculo, uma vez que o objetivo é evidenciar a metodologia como ferramenta útil para identificar sustentabilidade e oportunidades de otimização em processos.

##### **4.1. ANÁLISE EXERGÉTICA PARA UMA CALDEIRA**

A Figura 4.1 apresenta o esquema de uma caldeira a vapor com capacidade nominal de 260 t/h. Os parâmetros operacionais básicos estão incluídos na Tabela 4.1. A eficiência energética e exergética da caldeira em questão devem ser determinadas. A caldeira de leito fluidizado considerada pode ser alimentada por carvão energético, tratada como variável 1 no exemplo, ou por uma mistura de diferentes tipos de carvão e biomassa, variável 2.

Além disso, é apresentada uma avaliação detalhada da energia e exergia. Os cálculos são baseados em medições de dados reais da caldeira existente. Os dados de entrada para a análise estão incluídos na Tabela 4.2.

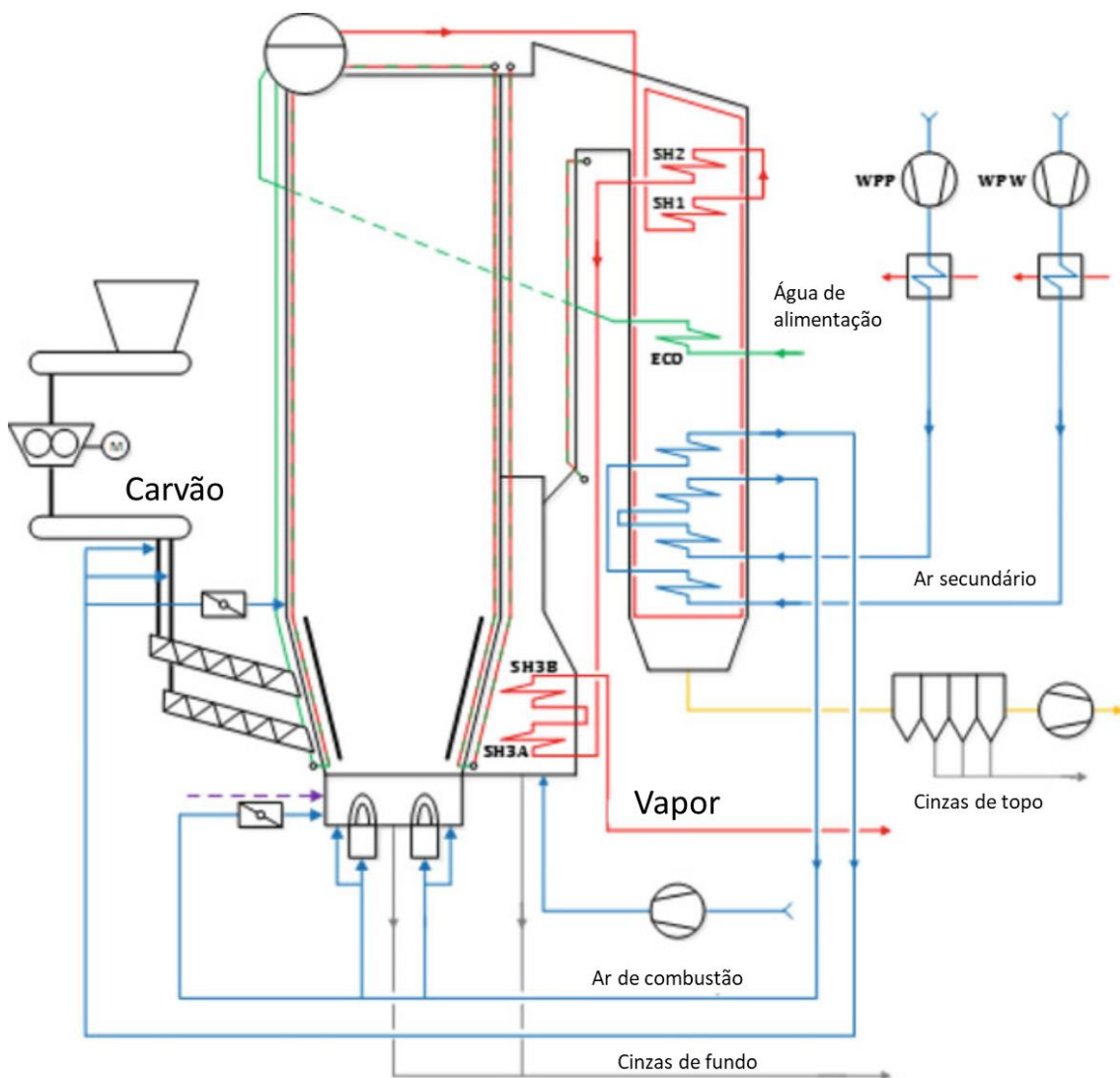
A proporção dos combustíveis queimados é conhecida: onde o consumo de carvão duro residual é  $x_2 = 0,23 \text{ kg } F2/\text{kg } F1$  e, da mesma maneira, o consumo de biomassa  $x_3 = 0,20 \text{ kg } F3/\text{kg } F1$ .

**Tabela 4.1:** Dados operacionais da caldeira.

Parâmetro	Valor	Unidade
Dados técnicos — CFB OF 260 boiler		
Capacidade máxima da caldeira	260	Mg/h
Pressão do vapor	13,7	MPa
Temperatura do vapor	540	°C
Temperatura de água de alimentação	220	°C
Temperatura dos gases de combustão	130	°C
Eficiência energética	91	%
Valor de aquecimento inferior do combustível (LHV)	15,7	MJ/kg

**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017)

**Figura 4.1:** Esquema de uma caldeira a vapor utilizada como exemplo para o cálculo de eficiência exérgica.



**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017)

**Tabela 4.2:** Dados de entrada e calculados para a caldeira (Stanek et al, 2017).

Nº	Parâmetro	Símb.	Unidade	Variável 1	Variável 2
<b>Parâmetros de vapor e água de alimentação</b>					
1	Vazão mássica de vapor	$m_p$	kg/s	64,55	63,17
2	Pressão do vapor	$P_p$	MPa	12,22	13,27
3	Temperatura do vapor	$T_p$	°C	539,2	535,3
4	Temperatura da água de alimentação	$T_{wz}$	°C	219,9	217,9
5	Pressão da água de alimentação	$P_{wz}$	MPa	13,31	14,15
<b>Características do combustível(s) e produtos da combustão</b>					
<b>Combustível básico (1) - carvão duro</b>					
6	Fração mássica de carbono C	$c_1$	kg/kg de combustível	0,5084	0,4996
7	Fração mássica de hidrogênio H	$h_1$	kg/kg de combustível	0,0328	0,0324
8	Fração mássica de oxigênio O	$o_1$	kg/kg de combustível	0,0816	0,0894
9	Fração mássica de nitrogênio N	$n_1$	kg/kg de combustível	0,0086	0,0082
10	Fração mássica de enxofre S	$s_1$	kg/kg de combustível	0,0156	0,0126
11	Fração mássica de umidade H <sub>2</sub> O	$w_1$	kg/kg de combustível	0,198	0,228
12	Fração mássica de cinzas	$p_1$	kg/kg de combustível	0,155	0,13
13	Valor de (LHV)	$W_{d1}$	kg/kg de combustível	19380	18704
<b>Características do combustível(s) e produtos da combustão</b>					
<b>Combustível adicional (2) - carvão duro residual</b>					
14	Fração mássica de carbono C	$c_2$	kg/kg de combustível	0,21	-
15	Fração mássica de hidrogênio H	$h_2$	kg/kg de combustível	0,01	-
16	Fração mássica de oxigênio O	$o_2$	kg/kg de combustível	0,06	-
17	Fração mássica de nitrogênio N	$n_2$	kg/kg de combustível	0,01	-
18	Fração mássica de enxofre S	$s_2$	kg/kg de combustível	0,01	-
19	Fração mássica de umidade H <sub>2</sub> O	$w_2$	kg/kg de combustível	0,40	-
20	Fração mássica de cinzas	$p_2$	kg/kg de combustível	0,31	-

21	Valor de (LHV)	$W_{d2}$	kg/kg de combustível	6.932	-
<b>Características do combustível(s) e produtos da combustão</b>					
<b>Combustível adicional (3) – biomassa</b>					
22	Fração mássica de carbono C	$c_3$	kg/kg de combustível	0,47	-
23	Fração mássica de hidrogênio H	$h_3$	kg/kg de combustível	0,06	-
24	Fração mássica de oxigênio O	$o_3$	kg/kg de combustível	0,33	-
25	Fração mássica de nitrogênio N	$n_3$	kg/kg de combustível	0,04	-
26	Fração mássica de enxofre S	$s_3$	kg/kg de combustível	0,00	-
27	Fração mássica de umidade H <sub>2</sub> O	$w_3$	kg/kg de combustível	0,07	-
28	Fração mássica de cinzas	$p_3$	kg/kg de combustível	0,04	-
29	Valor de aquecimento inferior (LHV)	$W_{d3}$	kg/kg de combustível	18.428	-
<b>Parâmetros dos gases de combustão</b>					
30	Fração molar de CO <sub>2</sub>	[CO <sub>2</sub> ]	mol/mol ss	0,14	0,14
31	Fração molar de CO	[CO]	mol/mol ss	0,00	0,00
32	Temperatura dos gases de exaustão	$T_{sp}$	°C	141,00	135,00
33	Pressão dos gases de exaustão	$P_{sp}$	Mpa	0,10	0,10
<b>Parâmetros ambientais</b>					
34	Pressão	$P_{ot}$	Mpa	0,10	0,10
35	Temperatura	$T_{ot}$	°C	10,20	10,20
36	Umidade relativa	$\varphi_{ot}$	%	72,00	72,00
<b>Parâmetros dos produtos de combustão sólidos</b>					
37	Capacidade calorífica específica	$c_{st}$	kJ/(kgK)	0,88	0,88
38	Entropia física da cinza de topo	$S_{f,pt}$	kJ/(kgK)	0,41	0,41
39	Entropia física da cinza de fundo	$S_{f,pd}$	kJ/(kgK)	0,97	0,97
40	Fração mássica de carbono na cinza de topo	$c_{pt}$	-	0,01	0,01
41	Fração mássica de carbono na cinza de fundo	$c_{pd}$	-	0,01	0,01
42	Proporção de cinza de topo	$X_{pt}$	kg pt/kg pd	0,86	0,86

**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017)

Há também o coeficiente de contração das cinzas  $\alpha = 0,9$ . Quantidades específicas de elementos particulares em cada um dos combustíveis estão incluídas na Tabela 3.3.

O grau molar de umidade do ar de combustão resulta da equação 4.1.

$$X_{Z,a} = \frac{\varphi_{ot} p_s(t_{ot})}{p_{ot} - \varphi_{ot} p_s(t_{ot})} = 0,009 \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kmol } s. s.} \quad (4.1)$$

Requisitos teóricos mínimos são elencados para ar de combustão seco (p.s.) para combustíveis:

$$(n_{a,\min})_1 = \frac{(n'_C)_1 + 0,5(n'_{H_2})_1 - (n'_{O_2})_1}{0,21} = 0,231 \frac{\text{kmol } p. s.}{\text{kg } F1} \quad (4.2)$$

$$(n_{a,\min})_2 = \frac{(n'_C)_2 + 0,5(n'_{H_2})_2 - (n'_{O_2})_2}{0,21} = 0,0932 \frac{\text{kmol } p. s.}{\text{kg } F2} \quad (4.3)$$

$$(n_{a,\min})_3 = \frac{(n'_C)_3 + 0,5(n'_{H_2})_3 - (n'_{O_2})_3}{0,21} = 0,2134 \frac{\text{kmol } p. s.}{\text{kg } F3} \quad (4.4)$$

**Tabela 4.3:** Quantidade específica de elementos particulares em combustíveis.

Equação	Unidade	Combustível		
		Carvão i=1	Carvão residual i=2	Biomassa i=3
$n'_C = \frac{c}{12} + \frac{x}{12}$	$\frac{\text{kmol } C}{\text{kg } i}$	0,04285	0,01779	0,03949
$n'_{H_2} = \frac{h}{2}$	$\frac{\text{kmol } H_2}{\text{kg } i}$	0,0164	0,0073	0,031
$n'_{H_2O} = \frac{w}{18}$	$\frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kg } i}$	0,011	0,022	0,0036
$n'_{N_2} = \frac{n}{28}$	$\frac{\text{kmol } N_2}{\text{kg } i}$	0,00031	0,00024	0,00129
$n'_{O_2} = \frac{o}{32}$	$\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kg } i}$	0,00255	0,00186	0,01018

**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017).

Uma vez que há mais de um combustível queimando simultaneamente na caldeira, nos cálculos posteriores, os resultados devem ser relacionados a um dos combustíveis. No exemplo apresentado, os cálculos estão relacionados com a quantidade de base combustível—carvão (F1). O consumo mínimo teórico total de ar de combustão relacionado

à unidade de carvão (F1) resulta em  $0,295 \frac{kmol p.s.}{kg F1}$  equação 4.5.

$$n_{a,min} = (n_{a,min})_1 + X_2(n_{a,min})_2 + X_3(n_{a,min})_3 \quad (4.5)$$

#### 4.1.1. Balanço de massa

Uma vez elencadas todas as propriedades que envolvem o processo sugerido como exemplo para o cálculo da eficiência exergetica, Stanek et al. (2017) procede realizando os balanços tradicionais, partindo do balanço de massa elemental seguindo para o balanço da quantidade de cinzas e finalizando com o balanço global. A sequência de passos sugerida pelo autor pode ser acompanhada a partir da Tabela 4.4.

**Tabela 4.4.** Balanços de massa para a caldeira.

Carbono	
$(n'_C)_1 + x_2(n'_C)_2 + x_3(n'_C)_3 = n''_{ss}([CO]_2 + [CO]) + g_{pl} \frac{c_{pl}}{12} + g_{pd} \frac{c_{pd}}{12}$	(4.6)
Hidrogênio	
$(n'_{H_2})_1 + x_2(n'_{H_2})_2 + x_3(n'_{H_2})_3 + n'_a X_{Z,a} = n''_{ss} X_{Z,s}$	(4.7)
Nitrogênio	
$(n'_{N_2})_1 + x_2(n'_{N_2})_2 + x_3(n'_{N_2})_3 + 0,79n'_a = n''_{ss}[N_2]$	(4.8)
Oxigênio e Hidrogênio	
$(n'_{O_2})_1 + x_2(n'_{O_2})_2 + x_3(n'_{O_2})_3 + 0,21n'_a - 0,5[(n'_{H_2})_1 + x_2(n'_{H_2})_2 + x_3(n'_{H_2})_3] = n''_{ss}([CO_2] + [CO] + [O_2])$	(4.9)
Frações molares	
$[CO_2] + [CO] + [O_2] + [N_2] = 1,0$	(4.10)
Balanço global de cinzas	
$a(p_1 + x_2p_2 + x_3p_3) = g_{pl}(1 - c_{pl}) + g_{pd}(1 - c_{pd})$	(4.11)
Balanço de cinzas de topo	
$ax_{pl}(p_1 + x_2p_2 + x_3p_3) = g_{pl}(1 - c_{pl})$	(4.12)

É importante destacar que o autor sugere que os balanços sejam feitos em relação ao ar seco. Dessa forma, o balanço que envolve o elemento oxigênio, em particular, está acoplado ao balanço do hidrogênio, razão pela qual se remove do balanço todo o oxigênio que já foi contabilizado em balanços anteriores como constituinte das moléculas de água. Caso essa correção não fosse feita o balanço contabilizaria essa quantidade de oxigênio duas vezes uma vez que o balanço de hidrogênio soma a massa de água. A partir das equações 4.6 a 4.12, foi elaborada a tabela 4.5 com os valores calculados.

**Tabela 4.5.** Cálculos provenientes dos balanços de massa aplicados ao processo analisado.

Gases de combustão secos (s.s.)	$n''_{ss} = 0,3924 \frac{kmol \text{ s.s.}}{kmol \text{ F1}}$
Quantidade específica de ar de combustão	$n'_a = 0,3989 \frac{kmol \text{ p.s.}}{kmol \text{ F1}}$
Fração molar de Nitrogênio em gases de combustão	$[N_2] = 0,8047$
Fração molar de Oxigênio nos gases de combustão	$[O_2] = 0,0563$
Quantidade específica de cinzas de topo	$g_{pt} = 0,2025 \frac{kg}{kg \text{ carvão}}$
Quantidade específica de cinzas de fundo	$g_{pd} = 0,0326 \frac{kg}{kg \text{ carvão}}$
Grau de umidade em gases de combustão	$X_{z,s} = 0,07103 \frac{kmol \text{ H}_2\text{O}}{kmol \text{ s.s.}}$

Para o cálculo da quantidade de ar de combustão ( $n'_a$ ), a razão de excesso de ar assume o valor  $\lambda = 1,352$ .

#### 4.1.2. Balanços de energia e entropia

Os resultados dos balanços de substâncias são a base para a análise de energia e exergia de um processo. Na análise apresentada, o método indireto foi aplicado para determinar a eficiência energética da caldeira. Isto ocorre, pois ao utilizar o método direto, são necessários dados de consumo do combustível, o que por vezes gera muitos erros em meio a tantas mensurações. O indireto, por sua vez, se baseia no balanço de perdas relativas, ou seja, não



é preciso conhecer o consumo do combustível, mas sim, deduz-se do valor total aquilo que se perde na geração de entropia. Neste exemplo, Stanek et al. (2017) segue a equação 4.13.

$$n_{E,k} = 1 - \sum S_i = 1 - (S_{w,f} + S_{w,ch} + S_{st,f} + S_{st,ch} + S_{ot}) \quad (4.13)$$

Entalpia física e entropia em relação à quantidade de gases de combustão usando os resultados apresentados na Tabela 4.5 são calculados a partir das equações 4.14 e 4.15.

$$\Delta(Mh)_{ss}|_{T_{ot}}^{T_{sp}} = \sum_i \Delta(Mh)_i|_{T_{ot}}^{T_{sp}} + X_{Zs} \Delta(Mh)_{H_2O}|_{T_{ot}}^{T_{sp}} \quad (4.14)$$

$$\Delta(Ms)_{ss}|_{T_{ot}}^{T_{sp}} = \sum_i \Delta(Ms)_i|_{T_{ot}}^{T_{sp}} + X_{Zs} \Delta(Ms)_{H_2O}|_{T_{ot}}^{T_{sp}} \quad (4.15)$$

**Tabela 4.6:** Entalpia física e entropia dos gases de combustão

$\Delta(Mh)_{ss} _{T_{ot}}^{T_{sp}}$	4314	$\frac{kJ}{kmol \text{ s. s.}}$
$\Delta(Ms)_{ss} _{T_{ot}}^{T_{sp}}$	12,5	$\frac{kJ}{kmol \text{ s. s.}}$

Os cálculos provenientes do método indireto estão apresentados na tabela 4.7

**Tabela 4.7:** Entalpia e Entropia dos gases de combustão.

Parâmetro	Unidade	[CO2]	[CO]	[O2]	[N2]	Xzs
$\Delta(Mi) _{T_{ot}}^{T_{sp}}$	kJ/kmol s. s. °C	5134	3818	3888	3811	4436
$\Delta(Ms) _{T_{ot}}^{T_{sp}}$	kJ/kmol s. s. °C	14,83	11,07	11,27	11,05	12,86

**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017).

As perdas energéticas, tanto devido à entalpia física quanto à química, foram calculadas seguindo as equações da Tabela 4.8. Onde o LHV do monóxido de carbono (CO) é  $W_{dco} = 282.984 \frac{kJ}{kmol}$  e o do carbono (C) é  $W_{dc} = 32.762 \frac{kJ}{kmol}$ . Este valor é contabilizado apenas para o CO, pois é o produto de uma queima incompleta, e, portanto,

uma irreversibilidade considerada no balanço de entropia. Enquanto a temperatura de cinzas é  $t_z = 835^\circ\text{C}$ .

**Tabela 4.8:** Equações das perdas energéticas devido às entalpias física e química dos gases de combustão e dos produtos sólidos.

Perda devido à entalpia física dos gases de combustão	$S_{wf} = \frac{n''_{ss} \Delta(Mh)_{ss}  _{T_{ot}}^{T_{sp}}}{W_{d1} + x_2 W_{d2} + x_3 W_{d3}} \quad (4.16)$
Perda devido à entalpia química dos gases de combustão	$S_{wch} = \frac{n''_{ss} [CO] W_{dco}}{W_{d1} + x_2 W_{d2} + x_3 W_{d3}} \quad (4.17)$
Perda devido à entalpia física dos produtos sólidos da combustão	$S_{st,f} = \frac{(g_{pl} c_{st} t_{sp} + g_{pd} c_{pd}) W_{dc}}{W_{d1} + x_2 W_{d2} + x_3 W_{d3}} \quad (4.18)$
Perda devido à entalpia química dos produtos sólidos da combustão	$S_{st,ch} = \frac{g_{pl} c_{pl} + g_{pd} c_{st} t_z}{W_{d1} + x_2 W_{d2} + x_3 W_{d3}} \quad (4.19)$

**Fonte:** Elaborado pelo autor com dados de Stanek et al. (2017)

Na sequência são apresentados os resultados de todas as perdas, não só as enumeradas pela tabela 4.7, mas também a perda relativa às trocas de calor com o ambiente, que foi fornecida diretamente no exemplo.

**Tabela 4.9.:** Valores percentuais das perdas devido entalpias (entropia gerada percentualmente).

Perda devido à entalpia física dos gases de combustão	$S_{wf}$	6,868%
Perda devido à entalpia química dos gases de combustão	$S_{wch}$	0,0059%
Perda devido à entalpia física dos produtos sólidos da combustão	$S_{st,f}$	0,4235%
Perda devido à entalpia química dos produtos sólidos da combustão	$S_{st,ch}$	0,1992%
Perda relativa às trocas de calor com o ambiente	$S_{ot}$	0,7%

**Fonte:** Elaborado pelo autor com dados de Stanek et al. (2017)

Esses dados foram aplicados para cálculo da energia química dos combustíveis consumidos na caldeira analisada, seguindo a equação 4.20. O resultado obtido foi de 176029 kW.

$$E_{ch} = m_{F,1} W_{d1} + m_{F,2} W_{d2} + m_{F,3} W_{d3} \quad (4.20)$$

A potência útil da caldeira, por sua vez, foi de 161607 kW, que foi calculada a partir da equação 4.21.

$$Q_{uz} = m_p(h_p - h_{wz}) \quad (4.21)$$

Os combustíveis consumidos na caldeira analisada foram alimentados conforme as vazões mássicas presentes na tabela 4.10.

**Tabela 4.10:** Dados de vazão mássica da caldeira.

Carvão (F1)	$m_{F,1}$	$7,14 \frac{kg}{s}$
Carvão residual (F2)	$m_{F,2}$	$1,63 \frac{kg}{s}$
Biomassa (F3)	$m_{F,3}$	$1,43 \frac{kg}{s}$

**Fonte:** Stanek et al. (2017)

Através da equação 4.13 calcula-se a eficiência energética do sistema  $\eta_{(E,k)}=91,8\%$ . Este valor representa a quantidade de energia proveniente da queima dos combustíveis que alimentam a caldeira que promovem o aquecimento da água para geração de vapor nas condições especificadas.

Vale destacar que, até o momento, a análise da eficiência energética da caldeira se restringiu aos aspectos quantitativos do processo. Ainda que aqui se considere as etapas de perda de eficiência em decorrência da ação da segunda lei aplicada ao processo de queima. Esta análise permite apenas identificar as irreversibilidades da reação de queima e não contabiliza as irreversibilidades inerentes à operação como um todo, que é o foco da análise exérgica.

Analisando o exemplo proposto apenas do ponto de vista quantitativo, poderíamos argumentar que a caldeira em questão apresenta eficiência considerada elevada, sobretudo quando essa eficiência é comparada à eficiência de máquinas térmicas convencionais. Isto está de acordo com o exemplo descrito por Dincer e Rosen (2021) sobre um aquecedor elétrico de ambientes. Lá a eficiência na conversão da energia elétrica em calor era de praticamente 100%, enquanto que para a geração e calor via consumo de combustível fóssil em uma caldeira, o valor esteja próximo de 92%. Apenas a análise exérgica poderia

acrescentar uma discussão sobre a real eficiência desse processo em termos do aproveitamento da energia produzida pela queima.

#### 4.1.3. Análise Exergética

A análise de eficiência energética fornece um panorama bastante importante do ponto de vista da quantidade de energia que se obtém a partir da combustão de combustível numa caldeira, ao passo que também é limitante se ater somente a isso. Conduzindo uma análise de eficiência exergética, Stanek et al. (2017) dá visibilidade à qualidade da energia envolvida nesse processo.

A partir do balanço de exergia, são calculadas as perdas internas de exergia na caldeira,  $[\delta B]_{-D}$ . Na sequência, a determinação das partes específicas do balanço de exergia da caldeira é explicitada em etapas. Começando pelo balanço global exergético.

$$B_F = B_P + \delta B_L + \delta B_D \quad (4.22)$$

Onde  $B_F$  é a exergia de entrada do processo,  $B_P$  é a exergia contida nos produtos,  $\delta B_L$  e  $\delta B_D$  são as perdas externas e internas ao processo, respectivamente.

Na entrada da caldeira, tem-se que a exergia total é a soma das multiplicações entre as vazões mássica ( $m_{F,1}$ ,  $m_{F,2}$ ,  $m_{F,3}$ ) e as exergias químicas ( $b_{ch,1}$ ,  $b_{ch,2}$ ,  $b_{ch,3}$ ) seguindo a equação 4.23:

$$B_F = m_{F,1}b_{ch,1} + m_{F,2}b_{ch,2} + m_{F,3}b_{ch,3} \quad (4.23)$$

A exergia química dos combustíveis queimados na caldeira foi determinada utilizando as equações 2.25 a 2.28 (Tabela 4.5).

**Tabela 4.10:** Exergias químicas dos combustíveis.

Carvão (F1)	$b_{ch,1}$	$21,334 \frac{kJ}{kg}$
Carvão residual (F2)	$b_{ch,2}$	$8,570 \frac{kJ}{kg}$
Biomassa (F3)	$b_{ch,3}$	$20,754 \frac{kJ}{kg}$

**Fonte:** Stanek et al. (2017)

A exergia total dos combustíveis consumidos na caldeira é, portanto.

Exergia do combustível consumido na caldeira	$B_F$ 192108 kW
--	-----------------

Adiante, calculou-se a exergia do produto útil da caldeira, ao realizar o balanço na saída, considerando a geração de entropia pelos subprodutos, seguindo a equação 4.24.

$$B_P = m_P(b_P - b_{WZ}) = m_P[(h_P - h_{WZ}) - T_{ot}(s_P - s_{WZ})] \quad (4.24)$$

Exergia do produto útil da caldeira	$B_P$ 86460 kW
-------------------------------------	----------------

Nos demais termos do balanço exergético, tem-se tanto as perdas de exergia externas ao processo, quanto as internas. Primeiramente, contabiliza-se as perdas externas seguindo a equação 4.25.

$$\delta B_L = \delta B_{f,sp} + \delta B_{ch,sp} + \delta B_{f,pl} + \delta B_{ch,pl} + \delta B_{f,pd} + \delta B_{ch,pd} \quad (4.25)$$

Os índices “*f*” e “*ch*” dizem respeito às exergias físicas e químicas, da mesma maneira que “*sp*”, “*pl*” e “*pd*” fazem referência aos gases de combustão, cinzas de topo e cinzas de fundo, respectivamente (Tabela 4.11).

**Tabela 4.11:** Equações para os cálculos das exergias física e química dos gases de combustão, cinzas de topo e de fundo.

$\delta \dot{B}_{f,sp}$	$m_{F,1} n_{SS}'' \left( \Delta(Mh) \Big _{T_{ot}}^{T_{sp}} - T_{ot} \Delta(Ms) \Big _{T_{ot}}^{T_{sp}} \right)$	(4.26)
$\delta \dot{B}_{ch,sp}$	$m_{F,1} n_{SS}'' \left( (Mb)_{ch,1} + (Mb)_{ch,2} \right)$	(4.27)
$\delta \dot{B}_{f,pl}$	$m_{F,1} g_{pl} (c_{st} t_{sp} - T_0 s_{f,pl})$	(4.28)
$\delta \dot{B}_{ch,pl}$	$m_{F,1} g_{pl} c_{pl} W_{d,c} \beta_C$	(4.29)
$\delta \dot{B}_{f,pd}$	$m_{F,1} g_{pd} (c_{st} t_z - T_0 s_{f,pd})$	(4.30)
$\delta \dot{B}_{ch,pd}$	$m_{F,1} g_{pd} c_{pd} W_{d,c} \beta_C$	(4.31)

**Fonte:** Stanek et al. (2017)

As exergias química e física dos produtos sólidos de combustão (cinzas de topo e de fundo) segue as equações 4.26 a 4.31 para cálculo e seus respectivos valores.

**Tabela 4.12:** Exergias químicas e físicas dos gases de combustão, cinzas de topo e de fundo.

$\delta\dot{B}_{f,sp}$	2166 kW
$\delta\dot{B}_{ch,sp}$	5794 kW
$\delta\dot{B}_{f,pl}$	11,52 kW
$\delta\dot{B}_{ch,pl}$	736,6 kW
$\delta\dot{B}_{f,pd}$	107,2 kW
$\delta\dot{B}_{ch,pd}$	41,44 kW

**Fonte:** Stanek et al. (2017)

Ao utilizar a equação 4.25 para contabilizar as perdas externas totais de exergia, tem-se o resultado de 8.857 kW.

$$\delta\dot{B}_L = 8857 \text{ kW}$$

Como último termo do balanço a ser determinado, as perdas internas de exergia são calculadas a partir da equação (4.22), isolando o termo  $\delta B_D$ .

$$\delta B_D = B_F - B_P - \delta B_L = 192108 - 86460 - 8857 = 96792 \text{ kW} \quad (4.32)$$

Utilizando os resultados da exergia de entrada (192108 kW), da exergia dos produtos (86460 kW) e das perdas externas (8857 kW), tem-se que 96792 kW representam as perdas internas ao processo de combustão da caldeira analisada.

Cabe aqui pontuar esta etapa de cálculo com maior cuidado. A melhoria energética de processos atua justamente nas mudanças que visam minimizar as perdas. Ou seja, quaisquer ações do engenheiro que contribuam para a diminuição dos termos  $\delta B_L$  e  $\delta B_D$  terão efeito sobre o aproveitamento energético do processo. Aqui se encaixam desde mudanças na matriz energética do processo até ações que minimizem a perda interna de exergia.

Uma forma mais intuitiva de se enxergar as perdas exergéticas é através da análise das perdas de exergia relativa. Observando os dados de exergia sob essa perspectiva é possível

identificar onde a perda de exergia é mais significativa e, eventualmente, atuar sobre esta etapa a fim de melhorá-la do ponto de vista energético.

Perdas relativas de exergia são determinadas como uma parcela do total de energia do combustível entregue para a caldeira, conforme a tabela 4.13.

**Tabela 4.13:** Cálculo das perdas de exergia externa relativas.

$\varepsilon_{f,sp}$	$\frac{\delta \dot{B}_{f,sp}}{\dot{B}_F} = 1,13\%$	(4.33)
$\varepsilon_{ch,sp}$	$\frac{\delta \dot{B}_{ch,sp}}{\dot{B}_F} = 3,02\%$	(4.34)
$\varepsilon_{f,pl}$	$\frac{\delta \dot{B}_{f,pl}}{\dot{B}_F} = 0,01\%$	(4.35)
$\varepsilon_{ch,pl}$	$\frac{\delta \dot{B}_{ch,pl}}{\dot{B}_F} = 0,38\%$	(4.36)
$\varepsilon_{f,pd}$	$\frac{\delta \dot{B}_{f,pd}}{\dot{B}_F} = 0,06\%$	(4.37)
$\varepsilon_{ch,pd}$	$\frac{\delta \dot{B}_{ch,pd}}{\dot{B}_F} = 0,02\%$	(4.38)

**Fonte:** Stanek et al. (2017)

O total de perdas de exergia externas relativas é dado pela razão entre o total de perdas externas e a exergia de entrada (equação 4.39), enquanto a perda de exergia interna relativa consiste na razão entre a perda exergética interna e a exergia de entrada (equação 4.40).

$$\varepsilon_L = \frac{\delta B_L}{B_F} = 4,61\% \quad (4.39)$$

$$\varepsilon_D = \frac{\delta B_D}{B_F} = 50,38\% \quad (4.40)$$

A eficiência exergética pode ser determinada diretamente pela equação 4.41 ou, para os casos em que as perdas de exergia relativas são conhecidas, pela equação 4.42.

$$n_{B,k} = \frac{B_P}{B_F} = \frac{m_P(b_P - b_{wz})}{m_{F,1}b_{ch,1} + m_{F,2}b_{ch,2} + m_{F,3}b_{ch,3}} \quad (4.41)$$

$$n_{B,k} = \frac{B_P}{B_F} = 1 - \sum_i \varepsilon_{L,i} - \varepsilon_D = 1 - \varepsilon_L - \varepsilon_D \quad (4.42)$$

Considerando que as perdas de exergia relativas são conhecidas, a equação 4.42 fornece uma eficiência exergética de 45,01%.

Algumas considerações sobre o exemplo proposto por Stanek et al. (2021) podem ser feitas a partir dos cálculos apresentados até aqui.

Considerando o que foi apurado por Dincer e Rosen (2021) o presente exemplo ilustra bem a necessidade de se aprofundar as análises energéticas utilizando as ferramentas termodinâmicas disponíveis para o cálculo do balanço exergético do processo. Ainda que a eficiência energética esteja em torno de 92%, a eficiência exergética está na faixa dos 45%. Isso indica que, apesar do processo ser energeticamente eficiente do ponto de vista da utilização da energia produzida pela queima de combustível para o aquecimento da água e correspondente produção de vapor, apenas 45% dessa energia está, efetivamente, disponível para uso devido às irreversibilidades – aqui calculadas na forma das perdas de exergia internas e externas – do processo.

A análise permite observar que as maiores perdas de exergia externa relativas acontecem pela perda de exergia relativa física dos gases de combustão ( $\varepsilon_{(f,sp)}=1,13\%$ ) e pela perda de exergia relativa química dos gases de combustão ( $\varepsilon_{(ch,sp)}=3,02\%$ ). Porém, a maior parcela de perda exergética está relacionada às condições internas do processo, com uma perda de 50,38%.

Dessa forma, um engenheiro em posse destas informações, tem a oportunidade de propor alterações que promovam a melhoria das condições internas de operação da caldeira de forma a diminuir o consumo de combustível, conforme o exemplo descrito por Dincer e Rosen (2021).

Um sumário com as principais informações dos balanços de energia e exergia está disponível na tabela 4.14.



**Tabela 4.14:** Resultados das análises energética e exergética para a caldeira.

<b>Análise Energética</b>			
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Variável 1
Potência Útil da Caldeira	$Q_{uz}$	kW	161607
Energia química do combustível	$E_{ch}$	kW	176029
Eficiência energética	$n_{E,k}$	%	91,8
Perda relativa à entalpia física dos gases de combustão	$S_{wf}$	%	6,87
Perda relativa à entalpia química dos gases de combustão	$S_{wch}$	%	0,0059
Perda química	$S_{st,ch}$	%	0,4235
Perda física	$S_{st,f}$	%	0,1992
Perda por trocas caloríficas	$S_{ot}$	%	0,7
<b>Análise Exergética</b>			
Eficiência exergética	$n_{B,k}$	%	45,01
Perdas externas de exergia	$\varepsilon_L$	%	4,61
Exergia física dos gases de combustão	$\varepsilon_{f,sp}$	%	1,13
Exergia química dos gases de combustão	$\varepsilon_{ch,sp}$	%	3,02
Exergia física das cinzas de topo	$\varepsilon_{f,pl}$	%	0,01
Exergia química das cinzas de topo	$\varepsilon_{ch,pl}$	%	0,38
Exergia física das cinzas de fundo	$\varepsilon_{f,pd}$	%	0,06
Exergia química das cinzas de fundo	$\varepsilon_{ch,pd}$	%	0,02
Perdas internas de exergia	$\varepsilon_D$	%	50,38

**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017)

#### 4.2. ANÁLISE DE CUSTO TERMOECOLÓGICO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Neste exemplo serão apresentados os resultados da análise direta de exergia e análise TEC (Custo Termoecológico) de um sistema industrial selecionado, presente em Stanek et al. (2017). A análise direta de exergia diz respeito ao processo de alto-forno, cujo esquema é apresentado na figura 4.2. A análise exergo-ecológica do sistema com a aplicação do TEC é dedicada a toda a cadeia energético-tecnológica da fabricação do ferro-gusa, produto intermediário da produção de ferro e aço.

Para fins de análise de exergia e TEC, foi aplicado o modelo "input-output" descrito em Szargut (1983) e Stanek et al. (2015) para prever os efeitos diretos do PCI (injeção de carvão pulverizado) e o modelo de balanço de zona (Szega, 1993 e 2015) para simular os efeitos diretos da recirculação do gás de topo. Foi utilizado um modelo híbrido teórico-empírico (E-I) baseado no princípio da conservação de massa e energia no estado estacionário do alto-forno.

Os balanços dos elementos C + S, H, O e N e as equações de balanço de energia foram derivados para o contorno do balanço cobrindo todo o alto-forno. Cada equação, exceto o balanço de nitrogênio, contém uma constante individual. A parte empírica descreve os efeitos das mudanças nos parâmetros térmicos de um alto-forno e da injeção de combustíveis auxiliares na composição e temperatura do gás de topo. Cada uma dessas equações empíricas contém um parâmetro, que é desconhecido a priori. A parte experimental do modelo I-O inclui também uma única medição térmica do alto-forno investigado.

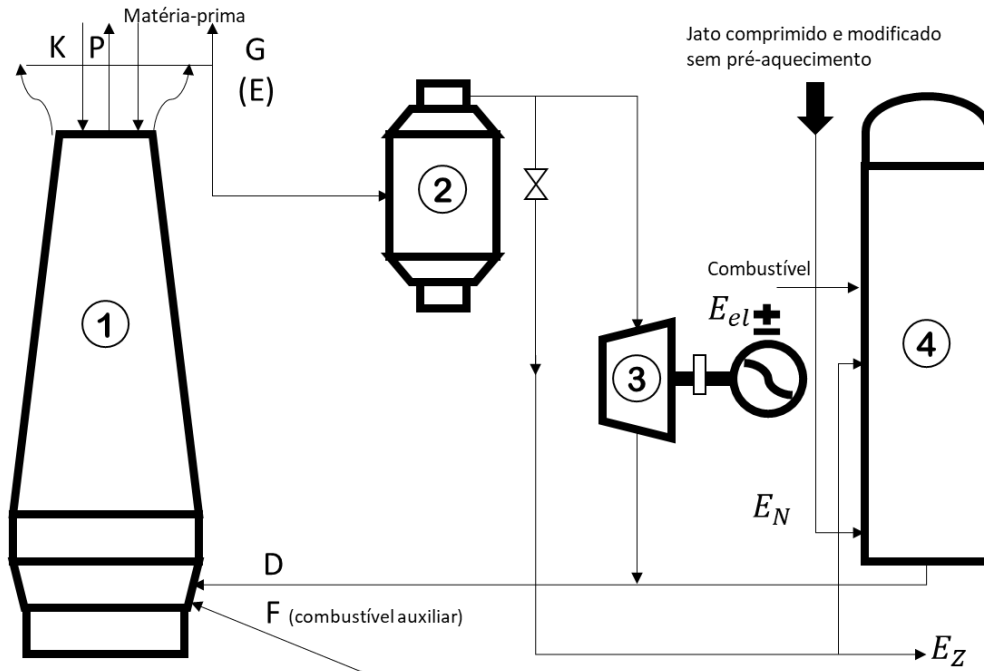
Os resultados desta medição são usados para determinar as constantes do processo nas equações de equilíbrio e os parâmetros desconhecidos nas equações empíricas. O modelo I-O permite prever a influência de mudanças nos parâmetros operacionais  $x_0 \rightarrow x_1$  na característica energética da planta B-F incluindo: consumo de coque (K) e explosão (D), produção de gás de topo (G) e sua energia química (E), bem como, a energia química da alimentação de gás de topo o sistema de gás ( $E_z$ ). Além disso, o modelo de turbina de expansão do gás de topo (Szargut, 1983, Szega, 1993 e Szega, 2015) permite avaliar a produção de energia elétrica pela turbina de recuperação de gás de topo (Eel).

Os modelos discutidos da planta B-F (alto-forno, do inglês *blast furnace*) foram utilizados para simular a influência de

(A) injeção de carvão pulverizado (PCI) e

(B) recirculação do gás de topo (TGR).

**Figura 4.2:** Esquema da planta de alto-forno.

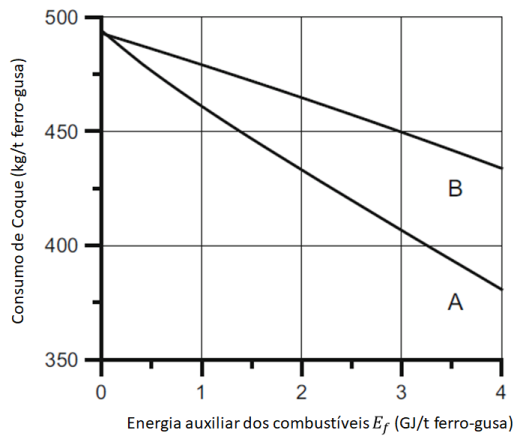


- (1) Alto-forno
- (2) Planta de purificação de gases
- (3) Turbina de recuperação do gás de topo
- (4) Forno de Coque

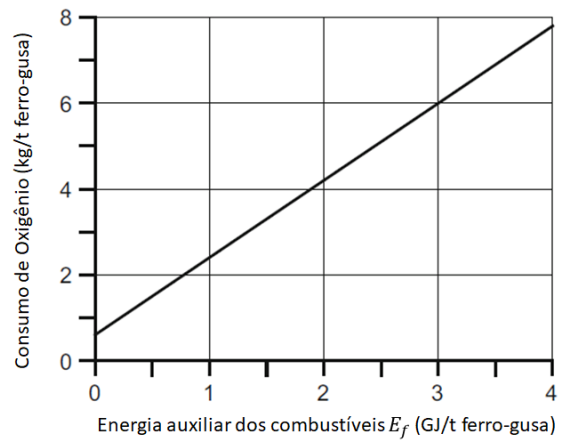
**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017).

Sobre as características energéticas do processo do alto-forno. Resultados dessas simulações são apresentados na figura 4.3., sendo que as imagens (B) e (E) se referem ao caso de TGR. É apresentada também a influência da injeção de gás superior após a remoção de  $[\text{CO}]_2$  no consumo adicional de oxigênio. As simulações para o carvão foram realizadas com teor constante de oxigênio na corrente de ar, no nível de 24%. No caso da recirculação de gás superior, esse valor varia de 22% para energia auxiliar dos combustíveis de  $E_F = 0$  GJ/t a 49% quando 4 GJ/t de gás superior reciclado são injetados no alto-forno.

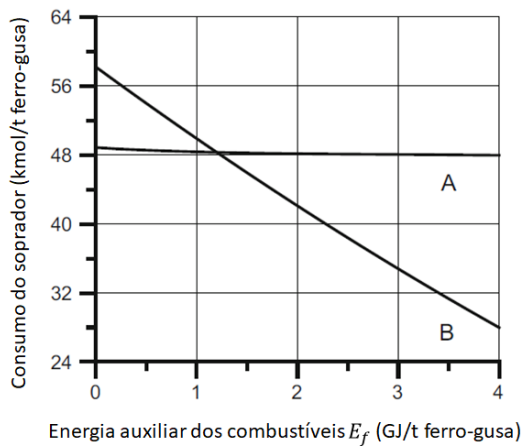
**Figura 4.3.:** Características energéticas do processo para o alto-forno.



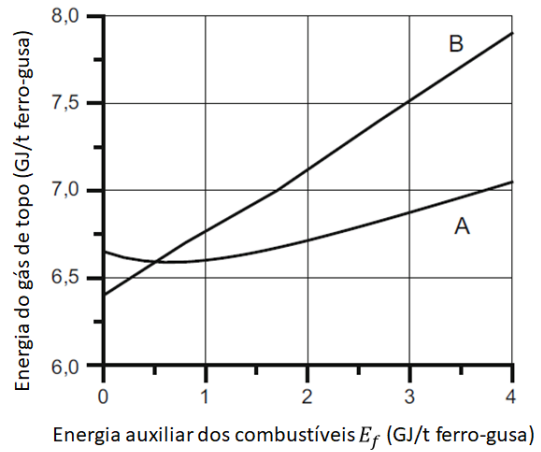
(Consumo de coque) (A)



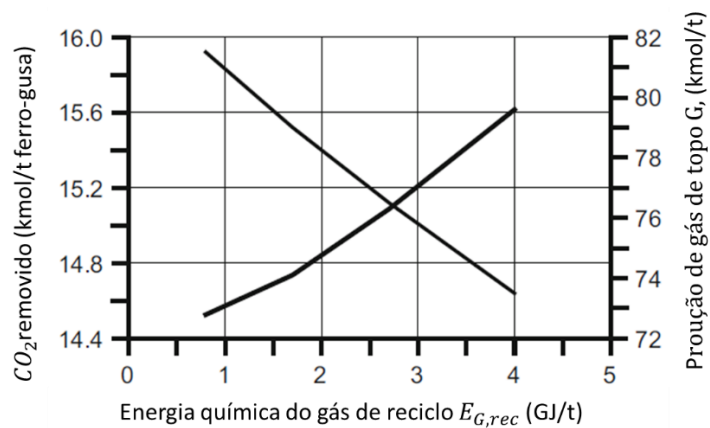
(Consumo de oxigênio) (B)



(Consumo do soprador) (C)



(Energia dos gases de topo) (D)



(CO<sub>2</sub> removido e produção de gases de topo) (E)

**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017).

Os resultados dos efeitos diretos mostram que, em primeiro lugar, maiores economias de coque são obtidas no caso da injeção de carvão pulverizado. Por outro lado, a tecnologia de recirculação utiliza a energia desperdiçada do gás superior em vez da energia primária não renovável dos combustíveis fósseis, como no caso do PCI. A recirculação requer uma quantidade menor de ar comprimido e pré-aquecido quando a energia química do combustível injetado é superior a 1 GJ/t. Por outro lado, a recirculação requer um consumo significativamente maior de oxigênio e consumo adicional de energia para a remoção de CO<sub>2</sub>.

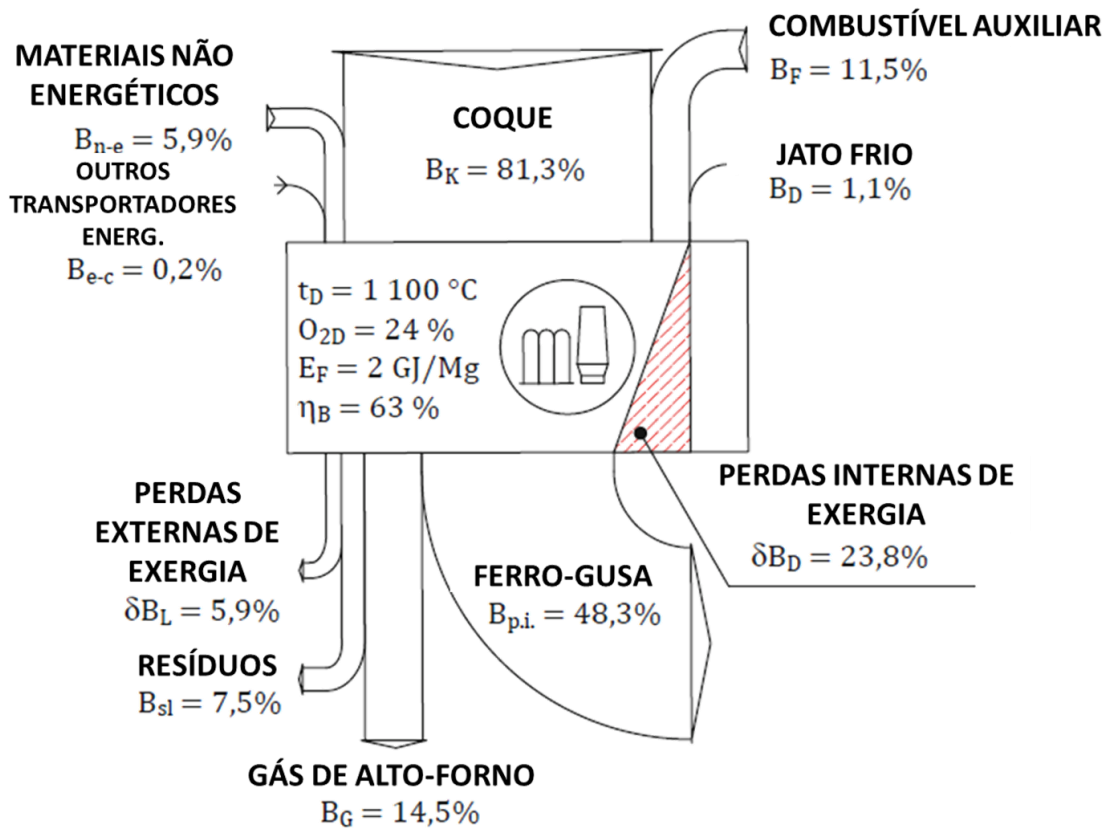
Em conclusão, devido à multiplicação de diferentes efeitos que acompanham a injeção de combustíveis auxiliares, é difícil avaliar a eficácia termodinâmica e a eficiência de gestão de recursos baseando-se puramente nos efeitos diretos retratados na figura 4.4. Para uma avaliação adequada e abrangente, é necessária uma análise do sistema baseada no conceito de TEC, que inclui todos os efeitos parciais mencionados e os reúne em uma medida comum, que é a influência das mudanças nos parâmetros operacionais no consumo de exergia de recursos não renováveis.

Como mencionado na introdução, a análise direta da exergia pode não ser suficiente ao investigar o sistema metalúrgico complexo. Para comprovar isso, são apresentados resultados de exemplo dos efeitos diretos de exergia determinados pelo balanço de exergia do alto-forno, além dos resultados apresentados. O balanço de exergia da planta do alto-forno possui a seguinte forma:

$$B_k + B_F + B_D + B_{n-e} + B_{e-c} = B_{p.i.} + B_G + B_{sl} + \delta B_L + \delta B_D \quad (4.43)$$

Os símbolos na equação 4.43 correspondem àqueles presentes na figura 4.5, onde é apresentado o balanço de exergia para um estado operacional selecionado do alto-forno analisado. Nesse caso, o alto-forno estava operando com a injeção de carvão pulverizado. A eficiência exergética do processo do alto-forno no caso operacional analisado alcançou o nível de  $\eta_B = 63\%$ . Essa alta eficiência termodinâmica é o resultado da realização da contracorrente nas trocas de calor e massa no alto-forno. No caso da injeção de combustível auxiliar no alto-forno, observa-se uma diminuição da eficiência exergética, pois a injeção leva à perturbação da troca contracorrente de calor e massa no forno. A influência da injeção de carvão pulverizado nas alterações das perdas de exergia no alto-forno é ilustrada na figura 4.6.

**Figura 4.4.:** Balanço exergético da planta de alto-forno.



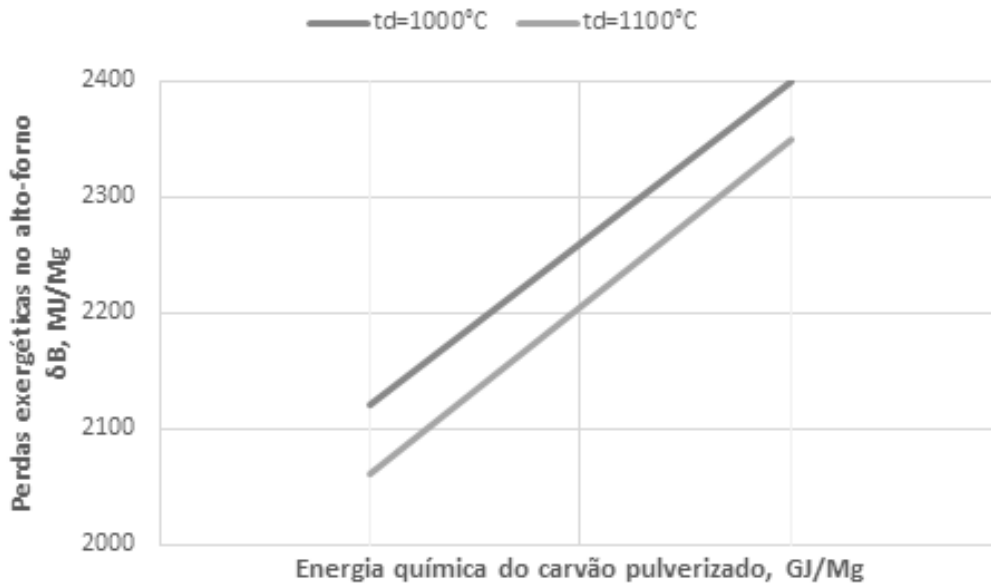
Fonte: Adaptado de Stanek et al. (2017).

À primeira vista, pode-se concluir que a injeção de combustíveis auxiliares no alto-forno não é uma melhoria termodinâmica quando resulta em perdas de exergia. No entanto, a análise direta de exergia apresentada é útil, mas está longe de ser suficiente. Para a análise da eficiência de gestão de recursos, é necessário aplicar a análise de sistema baseada no conceito de Custo Termoecológico (TEC).

A análise de Custo Termoecológico foi conduzida para 3 casos de operação do alto-forno, com diferentes métodos, onde os resultados da análise são apresentados na figura 4.5:

- (A) Recirculação de Gás de Topo (TGR: Top-gas recirculation) conectado com a remoção de  $CO_2$ .
- (B) Injeção de carvão pulverizado (PCI: pulverized coal injection) com temperatura de sopro  $t_D = 1000^\circ C$ .
- (C) Injeção de carvão pulverizado (PCI: pulverized coal injection) com temperatura de sopro  $t_D = 1100^\circ C$ .

**Figura 4.5.:** Influência do PCI e temperatura nas perdas exergéticas no alto-forno.



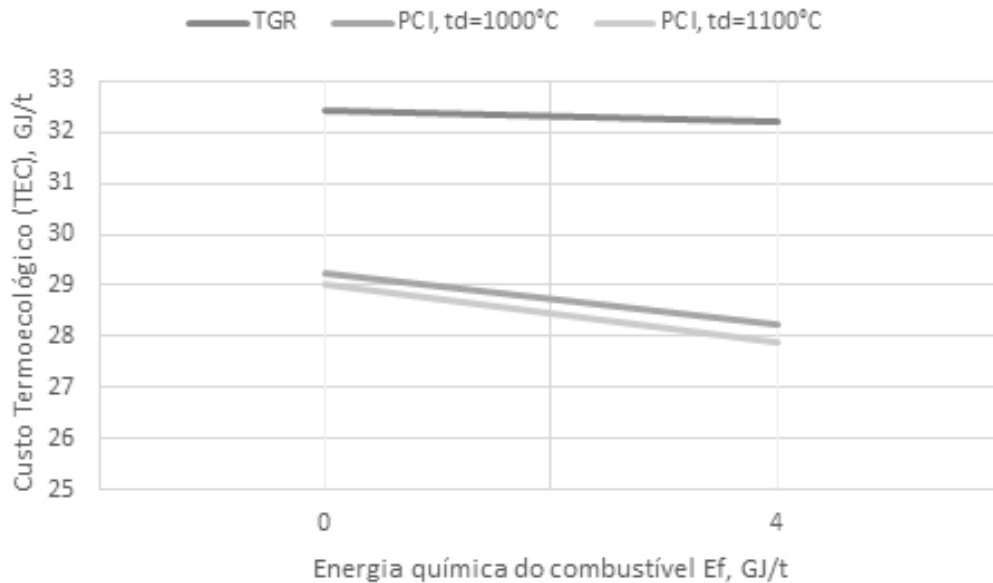
**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017).

Em primeiro lugar, pode-se chegar a uma conclusão oposta em comparação com os resultados da análise direta de exergia: a aplicação tanto de PCI (Injeção de Carvão Pulverizado) quanto de TGR (Recirculação de Gás Superior) leva à diminuição do Custo Termoecológico (TEC) e, por fim, à economia de recursos primários não renováveis. Portanto, sistemas de energia e tecnologia complexos não podem ser avaliados puramente por meio de métodos de eficiência local de exergia ou geração de entropia.

Observa-se que, no caso do PCI, é possível alcançar TEC significativamente mais baixo do que o correspondente ao TGR. A diferença é de aproximadamente 4 GJ/t. Isso pode ser, em primeiro lugar, devido à necessidade de remoção de  $CO_2$  (Figura 4.3.), mas também devido à demanda significativamente maior de oxigênio no caso do TGR (Figura 4.3.). A produção de oxigênio é onerada com um índice relativamente alto de TEC. Para uma análise detalhada dessas razões mencionadas, seria útil calcular o TEC parcial para a tecnologia TGR.

O TEC total é influenciado, nos casos analisados, pelos seguintes impactos parciais:- K - consumo de coque, D - consumo de ar, O2D - consumo de oxigênio, Eel - produção de eletricidade na turbina de recuperação de gás superior, EZ - energia do gás do alto-forno para consumidores externos, RAW - material bruto não energético,  $CO_2$  - remoção de  $CO_2$ . Os resultados desses cálculos são apresentados na Figura 4.6.

**Figura 4.6.:** Custos termoecológicos para a produção de ferro-gusa.



**Fonte:** Adaptado de Stanek et al. (2017)

Nos casos com recirculação de gás superior, a parcela do consumo de coque no TEC total fica entre 57% e 52%. A segunda posição importante é o consumo de sinter, subproduto composto por ferro gerado no processo, cuja parcela no TEC total é de cerca de 34% quando TGR é aplicado. A produção de eletricidade na turbina de recuperação diminui o TEC total em menos de 1% em todos os casos e é insignificante. Além disso, com o aumento da energia química do gás reciclado, o efeito positivo da transferência do excedente de gás para o sistema de gás da siderúrgica diminui em até 2%. A parcela da remoção de  $CO_2$  no TEC total é de aproximadamente 10% e, adicionalmente, no caso do TGR no nível de 4 GJ/t, a parcela de oxigênio aumenta para cerca de 4%.

Dois fatores são mais decisivos para um valor mais elevado de TEC em comparação com o PCI. Primeiramente, a necessidade de remoção de  $CO_2$  que requer cerca de 3,2 GJ/t e, em segundo lugar, devido à demanda aumentada por oxigênio, o que no caso de 4 GJ/t de TGR equivale a 3,7 GJ/t do TEC total.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em face de tudo o que foi exposto, algumas considerações podem ser feitas a título de organização sumarizada.

Fica evidente que a termodinâmica tradicional apresenta ferramentas bastante robustas para efeito da análise quantitativa (balanços de energia e entropia) e qualitativa (balanço de exergia) em processos.

Se a bibliografia pesquisada mostra que ainda existe certa resistência sobre o uso da exergia em problemas relativos à análise energética de processos, ela também aponta caminhos promissores no emprego desse tipo de análise em um futuro imediato, onde discussões sobre mudanças das matrizes energéticas e seus impactos sobre as mudanças climáticas se fazem presentes no nosso dia a dia.

Considerando o exemplo da análise exergética de uma caldeira, foi possível observar que a dificuldade no emprego da análise exergética consiste mais no nível de detalhamento e refinamento dos pontos onde a análise é feita do que no seu equacionamento propriamente dito. Apesar do grande número de equações, cada uma delas é sistematicamente simples em estrutura. Porém, estabelecer quais parâmetros e em quais volumes de controle essa análise deve ser feita é onde repousa a maior dificuldade neste tipo de análise. Isso demanda do engenheiro uma maior familiaridade com os diferentes cálculos exergéticos e, sobretudo, a maneira correta de analisá-los.

Uma proposta de mudança nos processos industriais exige, sobretudo, que o engenheiro identifique os pontos onde a energia apresenta menor disponibilidade e estabelecer uma rota que permita diminuir as irreversibilidades do processo dentro dos limites operacionais possíveis.

De outro modo, ainda que a sustentabilidade propriamente dita não possa ser calculada ou mensurada através de ferramentas termodinâmicas, uma vez que não existe um valor a ser atribuído a ela, as técnicas propostas para a avaliação de sustentabilidade, utilizando como base a análise exergética associada a parâmetros ambientais e econômicos constitui uma ferramenta inovadora e que tem potencial para ser adotada com grande impacto na avaliação de processos industriais do ponto de vista energético.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEJAN, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. Thermal design and optimization. 1996. New York: Wiley.
- BEJAN, Adrian, Message from the Honorary Editor, Exergy, An International Journal, Volume 1, Issue 1, 2001, Page 2, ISSN 1164-0235, [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(01\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(01)00002-4).  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164023501000024>)
- BERG, Charles A. Process integration and the second law of thermodynamics: Future possibilities, Energy, Volume 5, Issues 8–9, 1980, Pages 733-742, ISSN 0360-5442, [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(80\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0360-5442(80)90092-4).  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360544280900924>)
- BOROUMANDJAZI, G.; RISMANCHI, Behzad ; SAIDUR, Rahman. A review on exergy analysis of industrial sector. v. 27, p. 198–203, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113004450>>.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLE, Michael A. (2011). Thermodynamics: an Engineering Approach. 7ª Edição. Editora: McGraw-Hill. ISBN: 9780077366742
- COLOMBO, E., Rocco, M., and Sciubba, E. Advances in exergy analysis. A novel assessment of the extended exergy accounting method. 2013. Appl. Environ. 113, 1405–1420. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.080
- DINCER, Ibrahim. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Third Edition. Ontario Tech. University, Oshawa, ON, Canada. 2021. ISBN: 978-0-12-824372-5.
- EL-SAYED, Y. The thermoeconomics of energy conversions. 2003. Oxford UK: Elsevier Ltd.
- Exergy. ScienceDirect, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780080970899/exergy>>.
- KORONEOS, Christopher J; SPACHOS, Thomas ; NIKOLAOS MOUSSIOPOULOS. Exergy analysis of renewable energy sources. v. 28, n. 2, p. 295–310, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148101001252>>.
- KOTAS, T. J. The exergy method of thermal plant analysis. 1985. London, U.K.: Butterworths.
- MARTÍNEZ-ALIER, J., Unai, P., Franck-Dominique, V., and Zaccai, E. Sustainable development. Mapping the context, criticisms and future prospects of an emergent paradigm. 2010. Ecol. Econ. 69, 1741–1747. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.04.017
- MEADOWS, D., Randers, J. Beyond the Limits. 1992. London: Earthscan Pub

MEBRATU, D. Sustainability and sustainable development historical and conceptual review. 1998. *Env. Impact Asses. Rev.* 18, 493–520. doi: 10.1016/S0195-9255(98)00019-5

MORTAZA, Aghbashlo; HOSSEIN, Mobli; SHAHIN, Rafiee; et al. A review on exergy analysis of drying processes and systems. v. 22, p. 1–22, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113000464>>.

MUDACUMURA, G. M., Mebratu, D., and Shamsul Haque, M. *Sustainable Development Policy and Administration*. 2005. Boca Raton, FL: CRC press.

NATIONS, United. Sustainability | United Nations. United Nations. Disponível em: <<https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability#:~:text=In%201987%2C%20the%20United%20Nations,to%20meet%20their%20own%20needs.%E2%80%9D>>.

SAIDUR, Rahman et al. Exergy analysis of solar energy applications. v. 16, n. 1, p. 350–356, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111004096#:~:text=Exergy%20analysis%20evaluates%20the%20efficient,the%20efficiency%20of%20a%20system.>>.

SAIDUR, Rahman; AHAMED, J.U. ; MASJUKI, Haji H.. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. v. 38, n. 5, p. 2188–2197, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421509009422>>.

SCIUBBA, E. A novel exergetic costing method for determining the optimal allocation of scarce resources, in *Proc. CPOTE 1998, Contemporary Problems in Thermal Engineering*, A. Ziebig ed, Gliwice (Poland), 311–324.

SCIUBBA, E. A revised calculation of the econometric factors  $\alpha$  and  $\beta$  for the extended exergy accounting method. 2011 *Ecol. Mod.* 222, 1060–1066. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.11.003

SCIUBBA, E. An exergy based Ecological Indicator as a measure of our resource use footprint. 2012. *Int. J. Exergy* 10, 239–266. doi: 10.1504/IJEX.2012.046811

SCIUBBA, E. Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. 2001 *IJE* 1, 68–84. doi: 10.1016/S1164-0235(01)00012-7

SCIUBBA, Enrico. A Thermodynamic Measure of Sustainability. v. 2, 2021. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsus.2021.739395/full>>

STANEK, Wojciech. (2017). *Thermodynamics for Sustainable Management of Natural Resources*. 10.1007/978-3-319-48649-9.

SZARGUT, Jan. (1995). *Exergy and Ecology*, Proc. IVW. shop on Second Law Analysis of Energy Systems, M. Moran & E. Sciubba Eds. Roma.

SZARGUT, Jan. (1999). Depletion of Unrestorable Natural Exergy Resources as a Measure of the Ecological Cost, Proc. ECOS'99, Ishida M, Kataoka H, Moran MJ, G. Tsatsaronis Eds (Tokyo).

SZARGUT, Jan. (2005). The Exergy Method. Technical and Ecological Applications. Southampton:WIT press.

SZARGUT, Jan., MORRIS, D. R., and STEWARD, F. R. (1988). Exergy Analysis of Thermal, Chemical, Metallurgical Processes. New York, NY: Hemisphere Pub.

VALERO, A., & Torres, C. Thermo-economic analysis. 2004. In C. Frangopoulos (Ed.), Exergy, energy system analysis and optimization. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Oxford, UK: Eolss Publishers. Disponível em: <http://www.eolss.net>

ZEVENHOVEN, Ron. Engineering thermodynamics and sustainability. v. 236, p. 121436–121436, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221016844>.