

CELSO EDUARDO TUNA

Análise exergética e termoeconomia: sistematização crítica da produção científica

Celso Eduardo Tuna

Análise exergética e termoeconomia: sistematização crítica da produção científica

Texto sistemático e crítico de produção científica apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Livre-Docente em Engenharia Térmica, na disciplina de Sistemas Fluidomecânicos.

Guaratinguetá - SP
Fevereiro – 2019

T926a	Tuna, Celso Eduardo Análise exergética e termoeconomia: sistematização crítica da produção científica / Celso Eduardo Tuna – Guaratinguetá, 2019. 80 f.: il. Bibliografia: f. 64-71 Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. 1. Energia elétrica e calor – Cogeração 2. Termoeconomia 3. Análise energética 4. Análise térmica I. Título CDU 536.72(043)
-------	---

Ana Cristina Figueiredo Loureiro
Bibliotecária CRB 8/7094

DADOS CURRICULARES

CELSO EDUARDO TUNA

NASCIMENTO	18.03.1968 – Santos / SP
FILIAÇÃO	Vivaldo Gaspar Simões Tuna Maria José Coutinho Tuna
1995/1999	Doutor em Engenharia Mecânica (área de Transmissão e Conversão de Energia). UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.
1992/1995	Mestre em Engenharia Mecânica (área de Transmissão e Conversão de Energia). UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.
1985/1989	Engenheiro Mecânico (Graduação em Engenharia Mecânica). UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais **Vivaldo e Maria José**, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

A minha esposa **Sylvia** por todo o amor, tolerância e apoio dado durante todos esses anos juntos,

Ao meu filho **Matheus** por ser a minha principal razão de se tornar um homem cada vez melhor,

Ao meu orientador de doutorado e grande parceiro nas pesquisas, **Prof. Dr. José Luz Silveira** que jamais deixou de me incentivar e que sempre me ajudou em todas as atividades profissionais na UNESP.

Aos meus professores, **Prof. Dr. Paulo Magalhães Filho e Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci** que me acolheram ao retornar a esta cidade e que sempre foram um dos modelos para eu exercer as minhas atividades de docência e pesquisa.

Aos amigos e colegas do Departamento de Energia, João Andrade de Carvalho Júnior, José Antonio Perrella Balestieri, José Alexandre Matelli, Alex M. Bimbato, Ivonete Ávila, Eliana Vieira Canettieri, Luiz F. C. Nascimento, Maurício Zanardi, Pedro Magalhães Sobrinho, Petrônio M. Tanisho, Guilherme Eugênio Filippo, José Nédilo Carrinho de Castro, Carlos Daniel Ebinuma, Thiago Bimestre, Fernando Henrique M. de Araújo, Nelson Múrcia e a nossa eterna chefe Maria Luiza de A. Peixoto, pelo excelente convívio e pela dedicação e profissionalismo de todos ao ensino superior e a UNESP.

Aos demais professores e funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá.

“A competitividade de um país não começa nas indústrias ou nos laboratórios de engenharia. Ela começa na sala de aula”.

Lee Iacocca

RESUMO

Este texto descreve as linhas de pesquisa em que o autor atuou após o seu doutorado relacionadas a área de energia, abrangendo os seguintes tópicos: análise exergética e análise exergoeconômica. As produções científicas aqui descritas foram resultados obtidos a partir das pesquisas do autor e de orientações de alunos de pós-graduação, além de resultados de colaborações com outros pesquisadores do grupo de pesquisa que participa. Dentre as principais contribuições dos artigos publicados, estão o desenvolvimento e aplicação de metodologia de análise exergoeconômica para diversas configurações de sistemas de geração de energia térmica e elétrica, e também a participação na construção de um protótipo reformador a vapor de biogás e de um gaseificador de leito fluidizado no Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos da UNESP, campus de Guaratinguetá. O autor está classificado na base Scopus com um índice h igual a 9, e no Google Acadêmico com um índice h igual a 11, demonstrando a relevância de suas 19 publicações em revistas indexadas de elevado fator de impacto.

PALAVRAS-CHAVE: Exergia. Análise exergética. Termoeconomia. Exergoeconomia.

ABSTRACT

This text describes the lines of research in which the author acted after his doctorate related to the energy area covering the following topics: exergetic analysis and exergoeconomic analysis. The scientific productions described herein were results obtained from the author's research and guidance from graduate students, besides the results of collaborations with other researchers from the research group that participates. Among the main contributions of the articles published, are the development and application of exergoeconomic analysis for various configurations of thermal and electrical generation systems, and also the participation in the construction of a biogas steam reformer prototype and a fluidized bed gasifier in the Energy Systems Optimization Laboratory of UNESP, Guaratinguetá campus. The author is classified in the Scopus base with an h index of 9, and in Google scholar with an h index equal to 11, demonstrating the relevance of its 19 publications in indexed journals with high impact factor.

KEYWORDS: Exergy. Exergetic analysis. Thermoeconomics. Exergoeconomics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de cogeração com turbina a vapor.....	31
Figura 2 - Ciclo de cogeração com turbina a gás.....	36
Figura 3 - Ciclo de cogeração com motor de combustão interna.....	38
Figura 4 - Diagrama funcional do sistema de cogeração com turbina a gás e caldeira de recuperação com queima suplementar de combustível.....	41
Figura 5 - Quantidade de publicações estratificada por ano.....	52
Figura 6 - Quantidade de citações estratificadas por artigo na base Scopus.....	52
Figura 7 - Quantidade de citações estratificadas por ano na base Scopus.....	53
Figura 8 - Percentual de artigos indexados estratificados pelo Qualis - Engenharias III.....	53
Figura 9 - Quant. de citações estratificadas por ano na base Scopus dos artigos [1] e [2].....	56
Figura 10 - Reprodução da tabela 11 do artigo “Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review”	56
Figura 11 - Quantidade de citações estratificadas por ano na base Scopus do artigo [7].....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exergia química padrão e entalpia de formação de substâncias químicas [kJ/kmol]. ($T_0 = 298.15$ K, $P_0 = 0.101325$ MPa).....	19
Tabela 2 - Valores típicos de ϕ para alguns combustíveis industriais e para outras substâncias combustíveis.....	20

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Artigos publicados em periódicos com fator de impacto, citações e atuação do docente.....	48
Quadro 2 – Capítulos de livro publicados com citações e atuação do docente.....	51
Quadro 3 – Artigos com mais citações, classificando o docente com o índice h9.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO.....	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2	ANÁLISE EXERGÉTICA.....	14
2.1	INTRODUÇÃO.....	14
2.2	CONCEITO DE EXERGIA.....	14
2.3	EQUILÍBRIO	16
2.4	COMPONENTES DA EXERGIA	16
2.4.1	Exergia cinética e potencial.....	17
2.4.2	Exergia física.....	17
2.4.3	Exergia química	18
2.5	CONCEITOS DE EXERGIA PARA ANÁLISE DE VOLUME DE CONTROLE..	21
2.6	EFICIÊNCIA EXERGÉTICA	22
2.7	PESQUISAS EM ANÁLISE EXERGÉTICA	23
3	EXERGONOMIA	24
3.1	VISÃO HISTÓRICA.....	25
3.2	MÉTODOS TERMOECONÔMICOS.....	30
3.2.1	O método do custo de manufatura para ciclo Rankine	30
3.2.2	O método do custo de manufatura para ciclos a gás	35
3.2.3	O método do custo de manufatura para motores de combustão interna.....	37
3.2.4	O método da análise funcional termoeconômica	39
4	SISTEMATIZAÇÃO CRÍTICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA	44
4.1	APRESENTAÇÃO.....	44
4.2	PUBLICAÇÕES E NÚMEROS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS.....	47
4.3	ANÁLISE DOS ARQUIVOS MAIS CITADOS.....	54
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A	67
	APÊNDICE B	69
	ANEXO A - Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A Termodinâmica Clássica fornece, entre outras, os conceitos de entalpia, transferência de calor e trabalho, entropia, balanços de entalpia e entropia, e as fórmulas matemáticas para o cálculo das propriedades termodinâmicas. A Segunda Lei da Termodinâmica complementa o balanço energético permitindo a determinação do verdadeiro valor termodinâmico de um fluxo energético e a real ineficiência e perdas dos processos e sistemas. O conceito de exergia é extremamente útil para esse propósito.

Exergia é o máximo trabalho disponível que pode ser obtido de uma determinada forma de energia utilizando os parâmetros do ambiente em sua volta como estado referencial. A exergia de um fluxo energético é um potencial termodinâmico que depende do estado do fluxo que está sendo considerado e do estado do ambiente estabelecido como referencial. Ela expressa a capacidade máxima de um fluxo causar mudanças (GAGGIOLI, 1983) e quando associada ao valor econômico do fluxo expressa o real valor que o usuário paga pelo potencial energético, ou seja, quando custos são atribuídos a fluxos de energia, a exergia deve servir como base desses custos.

Para um sistema energético que opera acima ou abaixo da temperatura ambiente, pode-se dizer que a exergia é a parte útil da energia que pode ser transformada em outra forma de energia. Em processos reais, uma parte dessa exergia ao ser transformada é irreversivelmente destruída, e uma outra parte é perdida. Ambas podem ser identificadas através de uma análise exergética, ou seja, uma análise pela de Segunda Lei da Termodinâmica.

Atualmente, a análise exergética é reconhecida como o método mais eficaz para avaliar a qualidade dos fluxos de energia e os seus processos de conversão e seu uso racional. Esta análise pode ser aplicada a qualquer sistema de conversão de energia ou processo químico. Os princípios da exergia também podem ser usados para desenvolver novos processos que aproveitam os recursos energéticos de uma forma mais eficaz. A análise das ineficiências reais da termodinâmica em um sistema e seus componentes pode contribuir significativamente para melhorar a operação de um uso intensivo de energia (MOROSUK; TSATSARONIS, 2019).

A destruição da exergia é o resultado direto da irreversibilidade do sistema, e está associada com as decisões do projetista. O funcionamento de um componente ou de um sistema fora do seu ponto de projeto contribui tanto para o aumento da destruição quanto para o aumento da perda de exergia. Partes destas perdas e destruições são causadas por decisões envolvendo custos associados aos materiais, impactos ambientais, segurança e conservação do

sistema considerado. Em um sistema realmente otimizado, o total de perdas e destruições de exergia é justificado através dessas decisões.

A expressão "Análise Termoeconômica" normalmente tem sido utilizada para definir análises termodinâmicas baseadas na Primeira Lei da Termodinâmica associada com análises econômicas, mas sem considerar o custo da exergia. Portanto, para não confundir e dar uma maior precisão, a combinação da análise exergética com a econômica, definindo o custo exergético, o pesquisador George Tsatsaronis sugeriu o termo exergoeconomia, termo que foi aceito pelos outros pesquisadores da área (TSATSARONIS, 1993). A exergoeconomia combina a análise exergética com análise de custo convencional, a fim de avaliar e melhorar o desempenho dos sistemas de energia. A principal contribuição de uma análise exergética para a avaliação de um sistema de energia vem através de uma avaliação termoeconômica que considera não apenas as ineficiências, mas também os custos associados a essas ineficiências e as despesas de investimento necessárias para reduzi-los. O objetivo de uma otimização termodinâmica é minimizar as ineficiências termodinâmicas dentro do sistema, enquanto que o objetivo de uma otimização exergoeconômica é estimar a estrutura ótima em termos de custos e os valores ótimos das ineficiências termodinâmicas em cada componente (TSATSARONIS; HO-PARK, 2002).

Uma análise exergoeconômica é conduzida no nível de componente de um sistema e revela a importância relativa dos custos de cada componente e as opções para melhorar a relação custo-eficácia. O modelo exergoeconômico de um sistema de conversão de energia consiste em balanços de custos para cada componente do sistema e equações de custos auxiliares (LAZZARETTO; TSATSARONIS; SPECO, 2006).

Os conceitos abordados acima foram a base dos temas das pesquisas desenvolvidas pelo docente, como mostra este texto que sistematiza criticamente parte de sua obra, alcançada após o seu doutorado de modo a evidenciar a originalidade de sua contribuição na área de energia.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste texto é agrupar de forma sistematizada as pesquisas realizadas pelo autor na área de energia, mais especificamente nas metodologias e aplicações de análise exergética e análise exergoeconômica. Pretende-se que este trabalho contribua para que outros pesquisadores possam obter informações úteis sobre a pesquisa desenvolvida pelo docente e que deem continuidade nestas pesquisas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto sistematiza criticamente parte da obra do docente e está estruturado em 5 capítulos, sendo que este primeiro capítulo consiste da introdução, objetivo e a organização do texto.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos de exergia e de análise exergética, base termodinâmica dos trabalhos desenvolvidos pelo docente.

No capítulo 3 são apresentados os métodos de análise exergoeconômica utilizados nas pesquisas publicadas, incluindo o método desenvolvido pelo docente no seu doutorado e aprimorado posteriormente. Também são apresentadas as expressões matemáticas utilizadas pelas metodologias em sistemas de cogeração empregando turbinas a vapor, turbinas a gás e motores de combustão interna.

A fim de analisar a evolução das pesquisas desenvolvidas após o seu doutorado, o capítulo 4 é dedicado à análise crítica dos artigos publicados pelo docente nos temas abordados nos capítulos 2 e 3. Foram listados 19 artigos e 6 capítulos de livro, sendo que as 10 principais (mais citadas) são comentadas de forma a identificar suas contribuições. No capítulo 5 apresentam-se as conclusões e indicação das contribuições futuras.

2 ANÁLISE EXERGÉTICA

As pesquisas envolvendo a análise exergética desenvolvidas pelo docente foram propostas desde o doutoramento para avaliar o desempenho de sistemas energéticos, em especial, sistemas de cogeração. Estes foram estudados de forma a comparar a aplicação de diversas configurações para a geração de eletricidade e potência térmica. Com o decorrer do tempo, estas análises foram também aplicadas pelo docente em diversos sistemas, como os de produção de hidrogênio e gás de síntese.

2.1 INTRODUÇÃO

Inicialmente, para se evitar a confusão com métodos de análise e projeto de sistemas térmicos baseados na energia, uma distinção entre energia e exergia deve ser exposta. A energia é conservada em qualquer dispositivo ou processo. A energia não pode ser destruída. A idéia de que alguma coisa possa ser destruída é útil; mas não pode ser aplicada a energia, ao contrário da outra variável: a exergia. Além disto, é a exergia, e não a energia, que se encaixa com a idéia de qualidade e utilidade, ou seja, comparando um kJ de eletricidade gerada por uma planta de potência com um kJ em um fluxo de água gelada, a eletricidade obviamente tem uma qualidade maior, e portanto um potencial maior de causar mudanças.

Conseqüentemente, com a intenção de investigar o desempenho do sistema, a análise energética guia para pontos errados de possíveis reduções da energia descartada. Ao contrário, a análise exergética não apenas mostra o que é realmente descartado, mas também que um significativo aumento do desempenho pode ser obtido pela identificação e aprimoramento das fontes de ineficiência dentro do sistema. Além do mais, a exergia possui um valor econômico no mercado, portanto, uma avaliação feita na base energética pode trazer resultados equivocados (KENNEY, 1984). Finalmente, a exergia se tornou uma ferramenta crescentemente importante para o projeto e análise de sistemas térmicos, sendo a base para a discussão de uma nova subdivisão da termoeconomia, a exergoeconomia.

2.2 CONCEITO DE EXERGIA

Segundo Kotas (1985), exergia de um sistema é a quantidade de trabalho útil que pode ser obtido quando o sistema é levado a um estado de equilíbrio irrestrito (isto é, térmico, mecânico e químico) com o meio ambiente por meio de processos reversíveis envolvendo

interação térmica e química apenas com o ambiente. Através desta definição, exergia é uma propriedade de dois estados, o estado do sistema e o estado do ambiente. Sua magnitude pode ser vista como uma medida da saída do estado do sistema até o estado do ambiente. Esta definição é bastante geral e pode ser aplicada a uma variedade de sistemas.

Essa oportunidade para produzir trabalho útil existe sempre que são colocados dois sistemas em estados diferentes em comunicação, em princípio, trabalho pode ser desenvolvido assim que ambos são permitidos para entrar em equilíbrio. Quando um deles é um sistema adequadamente idealizado, chamado de ambiente, e o outro é algum sistema de interesse, a exergia é o máximo trabalho útil teórico (trabalho de eixo) possível assim que os sistemas interajam ao equilíbrio, e a transferência de calor só acontece com o ambiente. Portanto, exergia é uma medida da “distância” do estado em que se encontra um determinado sistema ao estado do ambiente. Uma vez que o ambiente é especificado, então, um valor pode ser agregado à exergia em termos de propriedade para o sistema.

Exergia pode ser destruída e geralmente não pode ser conservada. Um caso limite, em que a exergia pode ser completamente destruída, é quando um sistema entra espontaneamente em equilíbrio com o ambiente sem obter nenhum trabalho útil.

Um dos usos principais deste conceito é o balanço de exergia na análise de sistemas térmicos (análise exergetica). O balanço de exergia é semelhante a um balanço de energia, mas tem por diferença fundamental que, enquanto o balanço de energia é baseado na lei de conservação de energia, o balanço exergetico é baseado na perda irreparável de exergia devido a todos os reais processos que são irreversíveis.

A análise exergetica, ou ainda, análise de disponibilidade, é dessa forma então elaborada para alcançar a meta de um uso mais efetivo do recurso energético, porque possibilita a localização, a causa e a verdadeira magnitude do desperdício e da perda. Pode ser usada tal informação no projeto de sistemas energéticos eficientes e para aumentar a performance de sistemas existentes. A análise exergetica também proporciona uma visão maior do problema em análise, evitando conclusões baseadas puramente na aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica.

Assim, de uma perspectiva de 1ª Lei, a energia que se transfere ao ambiente parece ser a única possível fonte de ineficiência de uma planta de potência. Em base da Primeira Lei, por exemplo, o condensador de uma planta de potência pode ser identificado erradamente como o componente principal responsável para a aparente baixa eficiência global da planta. Uma análise exergetica revela corretamente não só que o gerador de vapor é o local principal

de ineficiência termodinâmica devido às irreversibilidades ocorridas dentro dele, mas também que as perdas no condensador são relativamente sem importância e necessárias.

2.3 EQUILÍBRIO

Pode-se dizer que existem dois tipos de equilíbrio, o equilíbrio restrito (estado ambiental) e o equilíbrio irrestrito (estado morto).

O equilíbrio restrito é o estado em que o sistema está em equilíbrio térmico e mecânico com o ambiente. Nestas condições, a temperatura e a pressão do sistema são iguais às do ambiente, T_0 e P_0 , respectivamente. No caso de equilíbrio restrito, o sistema é mantido separado do ambiente por um limite físico para evitar mistura e interação química com o ambiente. Devido a isso, a composição do ambiente não é de interesse e o estado do ambiente é adequadamente definido por sua pressão e temperatura. Portanto, no caso de equilíbrio restrito, o ambiente pode ser considerado como um reservatório infinitamente grande de energia térmica de grau zero, já que sua exergia é zero. A especificação da pressão ambiental P_0 é necessária para a avaliação do trabalho realizado pelo sistema no ambiente quando há uma alteração no volume do sistema (SZARGUT, 2005).

No equilíbrio irrestrito as condições de equilíbrio mecânico, térmico e químico entre o sistema e o ambiente estão satisfeitas. Assim, além das pressões e temperaturas, os potenciais químicos das substâncias do sistema e do ambiente devem ser iguais. Sob tais condições de equilíbrio termodinâmico pleno entre sistema e ambiente, o sistema não pode sofrer qualquer mudança de estado por qualquer forma de interação com o ambiente. Pode-se chamar este estado de estado morto (SZARGUT, 2005).

2.4 COMPONENTES DA EXERGIA

Na ausência de efeitos de ordem nuclear, magnética, elétrica e de tensão de superfície, a exergia E total de um sistema pode ser dividida em quatro componentes: exergia física E^{PH} , exergia cinética E^{KN} , exergia potencial E^{PT} , e exergia química E^{CH} , ou seja:

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (2.1)$$

A soma das exergias física, cinética e potencial, é também chamada de exergia termomecânica (MORAN; SHAPIRO, 1998).

Embora a exergia seja uma propriedade extensiva da matéria, freqüentemente é conveniente trabalhar por unidade de massa ou em base molar. A exergia específica total em uma base de massa é determinada por:

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (2.2)$$

2.4.1 Exergia cinética e potencial

Quando avaliada em relação ao ambiente, as energias cinética e potencial de um sistema são, em princípio, completamente conversíveis em trabalho assim que o sistema é trazido para o estado ambiente, e deste modo elas correspondem às exergias cinética e potencial, respectivamente. Portanto:

$$e^{KN} = \frac{1}{2} \cdot v^2 \quad (2.3)$$

$$e^{PT} = g \cdot z \quad (2.4)$$

em que v e z denotam velocidade e altura relativas às coordenadas do ambiente, respectivamente, e g representa a aceleração gravitacional. Pode-se escrever a Eq.(2.2) como:

$$e = e^{PH} + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z + e^{CH} \quad (2.5)$$

2.4.2 Exergia física

Considerando um sistema em repouso relativo ao ambiente, a exergia física é o máximo trabalho útil teórico possível assim que o sistema passa de seu estado inicial onde a temperatura é T e a pressão é P ao estado morto restrito no qual a temperatura é T_0 e a pressão é P_0 , ocorrendo transferência de calor apenas com o ambiente.

A exergia física de um sistema (ou fluxo) em um determinado estado é dada pela expressão (MORAN; SHAPIRO, 1998):

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (2.6)$$

em que h e s representam, respectivamente, a entalpia e a entropia do sistema no determinado estado, e h_0 e s_0 são os valores das mesmas propriedades quando o sistema (ou fluxo) está no estado ambiental (estado morto restrito).

Para um gás perfeito, a sua exergia física específica é definida por:

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0 \cdot \left(s - s_0 - R \cdot \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.7)$$

Ou utilizando os calores específicos:

$$e^{PH} = c_p \cdot (T - T_0) - T_0 \cdot \left(c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.8)$$

2.4.3 Exergia química

A exergia química é o trabalho que se obtém a partir de um sistema por meio de processos reversíveis, desde o estado de equilíbrio restrito com o ambiente até o equilíbrio irrestrito com o ambiente. Em geral, processos químicos e físicos estão envolvidos. Os processos químicos são necessários para transformar as substâncias que compõem o sistema naquelas presentes no ambiente. Os processos físicos são necessários para ajustar as concentrações e os estados físicos destes últimos aos do ambiente.

Quando o sistema em consideração consistir de substâncias de referência em algum estado arbitrário, suas substâncias de referência são as substâncias correspondentes nos estados mortos delas. Por exemplo, se a substância no sistema é N_2 , sua substância de referência seria N_2 atmosférico no estado definido pela temperatura ambiental e a pressão parcial à qual N_2 existe na atmosfera. Quando o sistema em consideração não incluir uma substância de referência, então suas substâncias de referência têm que conter os elementos constituintes da substância. Por exemplo, as substâncias de referência para CH_4 são CO_2 (para carbono) e H_2O (para hidrogênio) no estado morto delas. Os valores da exergia química padrão $\bar{e}^{CH}$ de várias substâncias, junto com suas entalpias de formação, são mostradas na Tabela 1.

O trabalho máximo teórico por mol de gás pode ser obtido quando a expansão ocorre sem irreversibilidades. No caso de uma mistura de gases (de combustão, por exemplo)

presentes no ambiente como N_2 , O_2 e CO_2 , o gás entra a T_0 , p_0 e fica a T_0 , $y^e p_0$, onde y^e é a fração molar do N_2 , O_2 e do CO_2 no ambiente, conforme o caso. A exergia química é simplesmente dada por Bejan (1996) como:

$$\bar{e}^{qui} = \bar{R}T_0 \sum_i n_i \ln \left(\frac{y_i}{y_i^e} \right) \quad (2.9)$$

onde y_i e y_i^e simbolizam, respectivamente, a fração molar do componente i na mistura a T_0 , p_0 e no ambiente, e n_i é o número de moles na reação.

Tabela 1 - Exergia química padrão e entalpia de formação de substâncias químicas [kJ/kmol].
($T_0 = 298.15$ K, $P_0 = 0.101325$ MPa).

Substância	Exergia Química Padrão [kJ/kmol]	Entalpia de Formação [kJ/kmol]
Ar	11 690	0
Nitrogênio (N_2)	720	0
Oxigênio (O_2)	3 970	0
Dióxido de Carbono (CO_2)	19 870	0
Água	900	-44 030
Vapor d'água	9 500	0
Carbono (C)	410 260	393 780
Hidrogênio (H_2)	236 100	242 000
Enxofre (S)	609 600	724 580
Monóxido de Carbono (CO)	275 100	283 150
Dióxido de enxofre (SO_2)	313 400	427 480
Monóxido de Nitrogênio (NO)	88 900	90 430
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	55 600	33 870
Amônia (NH_3)	337 900	316 780
Metano (CH_4)	831 650	802 320
Etano (C_2H_6)	1 495 840	1 428 780
Propano (C_3H_8)	2 154 000	2 045 380
Butano (C_4H_{10})	2 805 800	2 658 830
Pentano (C_5H_{12})	3 463 300	3 274 290

Fonte: Szargut (2005).

Para se determinar a exergia química de um hidrocarboneto C_aH_b , considerando que a reação de combustão desse hidrocarboneto é:



De acordo com a demonstração em Moran e Shapiro (1998) a exergia química deste combustível pode ser expressa por:

$$\bar{e}^{qui} = \left[\bar{g}_C + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(g)} \right] (T_0, p_0) + \bar{R} T_0 \ln \left[\frac{(y_{O_2}^e)^{a+b/4}}{(y_{CO_2}^e)^a (y_{H_2O}^e)^{b/2}} \right] \quad (2.11)$$

Onde: y_i^e é a fração molar do componente i no ambiente e $\bar{g}_i$ é a função de Gibbs ($G = H - T_0 S$). Para o caso especial em que T_0 e p_0 são os mesmos valores de T_{ref} e p_{ref} , as funções de Gibbs utilizadas são as de formação (tabeladas).

Os combustíveis sólidos e líquidos são compostos por inúmeros componentes químicos, o que dificulta a determinação da exergia química do combustível. Nesses casos utiliza-se uma razão ϕ entre a exergia química e o poder calorífico inferior do combustível. A Tabela 2 mostra os valores típicos de ϕ para alguns combustíveis industriais e para outras substâncias combustíveis.

Tabela 2 - Valores típicos de ϕ para alguns combustíveis industriais e para outras substâncias combustíveis

Combustível	$\phi = \frac{\bar{e}^{CH}}{PCI}$
Coque	1,05
Carvão – diferentes tipos	1,03-1,10
Madeira	1,15-1,30
Óleo combustíveis e Petróleo	1,04-1,08
Gás Natural	1,04±0,5%
Carvão gaseificado	1,00±1%
Hidrogênio	0,985
Monóxido de Carbono	0,973
Enxofre (rômbico)	2,017

Fonte: Kotas (1985).

2.5 CONCEITOS DE EXERGIA PARA ANÁLISE DE UM VOLUME DE CONTROLE

Em uma análise de volume de controle, os três tipos de transferência de energia pela superfície de controle a ser considerados são:

- Realização de trabalho :.
- Transferência de calor.
- Transferência de energia associada com transferência de massa.

Na análise exergética de um volume de controle, usa-se uma forma apropriada de balanço exergético com transferência de exergia nas condições que correspondem às formas de transferência de energia listadas acima.

Considerando que foi definido o trabalho equivalente de uma determinada forma de energia como uma medida de sua exergia, e o trabalho é, sob todos os aspectos, equivalente à exergia, assim a transferência de exergia pode ser especificada em magnitude e em direção pela realização de trabalho pela qual corresponde.

A exergia de uma transferência de calor numa superfície de controle é determinada pelo trabalho máximo que poderia ser obtido desta usando o ambiente como um reservatório de energia térmica nula. Para uma taxa de transferência de calor $\dot{Q}$ e uma temperatura na superfície de controle T , onde a transferência de calor está acontecendo, a taxa máxima de conversão de energia térmica em trabalho é (KOTAS, 1985):

$$\dot{W}_{\text{MAX}} = \dot{E}^Q = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2.12)$$

sendo o termo em parênteses é chamado de temperatura exergética adimensional e é igual à eficiência de Carnot para o caso especial quando o ambiente, à temperatura T_0 , é considerado como o outro reservatório de energia térmica. A exergia associada com uma taxa de transferência de calor é chamada de fluxo exergético térmico e é denotada em análise de um sistema aberto por $\dot{E}^Q$.

Exergia de um fluxo de matéria é igual à quantidade máxima de trabalho possível quando o fluxo é trazido de seu estado inicial para o estado morto por processos durante os quais esse mesmo fluxo só pode interagir com o ambiente. Assim, exergia de um fluxo de matéria é uma propriedade de dois estados, o estado do fluxo e o estado do ambiente.

Finalizando, o balanço de exergia sob a forma de taxa em regime permanente é descrito por (MORAN; SCIUBBA, 1994):

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_e \dot{m}_e e_e - \sum_s \dot{m}_s e_s - \dot{I} \quad (2.13)$$

Se existe apenas uma única saída e uma única entrada temos:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \dot{m}(e_1 - e_2) - \dot{I} \quad (2.14)$$

Onde I é a taxa de irreversibilidade que corresponde à destruição de exergia dentro do volume de controle ou em outras palavras, o potencial de trabalho desperdiçado.

$$(e_1 - e_2)^{PH} = (h_1 - h_2) - T_0 \cdot (s_1 - s_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (2.15)$$

Ou para gases:

$$(e_1 - e_2)^{PH} = (h_1 - h_2) - T_0 \cdot (s_1^0 - s_2^0 - R \ln \frac{p_1}{p_2}) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (2.16)$$

2.6 EFICIÊNCIA EXERGÉTICA

De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, como $\dot{I} > 0$, tem-se que:

$$\frac{\sum \dot{m}_{out} \cdot \dot{e}_{out}}{\sum \dot{m}_{in} \cdot \dot{e}_{in}} \leq 1 \quad (2.17)$$

Assim, verifica-se que a razão entre a saída e a entrada de um fluxo exergético em um processo é geralmente inferior a um, a diferença depende do grau de irreversibilidade do processo em consideração e, no limite, sob condições de reversibilidade total, é igual a um. Esta característica torna particularmente adequada para servir como um critério do grau de perfeição termodinâmica de um processo. De acordo com a prática estabelecida, ela é chamada de eficiência racional e denotada pelo símbolo Ψ (KOTAS, 1985).

$$\psi = \frac{\sum \dot{m}_{out} \cdot \dot{e}_{out}}{\sum \dot{m}_{in} \cdot \dot{e}_{in}} \quad (2.18)$$

Outra abordagem encontrada na literatura em relação à maneira de se avaliar a eficiência exergética de um processo é a denominada eficiência pela segunda lei da termodinâmica. Esta é determinada pela razão entre a exergia produzida ou transferida por um fluxo pela exergia consumida dele e que é representada pela letra ε . Para uma turbina, por exemplo, pode-se considerar:

$$\varepsilon = \frac{\text{exergia produzida pelo fluxo}}{\text{exergia fornecida pelo fluxo}} \quad (2.19)$$

Para compressores e bombas, tem-se:

$$\varepsilon = \frac{\text{exergia adicionada ao fluxo}}{\text{exergia fornecida para o fluxo}} \quad (2.20)$$

Para trocadores de calor sem mistura tem-se:

$$\varepsilon = \frac{\text{exergia adicionada ao fluxo}}{\text{exergia fornecida para o fluxo}} \quad (2.21)$$

2.7 PESQUISAS EM ANÁLISE EXERGÉTICA

Esta metodologia de análise de sistemas térmicos se mantém como as mais utilizadas até os dias de hoje. Em uma rápida busca na base Scopus, na modalidade documentos, com o termo *exergetic and analysis*, encontra-se como resposta 2874 documentos. Essa quantidade vem aumentando ano a ano, partindo de 164 documentos em 2010 para 318 documentos em 2018, um aumento de 94%, demonstrando a importância deste ramo da pesquisa. Os estudos destes artigos são sobre a aplicação deste conceito em diversos tipos de sistemas como: sistemas fotovoltaicos, refrigeração, compressão, CHP, solar, motores de combustão, dentre outros.

3 EXERGOECONOMIA

A exergoeconomia é o ramo da engenharia que combina a análise exergética e princípios econômicos para proporcionar ao projetista de sistemas térmicos, ou ainda ao operador, informações cruciais ao projeto e operação de um sistema de custo efetivo, informações essas não disponíveis em análises energéticas convencionais e avaliações econômicas. Pode-se considerar que o principal objetivo de um estudo exergoeconômico é a minimização do custo exergético. Como as considerações termodinâmicas estão baseadas no conceito de exergia, o termo exergoeconomia descreve a combinação de análise exergética e econômica (TSATSARONIS; LIN; PISA, 1993).

Nestas análises, foram desenvolvidas técnicas para avaliar a ineficiência termodinâmica destes sistemas térmicos: destruição e perda de exergia. Porém, precisa-se freqüentemente saber o custo desta ineficiência. O conhecimento deste custo é muito útil para se reduzir os custos dos produtos finais a serem produzidos por um sistema energético.

Além disto, se um sistema tem mais de um produto, como é o caso da cogeração, muitas vezes se precisam saber os custos de produção de cada produto. Este é um problema comum em plantas químicas, nas quais potência elétrica, água gelada, ar comprimido e vapor em vários níveis de pressão são gerados em um departamento, setor de utilidades, e “vendidos” a outro. O operador da planta deve saber o verdadeiro custo de cada uma das utilidades geradas e consumidas; os custos desses insumos são agregados aos custos dos produtos finais de acordo com o tipo e quantidade de que cada utilidade gerada contribuiu para sua manufatura. No projeto de um sistema térmico, tal análise ajuda nas definições de custos de processos e operações e na identificação de opções técnicas que podem melhorar o aproveitamento dos recursos monetários investidos no sistema.

Uma completa análise exergoeconômica de um sistema energético consiste de:

- uma detalhada análise exergética;
- uma análise econômica de cada componente do sistema;
- atribuição de custos exergéticos aos fluxos de energia;
- avaliação exergoeconômica do sistema como um todo e de cada componente individualmente.

Os objetivos de uma análise exergoeconômica são:

- determinar a origem e a dimensão das perdas e destruições de exergia de um sistema;
- entender o processo de formação de custo e o fluxo de custos no sistema;
- calcular o custo associado as perdas e destruições de exergia;
- avaliar os custos de cada produto, em sistemas (ou equipamentos) conversores de energia que possuem mais de um produto;
- otimizar variáveis específicas em um único componente;
- facilitar as otimizações durante a fase de projeto e durante o estudo de expansão de um sistema existente;
- assessorar decisões de investimento, procedimentos de operação e manutenção;
- comparar técnicas (ou configurações) alternativas.

3.1 VISÃO HISTÓRICA

Segundo El-Sayed e Gaggiolli (1989), a primeira proposta da literatura científica que adotou o conceito de disponibilidade para análise de custos foi de J. H. Keenan em 1932, segundo o qual, o combustível possuía um potencial inerente de causar mudanças, e que parte desse potencial terminava nos produtos provenientes da planta ou era utilizado na execução (ou produção) desses. Assim, considerou-se que o custo do vapor e da eletricidade de uma planta deveriam ser baseados no conceito de “disponibilidade” ou “exergia” e não na energia. Suas propostas foram adotadas pela indústria de utilidades, mas não em sua totalidade.

No entanto, como consequência dessa primeira proposta, o método de George A. Goodenough, denominado “*Lost Kilowatts*” (1920) desenvolvido anteriormente ao de Keenan, mas esquecido até então, começou a ser avaliado pela indústria de utilidades obtendo uma rejeição menor, sendo adotado a partir daquele período. Nesse método, o custo da eletricidade cogerada é calculado como se a eletricidade tivesse sido produzida em uma turbina de condensação, sendo que os custos restantes são atribuídos ao vapor. Assim, George A. Goodenough, professor de engenharia mecânica da Faculdade de Illinois, foi um dos primeiros a contribuir para o desenvolvimento da teoria da exergia, definindo-a em seu livro texto intitulado “*Thermodynamics*”, publicado em 1920, no qual incluía conceitos de disponibilidade e Segunda Lei.

A partir daí, as discussões relativas a este tema ocorreram principalmente dentro das companhias de eletricidade, e dentro de indústrias que estavam cogerando (produzindo) o seu

vapor e eletricidade para uso próprio. Na verdade, não é difícil hoje encontrar indústrias que ainda utilizam a base energética para o custo de suas utilidades.

Geralmente, uma planta de manufatura que necessita de vapor e de eletricidade produz o seu próprio vapor e compra a eletricidade da concessionária. Para essa indústria poder tomar a decisão de produzir a sua própria eletricidade, ela precisa comparar os custos desta possível produção com os da concessionária, podendo chegar a conclusões incorretas se não utilizar métodos consistentes.

O termo exergia foi introduzido pela primeira vez por Z. Rant em 1956 na Alemanha (TSATSARONIS, 1993). Foi uma nova denominação para o termo “potencial de trabalho”, utilizado previamente por Bosnjakovic. Este termo foi aceito em todos os países, menos nos Estados Unidos, onde se adotava o termo disponibilidade. Conseqüentemente, todo e qualquer trabalho que o utilizava causava desconfiança. No entanto, essa recusa não durou muito tempo.

No final da década de 1950 e início da década de 1960, Tribus e Evans, da Universidade da Califórnia (UCLA), ao estudarem processos de desalinização e calcularem suas eficiências exergéticas, determinaram os custos exergéticos associados, aplicando princípios de Engenharia Econômica, de onde o termo Termoeconomia foi criado. A essência desse estudo foi traçar fluxos monetários para uma planta associando-os às suas exergias, considerando os gastos com combustível, custos operacionais e amortização do capital investido, resultando em custos unitários para cada transporte (ou fluxo) de exergia (EL-SAYED; GAGGIOLLI, 1989).

Na Europa, em 1968, E. Bergmann e K. R. Schmidt atribuíram custos a destruições de exergia em cada componente de uma planta de potência composta de turbinas a vapor; E em um estudo sobre a otimização de aquecedores de água de alimentação, W. Fratzscher e D. Kloditz referenciando o trabalho de Tribus e Evans aplicaram custos exergéticos no projeto de trocadores de calor regenerativos, e J. Szargut utilizou custos exergéticos em plantas de cogeração (TSATSARONIS, 1993).

Enquanto isso, em Wisconsin (EUA), R. A. Gaggioli pesquisava como fazer um projeto de uma planta de potência a vapor otimizando na tubulação a espessura do isolamento térmico, sendo este resolvido pela atribuição do valor da exergia agregado ao vapor e à eletricidade produzida. Com esses trabalhos, Evans e Gaggioli ficaram internacionalmente conhecidos (EL-SAYED; GAGGIOLLI, 1989).

Na década de 1970, El-Sayed pesquisou também o assunto na área de desalinização, resultando em importante publicação conjunta com Evans. Esse trabalho foi composto de

sistemas de equações matemáticas, nos quais os parâmetros ótimos de projeto de uma determinada configuração foram resolvidos utilizando os conceitos de Multiplicadores de Lagrange (EL-SAYED; EVANS, 1970). O método apresentado, apesar de não ter conseguido os resultados práticos esperados, mostrou-se promissor para futuras pesquisas.

No início da década de 1980, Evans defende a tese de que qualquer componente de um sistema térmico pode ser termoeconomicamente isolado dos demais componentes, quando suas interações econômicas são completamente descritas por uma série de valores numéricos fixos, para os quais foram utilizados os Multiplicadores de Lagrange para cada interação ou fluxo, sendo este isolamento termoeconômico a condição necessária e suficiente para a otimização individual do componente (EVANS, 1980).

Os custos associados às irreversibilidades termodinâmicas ocorridas em um equipamento de processo foram levantados por London, da Universidade de Stanford, na Califórnia, começando com o reconhecimento das irreversibilidades internas e externas, que foram utilizadas para formular as medidas entrópicas e entálpicas em termos de condições operacionais (LONDON, 1982). George Tsatsanoris e Michael Winhold também desenvolveram uma metodologia para avaliar tais perdas de exergia, como também compararam esses custos aos custos de investimento e operação de cada componente de uma planta de potência com vapor gerado por caldeira utilizando carvão mineral. A análise exergoeconômica efetuada sugeriu uma redução nas perdas de exergia da caldeira e dos pré-aquecedores, mostrando a necessidade do aumento do número de pré-aquecedores, elevando a temperatura de entrada da água na caldeira. Estas mudanças resultaram em uma redução do custo da eletricidade produzida (TSATSARONIS; WINHOLD, 1985a e 1985b).

Utilizando-se da teoria do isolamento termoeconômico proposto por Evans, o pesquisador Christos A. Frangopoulos, da Universidade Nacional de Atenas na Grécia, desenvolveu um método novo e genérico para o projeto e/ou expansão de um sistema térmico complexo, denominando-o de Método de Análise Funcional Termoeconômica (FRANGOPOULOS, 1987). Nesse método ele define as funções de cada uma das unidades básicas do sistema. A distribuição dessas funções estabelecem as relações entre as unidades (componentes) e entre o ambiente e o sistema, resultando no denominado Diagrama Funcional do sistema. A otimização visou a minimização do custo de aquisição e operação do sistema analisado. Esse método tem uma intrínseca adaptabilidade para condições de decomposição. Se específicas condições são satisfeitas, o sistema pode se decompor em sistemas menores (subsistemas), e a solução da otimização é significativamente facilitada (FRANGOPOULOS, 1988).

Seguindo a linha de trabalho de Evans, na Escola Politécnica Federal de Lausanne (Suíça), M. R. Von Spakovsky também desenvolveu seu método de análise exergoeconômica (VON SPAKOVSKY, 1989).

El-Sayed e Gaggioli juntaram esforços e revisaram os métodos exergoeconômicos mais importantes, descrevendo as principais diferenças de cada um deles, analisando-os e criticando-os; também aplicaram seu método a plantas de desalinização combinadas com produção de energia (EL-SAYED; GAGGIOLI, 1989; GAGGIOLI et al., 1988).

El-Sayed deu continuidade às pesquisas desenvolvendo uma estratégia de decomposição do sistema para a sua otimização, aplicando para um ciclo regenerativo de turbina a gás com sete parâmetros de decisão (EL-SAYED, 1989), e também apresentou uma nova metodologia, como extensão das anteriores, aplicando a um sistema de dez componentes e dezenove parâmetros de decisão (EL-SAYED, 1996).

Na Itália, em 1991, Bidini apresentou um método com o objetivo de reduzir o consumo de energia em plantas industriais. A diferença mínima de temperatura do “pinch-point” é determinada para trocadores de calor entre os fluxos quente e frio com reduzidas perdas térmicas. O método, denominado TEXAS, *Thermal and Economic Exergetic Analysis of Systems*, deriva uma série de curvas características mostrando os parâmetros econômicos *versus* a eficiência exergetica em relação a fatores como calor transferido e tamanho da superfície de troca de calor (BIDINI; STECCO, 1991).

Lazzaretto, também italiano, comparou os custos unitários marginais e os custos unitários médios das exergias dos fluxos de um sistema, e verificou que quando as funções de custo de capital dos componentes forem linearmente descritas, as equações obtidas de custo médio e de custo marginal desses fluxos são idênticas, constatando a importância dos custos unitários médios, mais fáceis de se calcular, e também a importância da elaboração de funções precisas de custo de capital dos componentes, através da coleta e análise de todos os dados de custos disponíveis (LAZZARETTO; MACOR, 1995).

Na Espanha, Valero, Torres e Serra, apresentaram uma análise estrutural da teoria termoeconômica, resultando em um novo conceito denominado Função de Energia Livre Relativa, envolvendo matrizes que descrevem a estrutura do sistema (VALERO et al., 1992).

No início da década de 1990, Tsatsaronis publicou uma nova metodologia eliminando a necessidade de equações auxiliares na análise exergoeconômica e aprimorou a análise de custos verificando detalhadamente a formação destes e o valor monetário dos processos, incluindo simultâneas considerações de exergia e de seu respectivo valor monetário somado

ou subtraído, conforme o caso, do fluxo de massa em cada passo do processo (TSATSARONIS; LIN; PISA, 1993).

Outra importante pesquisa desenvolvida nesse período foi o problema CGAM, no qual um grupo de especialistas da área decidiu comparar as suas metodologias através da resolução de um pré-definido problema de otimização. Foi batizado com este nome pois este representa as iniciais dos investigadores participantes: C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero, e M. Von Spakovsky (VALERO et. al., 1994), sendo dedicado um exemplar inteiro da revista Energy (Vol. 19, nº 3, 1994) para a publicação da resolução desse problema. Os trabalhos sequenciais publicados na mesma edição tinham as definições comuns da física, termodinâmica e modelos de custo mais a função objetivo, mas diferentes procedimentos de otimização termoeconômica. Os autores enfatizaram que o objetivo do trabalho apresentado foi unificar as metodologias termoeconômicas, não uma competição entre eles.

Utilizando o conceito de eficiência e um conceito denominado de elasticidade, que é a variação da eficiência global de um sistema com a mudança da eficiência de um subsistema, Alvarado, da Universidade do Chile, criou uma técnica de otimização para sistemas de vários componentes e vários produtos, baseado na otimização isolada de subsistemas ou componentes (ALVARADO; GHERARDELLI, 1994a). Alvarado aplicou o seu método ao problema CGAM chegando a resultado semelhante aos dos autores do problema (ALVARADO; GHERARDELLI, 1994b).

Outro importante projeto chamado TADEUS foi iniciado em 2001 (LAZARETO et al, 2006; VERDA, 2006; VERDA, BORCHIELLINI, 2007). As principais metas do projeto eram: aplicar procedimentos de diferentes grupos de pesquisa em análise termoeconômica para o diagnóstico do mau funcionamento do sistema de energia e identificação de ineficiências, além de estabelecer conceitos e nomenclaturas comuns e comparar os resultados, destacando as principais características de cada abordagem.

Estudos exergoeconômicos têm sido aplicados com sucesso em plantas de potência, produção combinada de calor e potência ou instalações de cogeração. Metodologias inovadoras avançadas de lógica Fuzzy e métodos de algoritmos genéticos também foram aplicados nestas instalações desde o final dos anos 90.

Da mesma maneira que o tema análise exérgica, o tema exergoeconomia também está em crescente presença nos artigos científicos. Novamente, em uma rápida busca na base Scopus, na modalidade documentos, com o termo *exergoeconomic*, encontra-se como resposta 924 documentos, partindo de 52 documentos em 2010 para 130 documentos em 2018, um

aumento de 150%. Para o termo termoeconomic, tem-se como resposta 1524 documentos, partindo de 89 documentos em 2010 para 120 documentos em 2018, um aumento de 35%.

3.2 MÉTODOS TERMOECONÔMICOS

Seguindo (EL-SAYED; GAGGIOLI, 1989), os métodos de termoeconomia podem ser classificados em dois grupos: métodos algébricos e métodos de cálculo.

Os métodos algébricos utilizam equações algébricas de custo derivadas da análise econômica convencional e equações de custos auxiliares para cada subcomponente de qualquer sistema apresentado (BEJAN et al, 1996). Eles estão relacionados com o processo de formação de custo do sistema, a fim de investigar os custos médios.

Os métodos de cálculo são construídos sobre equações diferenciais. Os fluxos de custos de um sistema são desenvolvidos em uma ligação com procedimentos de otimização que se baseiam nos multiplicadores de Lagrange e são usados para determinar custos marginais. A dificuldade característica na aplicação de métodos de cálculo para os sistemas complexos tais como plantas de cogeração, é o fato de que os multiplicadores de Lagrange variam de iteração para a iteração quando o isolamento do componente termoeconômico não é alcançado (EVANS, 1980).

De modo a reduzir a complexidade na otimização de sistemas térmicos complexos, foram propostos vários métodos de decomposição com base na Segunda Lei (SILVEIRA; TUNA, 2003, 2004). Restrições termodinâmicas tornam o problema de otimização mais simples de ser resolvido, pois moldam todos os limites do sistema diminuindo a quantidade de variáveis.

3.2.1 O método do custo de manufatura para ciclo Rankine

O custo de manufatura (C_{MAN}) é um método, desenvolvido durante o doutorado do autor, para a análise e projeto de sistemas de geração de calor e potência. A técnica desenvolvida tem como objetivo o custo operacional mínimo (ótimo) total da planta de cogeração, assumindo uma taxa fixa de produção de eletricidade e vapor de processo. Após a defesa da tese, com o objetivo de publicação, a metodologia foi aperfeiçoada junto com a metodologia funcional termoeconômica aplicada pelo seu orientador em sua tese de livre-docência e divulgada na revista Progress in Energy and Combustion Science (SILVEIRA; TUNA, 2003, 2004).

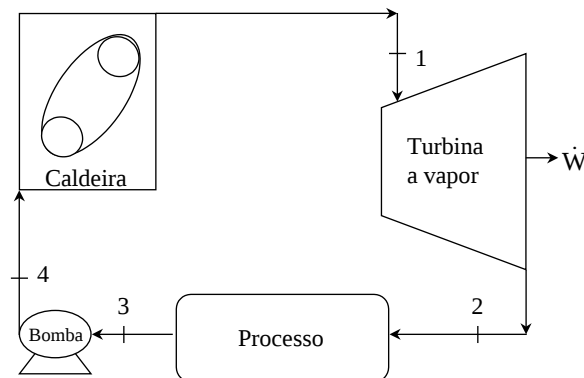
Os parâmetros operacionais selecionados para serem otimizados são temperatura e pressão, na saída da caldeira para sistemas com turbina a vapor, e razão de pressão, vazão e temperatura dos gases de exaustão para sistemas com turbina a gás. Esses parâmetros são selecionados por causa de sua influência sobre a energia gerada e os custos de aquisição dos componentes.

Analisando separadamente os conversores ou transformadores de energia dentro do sistema de geração de calor e potência, empregando turbinas a vapor, equacionam-se os custos primeiramente para um ciclo Rankine, na qual o condensador é substituído pelo processo da planta industrial que consome vapor, conforme a Figura 1.

Na bomba, considerando uma compressão adiabática, o custo do produto na saída (C_4) é igual ao custo do insumo ou do fluxo de entrada (C_3), mais o custo anual do equipamento (Z_p), mais o custo da potência consumida pela bomba ($C_{\dot{W}_p}$):

$$C_4 = C_3 + Z_p + C_{\dot{W}_p} \quad (3.1)$$

Figura 1 - Ciclo de cogeração com turbina a vapor



Fonte: Autoria própria

O custo anual do equipamento em US\$/h, já incluindo a despesa com manutenção e operação é calculado pela expressão:

$$Z_p = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_p}{H} \quad (3.2)$$

na qual φ é o fator de manutenção, f é o fator de amortização, que será definido posteriormente, C_p é o custo da bomba instalada, e H é o número de horas de operação do sistema por ano. O custo do trabalho da bomba ($C_{\dot{W}_p}$) é:

$$C_{\dot{W}_p} = P_{EL} \cdot \dot{W}_p \quad (3.3)$$

em que $\dot{W}_p$ é a potência consumida pela bomba em kW; este é calculado considerando um rendimento isoentrópico (2ª Lei) na compressão e com rendimento de 1ª Lei englobando o conjunto motor-bomba, e P_{EL} é a tarifa de eletricidade em US\$/kWh. Substituindo as eq.(3.2) e (3.3) em (3.1) tem-se:

$$C_4 = C_3 + \frac{\varphi \cdot f \cdot C_p}{H} + P_{EL} \cdot \dot{W}_p \quad (3.4)$$

Procedendo analogamente na caldeira, o custo do seu produto (C_1) é igual ao custo do insumo ou fluxo de entrada (C_4), mais o custo anual do equipamento, mais o custo do combustível, portanto:

$$C_1 = C_4 + \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{CAL}}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} \quad (3.5)$$

$$\text{com:} \quad \dot{E}_{COMB} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_4)}{\eta_{CAL}} \quad (3.6)$$

na qual η_{CAL} é o rendimento de 1ª lei da caldeira, C_{CAL} é o custo da caldeira instalada e P_{COMB} é o preço do combustível em US\$/kWh. Tem-se que C_1 é o custo do vapor (C_v) em US\$/h. Portanto, desenvolve-se a expressão do custo do vapor inserindo a eq.(3.4) na eq.(3.5).

$$C_v = C_1 = \frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_p)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_p + C_3 \quad (3.7)$$

Adotando os fatores de custo específicos, da eq.(3.7) tem-se as seguintes fórmulas para as bases energoeconômica e exergoeconômica, respectivamente:

$$\dot{m}_v \cdot h_1 \cdot c_{vh} = \frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_p)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_p + \dot{m}_v \cdot c_3 \cdot h_3 \quad (3.8)$$

$$\dot{m}_v \cdot e_1 \cdot c_{ve} = \frac{\varphi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_B)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_p + \dot{m}_v \cdot c_3 \cdot e_3 \quad (3.9)$$

Analisando tais custos específicos na saída da caldeira, tanto o da base energoeconômica, quanto o da base exergoeconômica, verifica-se que esses custos contêm todas despesas relacionadas ao aumento da entalpia e exergia do fluxo de vapor, então, assume-se que seus valores específicos em US\$/kWh podem ser também igualados aos custos específicos do vapor, nas duas bases, na saída da turbina. Portanto, a exergia gasta para gerar

a potência na turbina foi fornecida ao fluido de trabalho em componentes anteriores a turbina (caldeira e bomba) a um custo específico por unidade de exergia, c_{ve} . De acordo com a prática da contabilidade, este custo só mudaria se fosse somada alguma exergia ao fluido de trabalho durante a expansão na turbina. Como isto não ocorre nem na turbina, nem no processo, o custo por unidade de exergia do fluido permanece constante ($c_{ve} = c_{1e} = c_{2e} = c_{3e}$).

Por exemplo, na entrada da turbina tem-se um custo exergético de vapor igual ao seu custo específico, multiplicado pela massa de vapor e pela exergia na entrada da turbina ($C_1 = c_{ve} \cdot \dot{m}_v \cdot e_1$), e na saída da turbina o custo do fluxo de vapor extraído é igual também ao seu custo específico, multiplicado por sua massa e por sua exergia ($C_2 = c_{ve} \cdot \dot{m}_v \cdot e_2$). Note que apesar de se usar o mesmo custo específico, tem-se valores de exergia diferentes, pois $e_1 > e_2$ e portanto $C_1 > C_2$, fazendo com que toda a irreversibilidade da turbina seja considerada ao se calcular o custo da eletricidade produzida, conforme será demonstrado a seguir.

Concluindo, na saída do processo, o calor não aproveitado é considerado como insumo ao se calcular o custo do fluxo de saída da bomba, vide eq. (3.1). Portanto, na saída do processo também se iguala o custo específico deste fluxo de saída, tanto o da base energoeconômica, quanto o da base exergoeconômica, ao da saída da caldeira, pois esse calor não aproveitado também é proveniente desta última e como já foi dito anteriormente, não houve nenhum acréscimo de exergia ao fluxo durante o processo. Então as eq.(3.8) e (3.9) ficam da seguinte forma:

$$c_{vh} = \frac{\frac{\phi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P}{\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_3)} \quad (3.10)$$

$$c_{ve} = \frac{\frac{\phi \cdot f \cdot (C_{CAL} + C_P)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \dot{W}_P}{\dot{m}_v \cdot (e_1 - e_3)} \quad (3.11)$$

Analisando as equações anteriormente descritas verifica-se que o custo específico do vapor é igual ao total gasto para obtê-lo, dividido pelo total da sua energia (ou exergia) gasta no processo e na produção de eletricidade.

Para um caso genérico, em que n é o número de extrações de uma **turbina de contrapressão**, o custo específico do vapor em US\$/kWh, na base exergética (c_{ve}), pode ser determinado por:

$$c_{Ve} = \frac{\frac{\phi \cdot f \cdot \left(C_{CAL} + \sum_{p=1}^n C_{Pn} \right)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \sum_{W_p=1}^n \dot{W}_p}{\dot{m}_v \cdot e_1 - \sum_{i=n+2}^{2n+1} \dot{m}_i \cdot e_i} \quad (3.12)$$

Para o caso de uma **turbina de condensação**:

$$c_{Ve} = \frac{\frac{\phi \cdot f \cdot \left(C_{CAL} + \sum_{p=1}^n C_{Pn} \right)}{H} + P_{COMB} \cdot \dot{E}_{COMB} + P_{EL} \cdot \sum_{W_p=1}^n \dot{W}_p}{\dot{m}_v \cdot e_1 - \sum_{i=n+1}^{2n} \dot{m}_i \cdot e_i} \quad (3.13)$$

Como o propósito de uma turbina é gerar potência, todos os custos associados com a compra e operação da turbina devem ser atribuídos a potência. Portanto, o custo da eletricidade, na base exergética, em US\$/kWh na saída da turbina será igual ao custo do fluxo de entrada, mais o custo anual do equipamento, menos o custo do vapor extraído:

$$C_{ELE} = c_1 \cdot \dot{m}_1 \cdot e_1 + \frac{\phi \cdot f \cdot C_{TV}}{H} - c_2 \cdot \dot{m}_2 \cdot e_2 \quad (3.14)$$

Como $c_v = c_1 = c_2 = c_3$, e fazendo $C_{ELE} = C_{ELE} \cdot Ep$:

$$c_{ELE} = \frac{\phi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot Ep} + \frac{c_{Ve} \cdot \dot{m}_v \cdot (e_1 - e_2)}{Ep} \quad (3.15)$$

Da mesma forma na base energética:

$$c_{ELh} = \frac{\phi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot Ep} + \frac{c_{Vh} \cdot \dot{m}_v \cdot (h_1 - h_2)}{Ep} \quad (3.16)$$

e

$$Ep = \dot{m}_v \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_{mtv} \cdot \eta_{ger} \quad (3.17)$$

Ep é a potência elétrica produzida em kW, considerando um ciclo real com rendimento isoentrópico, rendimento mecânico na turbina η_{mtv} e rendimento no gerador η_{ger} . Novamente na forma genérica, em que n é o número de extrações de uma **turbina de contrapressão**, o custo específico da eletricidade produzida em US\$/kWh, na base exergética (c_{Ve}), pode ser determinado por:

$$c_{EL} = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Ve} \cdot \left(\dot{m}_v \cdot e_1 - \sum_{i=2}^n \dot{m}_i \cdot e_i \right)}{E_p} \quad (3.18)$$

Para o caso de uma **turbina de condensação**:

$$c_{EL} = \frac{\varphi \cdot f \cdot C_{TV}}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Ve} \cdot \left(\dot{m}_v \cdot e_1 - \sum_{i=2}^{n+1} \dot{m}_i \cdot e_i \right)}{E_p} \quad (3.19)$$

O Custo de Manufatura, que é a função objetivo a ser minimizada, é definido como sendo o somatório do custo da eletricidade produzida, do custo do vapor consumido pelo processo, do custo da eletricidade comprada da rede em caso de déficit, subtraindo-se o custo da eletricidade vendida em caso de excedente, ou seja:

Na base exergética, em caso de déficit ou auto-suficiência na produção de eletricidade tem-se:

$$C_{MANe} = E_p \cdot c_{ELe} + (E_r - E_p) \cdot P_{EL} + c_{Ve} \cdot \dot{E}_{vp} \quad (3.20)$$

E em caso de excedente, tem-se:

$$C_{MANe} = E_p \cdot c_{ELe} - (E_p - E_r) \cdot P_{VEL} + c_{Ve} \cdot \dot{E}_{vp} \quad (3.21)$$

Da mesma forma, na base energética tem-se:

$$C_{MANh} = E_p \cdot c_{ELh} + (E_r - E_p) \cdot P_{EL} + c_{Vh} \cdot \dot{H}_{vp} \quad (3.22)$$

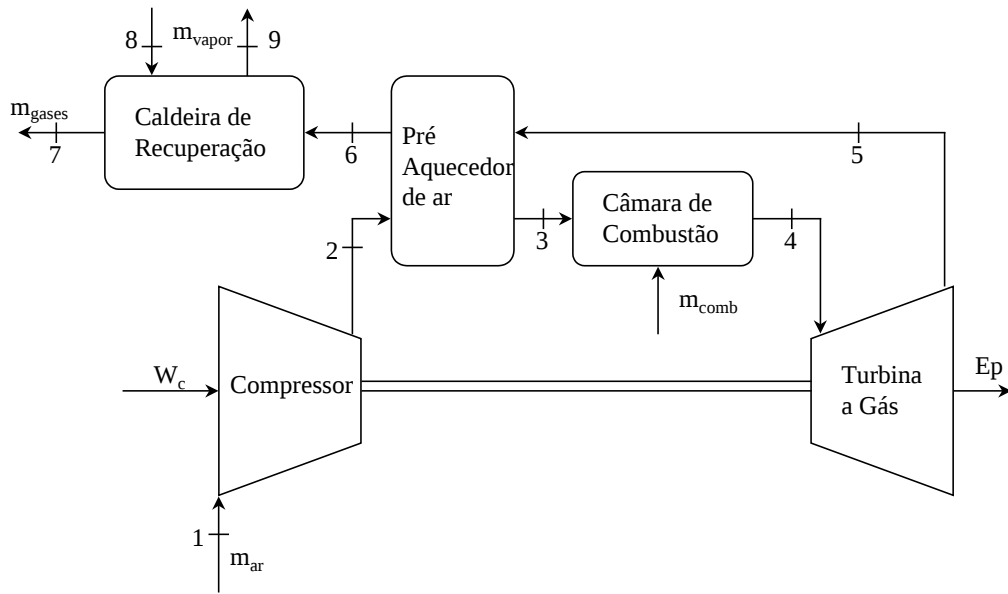
E em caso de excedente, tem-se:

$$C_{MANh} = E_p \cdot c_{ELh} - (E_p - E_r) \cdot P_{VEL} + c_{Vh} \cdot \dot{H}_{vp} \quad (3.23)$$

3.2.2 O método do custo de manufatura para ciclos a gás

Procedendo de modo análogo, desenvolve-se o método para um ciclo empregando turbina a gás, com pré aquecedor do ar de combustão e caldeira de recuperação, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Ciclo de cogeração com turbina a gás



Fonte: Autoria própria

Tem-se então determinado todas as condições operacionais do sistema e seus respectivos valores. Trata-se o fluido de trabalho desse ciclo (gás) da mesma forma que foi tratado no ciclo vapor no que se relaciona a geração de entalpia e exergia nesse fluxo para a determinação de seus custos específicos. Portanto, o custo específico do gás na saída da câmara de combustão, da eletricidade produzida e do vapor em US\$/kWh, na base exergética, são definidos por:

$$c_{Ge} = \frac{\dot{E}_{COMB} \cdot P_{COMB}}{\dot{m}_G \cdot (e_4 - e_7)} \quad (3.24)$$

$$c_{Ele} = \frac{f \cdot \phi \cdot (C_C + C_{CC} + C_{TG})}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_4 - e_6)}{E_p} \quad (3.25)$$

$$c_{Ve} = \frac{f \cdot \phi \cdot C_{CR}}{H \cdot \dot{E}_V} + \frac{c_{Ge} \cdot \dot{m}_G \cdot (e_6 - e_7) + \dot{E}_{COMB_s} \cdot P_{COMB}}{\dot{E}_V} \quad (3.26)$$

$$\dot{E}_V = \dot{m}_V \cdot (e_9 - e_8) \quad (3.27)$$

$$\dot{E}_{COMB} = \dot{m}_{COMB} \cdot PCI \quad (3.28)$$

Na base energética as equações de custos ficam da seguinte forma:

$$c_{Gh} = \frac{\dot{E}_{COMB} \cdot P_{COMB}}{\dot{m}_G \cdot (h_4 - h_7)} \quad (3.29)$$

$$c_{ELh} = \frac{f \cdot \varphi \cdot (C_C + C_{CC} + C_{TG})}{H \cdot E_p} + \frac{c_{Gh} \cdot \dot{m}_G \cdot (h_4 - h_6)}{E_p} \quad (3.30)$$

$$c_{Vh} = \frac{f \cdot \varphi \cdot C_{CR}}{H \cdot \dot{H}_V} + \frac{c_G \cdot \dot{m}_G \cdot (h_6 - h_7) + \dot{E}_{COMB_s} \cdot P_{COMB}}{\dot{H}_V} \quad (3.31)$$

Caso sejam conhecidas as condições de operação do ciclo a gás, as funções de custos utilizadas para o cálculo dos custos de aquisições de compressores, câmaras de combustão, turbinas a gás, e caldeiras de recuperação, são respectivamente:

$$C_C = \left(\frac{75 \cdot \dot{m}_{AR}}{0,9 - \eta_C} \right) \cdot \left(\frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \right) \quad (3.32)$$

$$C_{CC} = \left(\frac{48,64 \cdot \dot{m}_{AR}}{0,995 - \left(\frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \right)} \right) \cdot [1 + \exp(0,018 \cdot T_{Saida} - 26,4)] \quad (3.33)$$

$$C_{TG} = \left(\frac{1536 \cdot \dot{m}_G}{0,92 - \eta_{TG}} \right) \cdot (\ln Pr) \cdot [1 + \exp(0,036 \cdot T_{Entrada} - 54,4)] \quad (3.34)$$

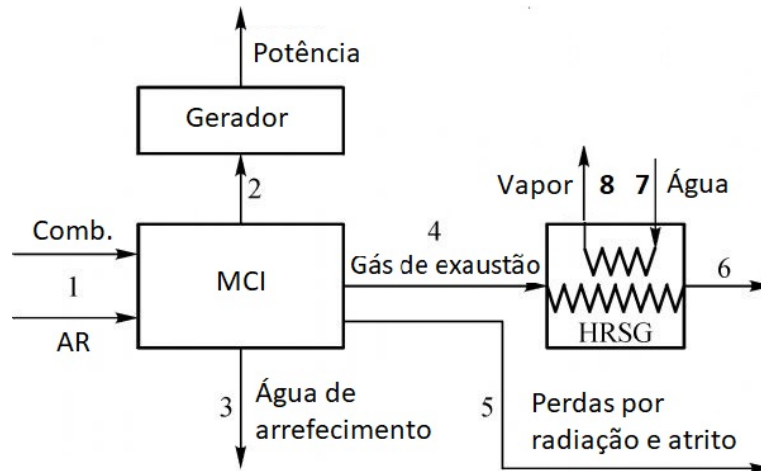
$$C_{CR} = 4745 \cdot \left(\frac{h_{saida}}{\log(T_{ent} - T_{saida})} \right)^{0,8} + 11820 \cdot \dot{m}_V + 658 \cdot \dot{m}_G \quad (3.35)$$

A Função Objetivo de Otimização são as mesmas das do ciclo a vapor: Eq (3.20 a 3.23)

3.2.3 O método do custo de manufatura para motores de combustão interna

Procedendo de modo análogo ao ciclo a gás, desenvolve-se o método para um ciclo empregando motores de combustão interna (MCI), com caldeira de recuperação, conforme apresentado na Figura 3

Figura 3 - Ciclo de cogeração com motor de combustão interna



Fonte: Autoria própria

Tem-se então determinado todas as condições operacionais do sistema e seus respectivos valores. Trata-se o fluido de trabalho desse ciclo (gás de combustão) da mesma forma que foi tratado no ciclo vapor no que se relaciona a geração de entalpia e exergia nesse fluxo para a determinação de seus custos específicos. Portanto, o custo específico do gás de combustão na saída da câmara, da eletricidade produzida e do vapor em US\$/kWh, na base exergética, são definidos por:

$$c_G = \frac{\dot{E}_{FUEL} \cdot P_{FUEL}}{\dot{E}_{FUEL} - \dot{m}_G \cdot e_6} \quad (3.36)$$

$$c_{EL} = \frac{f \cdot C_{ICE}}{H \cdot Ep} + \frac{c_G \cdot (\dot{E}_{FUEL} - \dot{m}_G \cdot e_4)}{Ep} \quad (3.37)$$

$$c_V = \frac{f \cdot C_{HRSG}}{H \cdot \dot{E}_V} + \frac{c_G \cdot \dot{m}_G \cdot (e_4 - e_6) + \dot{E}_{FUEL_s} \cdot P_{FUEL}}{\dot{E}_V} \quad (3.38)$$

$$\dot{E}_V = \dot{m}_V \cdot (e_8 - e_7) \quad (3.39)$$

$$\dot{E}_{FUEL} = \dot{m}_{FUEL} \cdot LHV \quad (3.40)$$

As funções utilizadas para calcular o custo da aquisição do MCI e da caldeira de recuperação são, respectivamente:

$$C_{ICE} = 1200 \cdot Ep \quad (3.41)$$

$$C_{HRSG} = 0.3 \cdot C_{ICE} \quad (3.42)$$

A Função Objetivo de Otimização são as mesmas das do ciclo a gás e do ciclo a vapor: Eq (3.20 a 3.23).

3.2.4 O método da análise funcional termoeconômica

Dentre as diversas metodologias de termoeconomia existentes, uma das utilizadas pelo autor em suas publicações e orientações é a do método da análise funcional termoeconômica, desenvolvido por Frangopoulos (1983). A escolha desse método tem como motivo maior a profundidade da análise, como se explicará a seguir.

Em 1983, Christos Frangopoulos, aluno de doutorado de Robert B. Evans, um dos criadores da termoeconomia, aprimorou o trabalho de seu orientador e criou um modelo de otimização de sistemas térmicos complexos pela determinação matemática da função do sistema e de cada unidade individualmente (FRANGOPOULOS, 1983). Tal método combina a Segunda Lei da Termodinâmica, a partir do conceito de exergia, com uma abordagem econômica sobre o sistema térmico. Essa técnica se destaca pela profundidade da análise, pois, ao estabelecer a economia interna do sistema e as suas etapas, obtém-se um panorama completo da formação dos custos e perdas. Frangopoulos desenvolveu o chamado diagrama funcional termoeconômico atribuindo o conceito de funções exergéticas em base incremental, que facilita a transposição e a visualização de fluxos exergéticos do sistema e a sua posterior modelagem matemática.

O método consiste em subdividir cada unidade como se tivesse um sistema termoeconômico próprio, que fica explicitado por cada multiplicador, e, posteriormente, interpretar a soma dessas sub-unidades com a função objetivo de otimização. Os multiplicadores, entre cada unidade, se interpretam como a definição de custo ou índice marginal (FRANGOPOULOS, 2003), o que acarreta uma interpretação do comportamento de cada unidade e o seu peso na função objetivo em termos de cada função exergética em base incremental.

Mensura-se cada fluxo tendo por base a Primeira Lei da Termodinâmica (energia), ou a Segunda Lei da Termodinâmica (exergia). Frangopoulos (2003) afirma que a quantificação da base não afeta a obtenção de um ponto ótimo. Utilizou-se ambas as bases com sucesso na otimização de sistemas energéticos, como demonstra o trabalho de El-Sayed e Evans (1970). Porém, El-Sayed e Aplenc (1970) afirmam que a base exergética é mais interessante, porque dá maior dimensão da magnitude do problema. Partindo de uma base exergética, tem-se uma

melhor visualização da representação da produção e distribuição de energia mecânica e térmica, além do que fica mais claro observar os pontos de geração de irreversibilidades.

Frangopoulos (1994), ao otimizar o problema CGAM, optou por três técnicas de otimização. A primeira, pelo uso direto de um algoritmo, que encontra o ponto de ótimo das variáveis de decisão por meio da técnica de redução generalizada do gradiente. Essa técnica é de implementação mais simples e rápida, porém oferece a desvantagem de não dar nenhuma informação a respeito da economia interna do sistema. Outro método implementado por Frangopoulos (1994) foi o modular, que consiste em dividir o segmento em módulos e iterações. Esse método é mais trabalhoso, e, novamente, não oferece nenhuma informação a respeito da economia interna. Frangopoulos (1994) propôs a decomposição do problema CGAM em sub-unidades da implementação do diagrama funcional termoeconômico e o uso dos multiplicadores de Lagrange para a sua resolução. Esse método, apesar de ser mais trabalhoso, oferece a vantagem de se conhecer as etapas formadoras de custo de um sistema térmico, onde se tem uma análise mais rigorosa.

Diagrama Funcional Termoeconômico

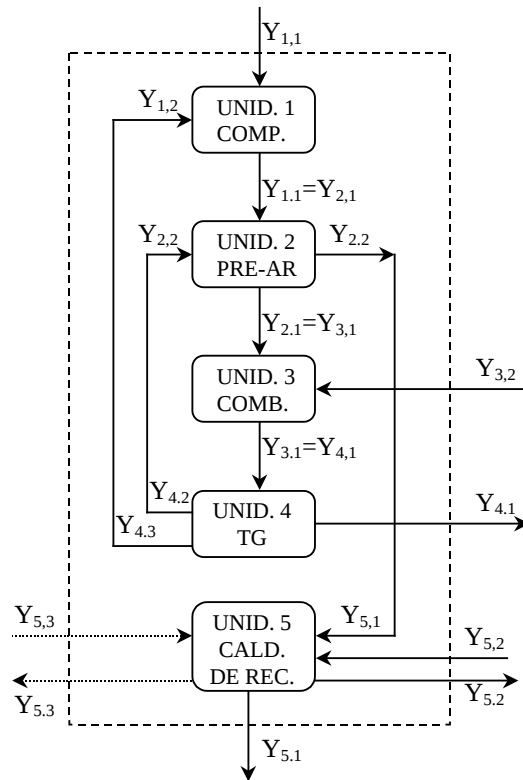
O diagrama funcional de cada sistema de cogeração é composto de figuras geométricas representando as unidades e de uma rede de linhas representando as funções unitárias de distribuição em termos exergéticos. Estas unidades correspondem aos componentes reais da planta. A notação $Y_{i,j}$ (j-ésima entrada da i-ésima unidade) e $Y_{i,k}$ (k-ésima saída da i-ésima unidade) é utilizada por Frangopoulos e Evans e por Silveira (FRANGOPOULOS; EVANS, 1984, SILVEIRA; NOGUEIRA, 1992; SILVEIRA et al., 1996).

A Figura 4 mostra o diagrama funcional para o sistema de cogeração com turbina a gás e caldeira de recuperação com queima suplementar de combustível. O diagrama físico é apresentado na Figura 2.

Para acompanhar o desenvolvimento desse método, é importante notar que cada unidade (ou componente) receberá um número de identificação. É também essencial entender a transposição dos diagramas físicos para os funcionais. Nesse último, os fluxos considerados referem-se ao incremento exergético e não ao valor absoluto desta propriedade termodinâmica.

A linha de fronteira funcional separa o que é insumo e o que é produto do sistema em relação ao ambiente e deixa o processo no lado de fora. No cálculo das funções exergéticas associadas ao diagrama funcional termoeconômico as perdas nas tubulações são desprezadas.

Figura 4 – Diagrama funcional do sistema de cogeração com turbina a gás e caldeira de recuperação com queima suplementar de combustível.



Fonte: Autoria própria

Função de Incremento Exergético

Dos diagramas físicos e dos valores das propriedades termodinâmicas de entrada e saída de cada componente é possível obter as funções de incremento exergético associado ao diagrama funcional termoeconômico. Através desse procedimento as expressões para essas funções são:

Unidade 1: Compressor de Ar

$$Y_{1,1} = \dot{E}_{AR} = 0 \quad (3.43)$$

$$Y_{1,2} = Y_{4,3} = \dot{W}_C \quad (3.44)$$

$$Y_{1,1} = \dot{m}_{AR} \cdot (e_2 - e_1) \quad (3.45)$$

Unidade 2: Pré-Aquecedor de Ar

$$Y_{2,1} = Y_{1,1} \quad (3.46)$$

$$Y_{2,2} = Y_{4,2} \quad (3.47)$$

$$Y_{2,1} = \dot{m}_{AR} \cdot (e_3 - e_2) \quad (3.48)$$

$$Y_{2,2} = \dot{m}_G \cdot (e_5 - e_6) \quad (3.49)$$

Unidade 3: Câmara de Combustão

$$Y_{3,1} = Y_{2,1} \quad (3.50)$$

$$Y_{3,2} = \dot{E}_{COMB} = \dot{m}_{COMB} \cdot PCI \quad (3.51)$$

$$Y_{3,1} = \dot{m}_G \cdot e_4 - \dot{m}_{AR} \cdot e_3 \quad (3.52)$$

Unidade 4: Turbina a Gás

$$Y_{4,1} = Y_{3,1} \quad (3.53)$$

$$Y_{4,1} = E_p \quad (3.54)$$

$$Y_{4,2} = \dot{m}_G \cdot (e_4 - e_5) \quad (3.55)$$

$$Y_{4,3} = \dot{W}_C \quad (3.56)$$

Unidade 5: Caldeira de Recuperação de Calor

$$Y_{5,1} = Y_{2,2} \quad (3.57)$$

$$Y_{5,2} = \dot{m}_V \cdot e_8 \quad (3.58)$$

$$Y_{5,3} = \dot{E}_{COMBQS} = \dot{m}_{COMBQS} \cdot PCI \quad (3.59)$$

$$Y_{5,1} = \dot{m}_G \cdot (e_6 - e_7) \quad (3.60)$$

$$Y_{5,2} = \dot{m}_V \cdot (e_9 - e_8) \quad (3.61)$$

$$Y_{5,3} = \dot{m}_G \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.62)$$

As funções objetivo de otimização são as mesmas do método anterior: eq. (3.20 a 3.23).

As expressões que determinam os custos específicos do vapor e da eletricidade variam de caso para caso. Para o exemplo da Figura 4 são as seguintes:

$$c_v = \frac{I_{CR} \cdot f \cdot \varphi}{H \cdot Y_{5,2}} + \frac{P_{comb} \cdot (Y_{3,2} - Y_{4,1} - Y_{4,3} - Y_{2,1})}{Y_{5,2}} \quad (3.63)$$

$$c_{EL} = \frac{(I_{TOT} - I_{CR}) \cdot f \cdot \varphi}{H \cdot Y_{4,1}} + \frac{P_{comb} \cdot (Y_{3,2} - Y_{2,2})}{Y_{4,1}} \quad (3.64)$$

Todos os custos consideram além do custo de aquisição dos equipamentos, as despesas de instalação civil, equipamentos elétricos, sistemas de controle, tubulações e montagem.

Esta metodologia foi amplamente utilizada pelo docente em suas pesquisas e orientações. O método funcional termoeconômico foi utilizado nas publicações [2], [3], [5], [10], [16] e [18] do apêndice A.

4 SISTEMATIZAÇÃO CRÍTICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA

4.1 APRESENTAÇÃO

Em 1999 o docente finalizou o seu doutorado intitulado por “Um Método de Análise Exergoeconômica para Otimização de Sistemas Energéticos” com apoio financeiro da Capes.

Após o seu doutorado, o docente continuou suas atividades de pesquisa no tema de exergoeconomia, redigindo e submetendo dois artigos relacionados com seu doutorado e com a tese de livre docência de seu orientador. Em 2000 o docente ingressou no Centro Universitário Salesiano de São Paulo (Unisal), em Lorena-SP e também na Universidade Nove de Julho (Uninove), no campus de Vila Maria, na capital de São Paulo. A docência na Uninove perdurou somente pelo de 2000, enquanto que a docência no Unisal durou 10 anos. Apesar destas atividades de docência, esses dois artigos, intitulados “*Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I, and Part II*” foram publicados em 2003 e em 2004, respectivamente, na revista *Progress in Energy and Combustion Science*, de classificação A1 no Qualis Capes e que tem atualmente um altíssimo fator de impacto de 17,362, sendo estas duas publicações as mais citadas até hoje dentre as demais publicações do docente (173 citações da Parte I e 68 da Parte II segundo o Google acadêmico; 130 citações da Parte I e 38 da Parte II segundo a base Scopus).

Em 2005, o docente inicia suas atividades como professor substituto no departamento de energia da Unesp de Guaratinguetá concomitantemente como o Unisal, onde, além de docente, é coordenador do curso de Licenciatura em Matemática, com um regime de 40h de trabalho, sendo 20h de aula e 20h de coordenação.

De 2007 até 2009, o docente participou ativamente de um projeto de pesquisa financiado pelo CNPq, coordenado pelo Prof. Dr. José Luz Silveira e intitulado “Construção de Protótipos de Sistemas Gaseificadores de Biomassa para Geração de Energia Elétrica com Motor de Combustão Interna - Edificação para a Integração do Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos”. Com a verba deste projeto foi possível construir o LOSE - Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos, que conta com uma área total de 295,00 m². O LOSE constitui de uma infra-estrutura dotada de sala de aula com capacidade para 40 pessoas com projetor multimídia e TV, salas privadas para alunos de graduação e pós-graduação com computadores e acesso a internet, além de um laboratório onde estão instalados os protótipos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa (reformador a vapor de biogás, gaseificador de

biomassa, cogeração compacta, motor de combustão interna a biogás). Foi inaugurado em maio de 2011.

Em 2009, o docente foi contratado pela Unesp, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, na função de Professor Assistente Doutor (MS3.1) em RDIDP, cumprindo suas funções no Departamento de Energia. A partir deste ano, o docente pode se dedicar exclusivamente às atividades de docência e de pesquisa do Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos (grupo este cadastrado no CNPq). Também neste ano o docente iniciou sua participação em um projeto de pesquisa financiado pela FAPESP, coordenado pelo Prof. Dr. José Luz Silveira e intitulado “Desenvolvimento e Otimização de Sistemas de Produção de Hidrogênio para acionamento de Células de Combustível”. Com a verba deste projeto foi possível a construção de um protótipo reformador a vapor de biogás para a produção de 1 Nm³/h de hidrogênio. O projeto foi finalizado em 2012.

No final de 2009, o docente submeteu projeto intitulado “Análise Termodinâmica de um Reformador a Vapor de Biogás para a Produção de Hidrogênio” ao programa Primeiros Projetos da Unesp, programa este dirigido para os docentes recém contratados. O pedido foi deferido e o projeto foi executado em 2010 e em 2011 e corroborou com o projeto FAPESP mencionado anteriormente. Neste período também iniciou suas orientações de iniciação científica e de trabalhos de graduação.

No ano de 2010, o docente participou da elaboração de artigo sobre termoeconomia, juntamente com dois professores da USP-Lorena, sendo este artigo publicado na revista *Applied Thermal Engineering*, de classificação A1 no Qualis Capes e que tem atualmente um fator de impacto de 3,356.

De 2011 a 2014, o docente participou da elaboração e publicação de 12 artigos em revistas indexadas, todos os trabalhos foram oriundos de pesquisas realizadas pelo grupo de pesquisa em que atua. Com esta produção científica, em meados de 2014, o docente foi credenciado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, iniciando orientação de alunos mestrado e doutorado.

De 2012 a 2016 o docente participou como colaborador em mais dois projetos de pesquisa na área de gaseificação de biomassa coordenados pelo Prof. Dr. José Luz Silveira e de outro coordenado pelo Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho na área de eficiência energética.

No final de 2014, o docente submeteu projeto de pesquisa intitulado “Sistemas Embarcados e Energias Renováveis” ao programa CAPES/BRAFITEC, programa este dirigido para o intercâmbio e dupla diplomação de discentes brasileiros nas universidades

francesas, este projeto foi desenvolvido entre 3 universidades brasileiras (Unesp, UFRJ e UFPE) e com o Instituto Nacional Politécnico de Toulouse. O pedido foi deferido e o projeto foi executado no biênio 2015/16 e renovado para o biênio seguinte. Em 4 anos, o projeto proporcionou o envio de 41 alunos brasileiros, sendo 15 destes no programa de dupla diplomação, e recepcionando 6 alunos franceses.

Em 2015 o docente submeteu projeto ao CNPq, sendo deferido a partir de março/2016, uma bolsa de Produtividade em Pesquisa nível 2 pelo comitê assessor de Engenharia Mecânica, Naval, Oceânica e Aeroespacial, para o desenvolvimento da pesquisa intitulada “Análise técnica e econômica de sistemas da gaseificação de bagaço de cana para a produção de gás combustível”.

Desde 2017 o docente participa como colaborador em mais dois projetos de pesquisa coordenados pelo Prof. Dr. José Luz Silveira, o primeiro intitulado “Processos de produção e utilização de hidrogênio renovável: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos”, financiado pelo CNPq, e o segundo “Uso de misturas syngas/biodiesel em MCI para a geração descentralizada de energia”, financiado pela CAPES, conta com a parceria do CEFET-RJ e do IPP - Instituto Politécnico de Portalegre em Portugal.

Em agosto de 2018, o docente submeteu mais um projeto de pesquisa ao programa CAPES/BRAFITEC intitulado “Otimização de Dispositivos e Sistemas de Engenharia”, programa este, semelhante ao anterior, dirigido para o intercâmbio e dupla diplomação de discentes brasileiros nas universidades francesas, este projeto será desenvolvido entre 3 universidades brasileiras (UNESP, UFPB e UFPE) e com 4 instituições francesas, o Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, o Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, a Universidade de Tecnologia de Belfort-Montbéliard, e a Escola de Engenheiros de Limoges. O pedido foi deferido e o projeto será executado no quadriênio 2019/22. Neste projeto o docente atuará como co-coordenador.

Em janeiro de 2019 foi aprovada a renovação desta bolsa de Produtividade em Pesquisa, agora sob o título “Análise Termoeconômica e Ambiental de Sistemas e Processos de Geração de Bioenergia e Biocombustíveis”.

Nesta breve apresentação, é possível verificar que as pesquisas desenvolvidas pelo docente sempre foram voltadas para a área de energia. A partir dos projetos financiados pelo CNPq, FAPESP e CAPES, foi possível consolidar as a linha de pesquisa do grupo de otimização em sistemas energéticos. Dentre as atividades desenvolvidas citam-se: Publicação de 19 artigos em periódicos indexados; Publicação de 6 capítulos de livro; Publicação de 41 trabalhos completos em anais de congresso nacionais e internacionais, com a apresentação de

trabalho na forma oral em 10 eventos científicos, sendo 6 internacionais; Participação em 11 projetos de pesquisa, sendo 3 como coordenador; Orientação concluída de 3 doutorados, 6 orientações de mestrado, 6 coorientações de mestrado, 8 iniciações científicas com bolsa e 43 trabalhos de graduação.

4.2 PUBLICAÇÕES EM NÚMEROS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS

A análise crítica apresentada neste capítulo refere-se aos 19 artigos do docente publicados após o seu doutorado nos quais são abordados os temas de pesquisas desenvolvidos no período entre 2000 e 2018. Os 19 artigos são listados no Apêndice A, sendo apresentados no Quadro 1 o resumo com a descrição de cada uma das publicações em ordem cronológica. São apresentadas informações importantes, como a classificação no estrato Qualis CAPES nas Engenharias III, o número de citações até dezembro de 2018, considerando os dados obtidos nas bases Scopus e Web of Science (WoS) e de que forma o docente atuou, sendo que as publicações se deram em decorrência de pesquisas próprias, orientações ou coorientações de alunos, e colaborações.

A partir das informações descritas no Quadro 1 é possível visualizar os avanços nas investigações do docente considerando a produção gerada no período de 16 anos. Observa-se também no Quadro 1 que entre os 19 artigos, somente o artigo [13] não foi citado nas bases Scopus e WoS e não possui fator de impacto, sendo classificado no extrato Qualis como B4. Entretanto este artigo foi importante no desenvolvimento do aluno e o ajudou no processo de concessão de bolsa de doutorado. Todos os demais artigos foram citados nestas bases e 4 deles tem mais de 20 citações cada e 8 deles tem mais de 10 citações cada. O relatórios gerados a partir das buscas no Scopus e WoS são apresentados no Anexo A.

Os 6 capítulos de livro publicados pelo docente são listados no Apêndice A, sendo apresentados no Quadro 2 o resumo com a descrição de cada uma das publicações, em ordem cronológica. São apresentadas informações como o número de citações até dezembro de 2018, considerando os dados obtidos nas bases Scopus e Bookmetrix e de que forma o docente atuou, sendo que as publicações se deram em decorrência de colaborações. Por se tratarem de publicações recentes e de acesso mediante pagamento, tem-se apenas 3 citações ao todo.

Quadro 1 – Artigos publicados em periódicos com Qualis, fator de impacto, citações Scopus e WoS, e atuação do docente

<i>Nr. artigo Autores/ano</i>	<i>Journal</i>	<i>Qualis F. de Impacto Scopus-WoS</i>	<i>Título</i>	<i>Atuação do docente</i>
[1] Silveira e Tuna (2003)	Progress in Energy and Combustion Science	A1 25,242 130 - 114	Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I	Autor
[2] Silveira e Tuna (2004)	Progress in Energy and Combustion Science	A1 25,242 38 - 32	Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part II	Autor
[3] Silveira et al. (2010)	Applied Thermal Engineering	A1 3,771 13 - 10	A contribution for thermoeconomic modelling: A methodology proposal	Autor
[4] Boloy et al. (2011)	Renewable & Sustainable Energy Reviews	A1 9,184 13 - 12	Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects	Colaborador na análise econômica
[5] Silveira et al. (2012)	Renewable & Sustainable Energy Reviews	A1 9,184 25 - 24	Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital	Colaborador na análise econômica
[6] Silveira et al. (2013)	Renewable & Sustainable Energy Reviews	A1 9,184 19 - 19	The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil	Autor
[7] Braga et al.	Renewable &	A1	Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical,	Colaborador na

(2013)	Sustainable Energy Reviews	9,184 45 - 38	economic and ecological analysis	análise econômica
[8] Sobrinho e Tuna (2013)	Experimental Thermal and Fluid Science	A2 3,204 3 - 1	Experimental research on the influence of the air humidity conditions in an air conditioning system	Autor
[9] Diniz Filho et al. (2013)	Applied Thermal Engineering	A1 3,771 8 - 5	Energetic, ecologic and fluid-dynamic analysis of a fluidized bed gasifier operating with sugar cane bagasse	Coorientador (mestrado)
[10] Coronado et al. (2013)	Renewable & Sustainable Energy Reviews	A1 9,184 7 - 6	Development of a thermoeconomic methodology for the optimization of biodiesel production Part I: Biodiesel plant and thermoeconomic functional diagram	Colaborador na análise termoeconômica
[11] Braga et al. (2014)	Applied Thermal Engineering	A1 3,771 9 - 7	Comparative Analysis Between A Pem Fuel Cell And An Internal Combustion Engine Driving An Electricity Generator: Technical, Economical And Ecological Aspects	Colaborador na análise econômica
[12] Silveira et al. (2014)	Renewable & Sustainable Energy Reviews	A1 9,184 3 - 3	Thermodynamic and economic analysis of hydrogen production integration in the Brazilian sugar and alcohol industry	Orientador (doutorado)
[13] Santos et al. (2014)	Engenharia Térmica	B4 Nd 0 - 0	Thermodynamic Analysis and Ecological Efficiency of a Combined Cycle Power Plant	Orientador (mestrado)

[14] Silveira et al. (2014)	Applied Thermal Engineering	A1 3,771 11 - 9	Incorporation of hydrogen production process in a sugar cane industry: steam reforming of ethanol	Orientador (doutorado)
[15] Brizi et al. (2014)	Renewable & Sustainable Energy Reviews	A1 9,184 11 - 10	Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas	Colaborador na análise econômica
[16] Coronado et al. (2014)	Renewable & Sustainable Energy Reviews	A1 9,184 4 - 4	Development of a thermoeconomic methodology for optimizing biodiesel production. Part II: Manufacture exergetic cost and biodiesel production cost incorporating carbon credits, a Brazilian case study	Colaborador na análise termoeconômica
[17] Pérez et al. (2015)	Energy (Oxford)	A1 4,968 2 - 1	Energetic and exergetic analysis of a new compact trigeneration system run with liquefied petroleum gas	Colaborador na análise exergética
[18] Boloy et al. (2017)	Applied Thermal Engineering	A1 3,771 1 - 1	Thermoeconomic analysis of hydrogen incorporation in a biodiesel plant	Colaborador na análise termoeconômica
[19] Tuna et al. (2018)	International Journal of Hydrogen Energy	A2 4,229 6 - 4	Biogas steam reformer for hydrogen production: Evaluation of the reformer prototype and catalysts	Autor

Fonte: Autoria própria

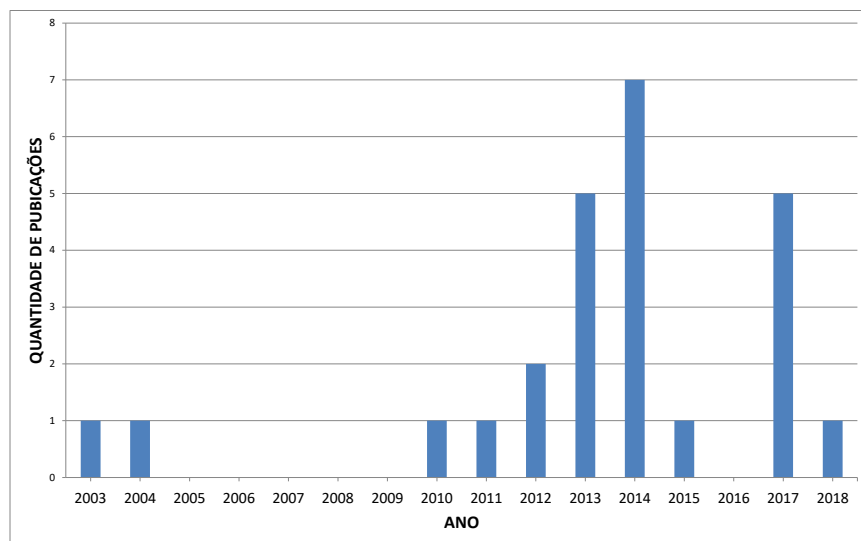
Quadro 2 – Capítulos de livro publicados com citações e atuação do docente

<i>Nr. artigo Autores/ano</i>	<i>Livro</i>	<i>Citações Scopus-Book Metrics</i>	<i>Título</i>	<i>Atuação do docente</i>
[20] Silveira et al. (2012)	Bioenergia: Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação	0 - 0	Biodiesel e Gás de Gaseificação em Motor de Combustão Interna	Colaborador
[21] Silveira et al. (2014)	Biofuels in Brazil	1 - 0	Technological Advancements in Biohydrogen Production and Bagasse Gasification Process in the Sugarcane Industry with Regard to Brazilian Conditions	Colaborador
[22] Braga et al. (2017)	Sustainable Hydrogen Production Process – Energy, Economic and Ecological Issues	0 - 0	Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production Processes	Colaborador
[23] Braga et al. (2017)	Sustainable Hydrogen Production Process – Energy, Economic and Ecological Issues	0 - 2	Hydrogen Production Processes	Colaborador
[24] Braga et al. (2017)	Sustainable Hydrogen Production Process – Energy, Economic and Ecological Issues	0 - 0	Economic Studies of Some Hydrogen Production Processes	Colaborador
[25] Braga et al. (2017)	Sustainable Hydrogen Production Process – Energy, Economic and Ecological Issues	0 - 0	Ecological Efficiency of Some Hydrogen Production Processes	Colaborador

Fonte: Autoria própria

Na figura 5 apresenta-se a quantidade de publicações estratificada pelo ano de publicação. Observa-se que o ano de 2014 foi o mais produtivo, em decorrência das defesas dos alunos de mestrado e doutorado e da iniciativa do docente em instigar e colaborar com a publicação de trabalhos de ex-alunos do grupo de pesquisa, visando um aumento de sua produção científica para ingresso na pós-graduação e solicitação de bolsa de produtividade e pesquisa.

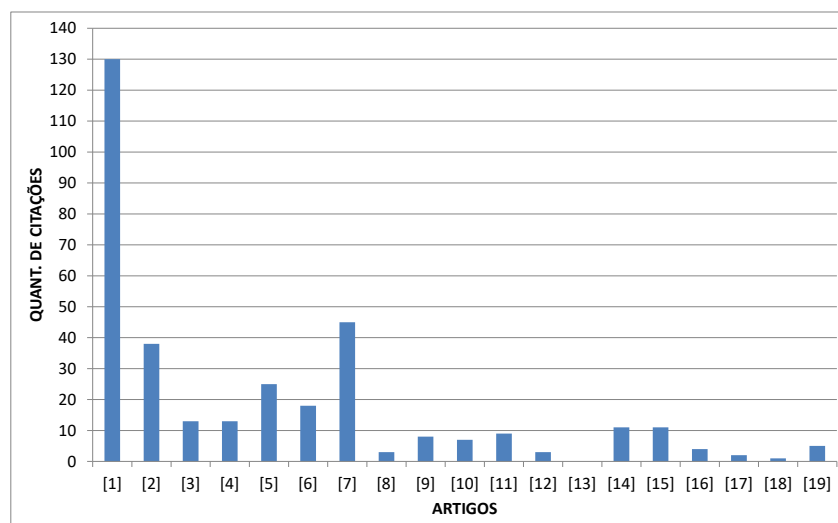
Figura 5 - Quantidade de publicações estratificada por ano



Fonte: Autoria própria

Considerando os artigos indexados nas bases de dados e listados no Quadro 1 (total de 19 artigos), estes foram citados 349 vezes na base Scopus e 301 vezes na base WoS. Na figura 6 apresenta-se o número de citações estratificadas por artigo na base Scopus.

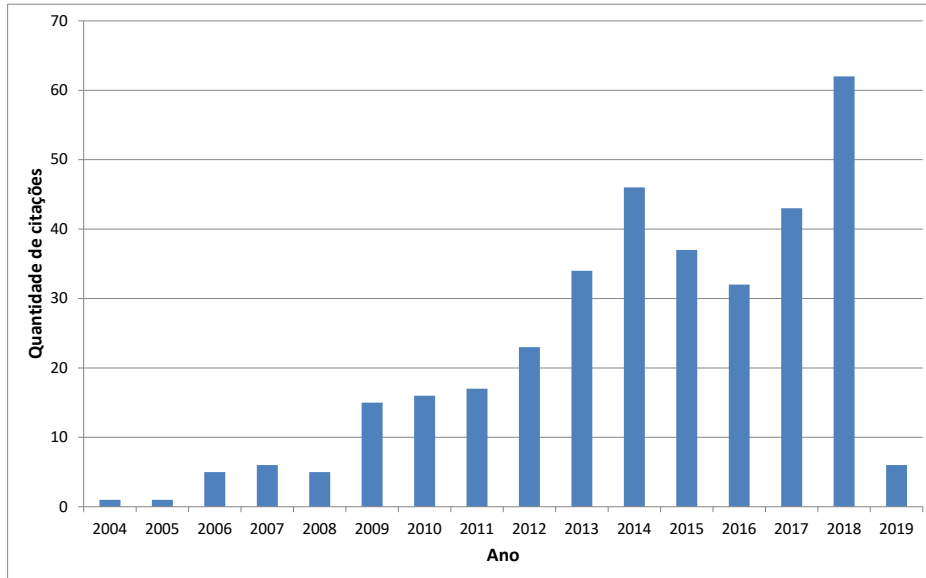
Figura 6 - Quantidade de citações estratificadas por artigo na base Scopus



Fonte: Autoria própria

Na figura 7 é apresentado o número de citações por ano, sendo observado um comportamento crescente ao longo dos anos.

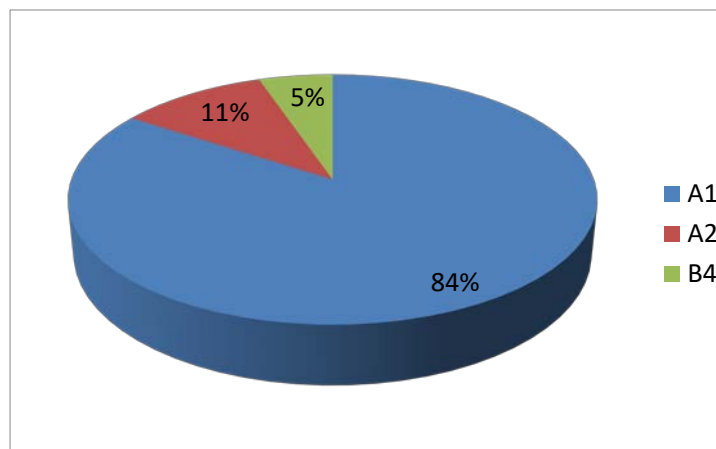
Figura 7 - Quantidade de citações estratificadas por ano na base Scopus



Fonte: Autoria própria

Na figura 8 apresenta-se o percentual de artigos indexados estratificados pelo Qualis, nas Engenharias III. Nota-se que o maior percentual dos artigos publicados pelo docente está no estrato A1 e 95% dos artigos em revista estão classificados como A1 ou A2, indicando a relevância das publicações.

Figura 8 - Percentual de artigos indexados estratificados pelo Qualis - Engenharias III



Fonte: Autoria própria

4.3 ANÁLISE DOS ARTIGOS MAIS CITADOS

De acordo com a base de dados Scopus, o docente possui índice h9, ou seja, que o docente possui pelo menos 9 artigos (no caso 10 artigos) que foram no mínimo citados 9 vezes, sendo estes listados no Quadro 3. No entanto, no Google Acadêmico, o índice h do docente é 11. Na última coluna do Quadro 3 apresentam-se as linhas de pesquisas abordadas nos artigos.

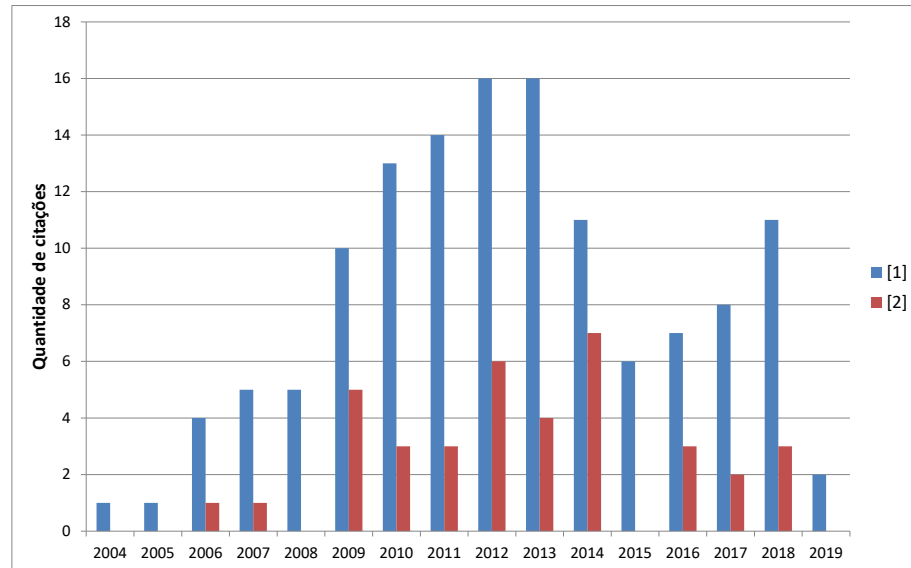
Quadro 3 – Artigos com mais citações, classificando o docente com o índice h9

	Ref. Artigo	Ano	Journal	Qualis	Fator de Impacto	Citações Scopus	Linha de pesquisa
1	[1]	2003	Progress in Energy and Combustion Science	A1	25,492	130	Exegoeconomia
2	[2]	2004	Progress in Energy and Combustion Science	A1	25,492	38	Exegoeconomia
3	[3]	2010	Applied Thermal Engineering	A1	3,771	13	Exegoeconomia
4	[4]	2011	Renewable and Sustainable Energy Reviews	A1	9,184	13	Termoeconomia
5	[5]	2012	Renewable and Sustainable Energy Reviews	A1	9,184	25	Exegoeconomia
6	[6]	2013	Renewable and Sustainable Energy Reviews	A1	9,184	19	Termoeconomia
7	[7]	2013	Renewable and Sustainable Energy Reviews	A1	9,184	45	Produção de Hidrogênio
8	[11]	2014	Applied Thermal Engineering	A1	3,771	9	Produção de Hidrogênio + Termoeconomia
9	[14]	2014	Applied Thermal Engineering	A1	3,771	11	Produção de Hidrogênio
10	[15]	2014	Renewable and Sustainable Energy Reviews	A1	9,184	11	Termoeconomia

Fonte: Autoria própria

Observa-se que os artigos mais citados foram publicados em revistas de classificação A1 pelo Qualis e que 80% deles foram na área de Termoeconomia e Exergoeconomia. Os artigos [1] e [2] foram elaborados através da aplicação dos métodos de análise exergoeconômica desenvolvidos pelo docente durante o doutorado e por seu orientador na sua livre-docência, aplicando os métodos a um mesmo estudo de caso e chegando a resultados semelhantes. Nestes artigos, são apresentados os métodos de análise termoeconômica baseados na Segunda Lei da Termodinâmica e aplicado na análise de quatro sistemas de cogeração. O objetivo das técnicas desenvolvidas é minimizar os custos operacionais da planta de cogeração, ou seja, o custo de produção exergética (EPC), assumindo taxas fixas de produção de eletricidade e vapor de processo na base de exergia. As variáveis selecionadas para a otimização são a pressão e a temperatura do vapor na saída da caldeira no caso da utilização da turbina a vapor, e a razão de pressão, a temperatura de exaustão da turbina e o fluxo de massa no caso da utilização de turbinas a gás. As equações para o cálculo dos custos de capital dos componentes e produtos são formuladas em função dessas variáveis de decisão. Uma aplicação do método usando dados reais de uma indústria química multinacional localizada no estado de São Paulo é apresentada. O sistema de cogeração que consiste em uma turbina a gás com um gerador de vapor de recuperação de calor, sem queima suplementar, tem o menor EPC. Estes artigos são citados mesmo após terem se passado mais de 10 anos de sua publicação, na figura 9 apresenta-se a distribuição das citações destes dois artigos ao longo dos anos. Uma das citações mais relevantes é a do artigo “Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review”, publicado na renomada revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews* em 2009, onde a metodologia exergoeconômica desenvolvida pelo docente figura entre as mais relevantes, conforme apresenta a tabela 11 do referido artigo, reproduzida aqui pela figura 10.

Figura 9 - Quantidade de citações estratificadas por ano na base Scopus dos artigos [1] e [2]



Fonte: Autoria própria

Figura 10 – Reprodução da tabela 11 do artigo “Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review”

Table 11

Some major works on the thermoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production systems.

Author(s)	Thermoeconomic methodology	Type of system
Tsatsaronis et al. [1]	LIFO	Simple gas turbine cogeneration
Tsatsaronis and Ho-Park [4]	SPECO/AVCO	Simple gas turbine cogeneration
Frangopoulos [22]	TFA	Complex thermal system
Frangopoulos [23]	TFA	Steam cycle cogeneration
Frangopoulos [24,25]	IFA	Steam cycle cogeneration
Frangopoulos [26,27]	TFA and optimization	Steam cycle cogeneration
von Spakovsky and Curti [29]	EFA	Cogeneration/heat pump facility
von Spakovsky and Evans [30]	EFA	Combined cycle cogeneration
Tsatsaronis and Winhold [31]	EEA	Combined cycle cogeneration
Lozano and Valero [33]	TEC	Simple thermal power plant
Erlach et al. [34]	STT	Combined cycle cogeneration
Valero et al. [36]	Conventional solution	CGAM problem
Tsatsaronis and Pisa [37]	SPECO/AVCO	CGAM problem
Frangopoulos [38]	TFA	CGAM problem
von Spakovsky [39]	EFA	CGAM problem
Valero et al. [40]	TEC	CGAM problem
Lazzaretto et al. [41]	Thermoeconomic diagnosis (TD)	TADEUS problem
Verda [42]	TD	TADEUS problem
Verda and Borchellini [43]	STT and TD	TADEUS problem
Hua et al. [44]	EEA	Combined cycle cogeneration
Kim et al. [45]	MOPSA	Gas turbine cogeneration system
Cerqueira and Nebra [46]	SPECO/TFA/TEC/TECD	Simple gas turbine cogeneration
Manolas et al. [47]	TFA and genetic algorithm (GA)	Industrial cogeneration system
Lazzaretto and Tsatsaronis [48]	EEA	Combined cycle cogeneration
Kwon et al. [51]	SPECO/MOPSA	Gas turbine cogeneration system
Lazzaretto and Tsatsaronis [52]	SPECO/EEA	Combined cycle cogeneration
Cziesla and Tsatsaronis [54]	IEA-fuzzy logic	Thermal power plant
Kwak et al. [57]	EEA	Thermal power plant
Kwak et al. [60]	MOPSA	CGAM problem
Valdes et al. [59]	TFA and GA	Combined cycle gas turbine plant
Silveira and Tuna [62,63]	EEA and optimization	Combined cycle cogeneration
Vieira et al. [65,75]	STT	CGAM problem
Zhang et al. [67]	STT	Coal fired thermal power plant
Erdil [68]	EEA and optimization	Combined cycle cogeneration
Mazur [69]	EEA-fuzzy logic	Combined cycle cogeneration
Bonnet et al. [70]	EEA	Micro-cogeneration
Colpan and Yesin [73]	SPECO	Combined cycle cogeneration
Li et al. [76]	TFA and optimization	Dist. multi-generation systems
Ozgener et al. [77]	SPECO	Geothermal district heating
Zaleta-Aquilar et al. [78]	EEA	Steam turbine
Unver and Kilic [79]	TEA	Combined cycle cogeneration
Abusoglu and Kanoglu [80,81]	SPECO	Diesel engine cogeneration

Fonte: Aabusoglu; Kkanoglu (2009).

O artigo [3] foi o resultado de um doutorado de uma docente da USP de Lorena, orientada pelo Prof. Dr. José Luz Silveira, em que o docente auxiliou na análise exergoeconômica. Neste trabalho, o método de análise funcional termoeconômica é aplicado a um sistema de refrigeração por compressão a vapor e depois a um sistema de cogeração usando turbina a vapor de contrapressão. Esta metodologia envolve aspectos econômicos relacionados à concepção de exergia, a fim de desenvolver uma ferramenta para auxiliar na seleção de equipamentos, escolha do modo de operação, bem como otimizar o projeto das usinas térmicas. Também apresenta os conceitos relacionados à exergia em âmbito geral e em termoeconomia, que combinam os princípios das ciências térmicas (termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos) e a engenharia econômica, para racionalizar decisões de investimento, desenvolvimento e operação de sistemas energéticos. Os resultados principais da aplicação do método funcional termoeconômico são os custos de produção de ar quente e ar frio no sistema de refrigeração e os custos de produção de eletricidade e vapor de processo no sistema de cogeração, bem como o EPC dos sistemas propostos.

O artigo [4] é resultado do projeto de pesquisa intitulado “Construção de Protótipos de Sistemas Gaseificadores de Biomassa para Geração de Energia Elétrica com Motor de Combustão Interna”, financiado pelo CNPq, desenvolvido entre 2007 e 2009. Este trabalho avalia e quantifica o impacto ambiental do uso de gás de síntese em motores de combustão interna associados ao gaseificador do tipo downdraft, considerando aspectos técnicos, econômicos e ecológicos. O conceito de eficiência ecológica é apresentado e depende do impacto ambiental causado pelas emissões de CO₂, SO₂, NO_x e material particulado (MP). Os fatores de emissão obtidos a partir de gás de síntese queimado em motores de combustão interna são comparados com os fatores de emissão obtidos da queima de gasolina, biodiesel, gás natural e de diesel. Este artigo considera aspectos técnicos e econômicos como: fluxo de massa de gás de síntese, gases de exaustão, ar de entrada no gaseificador e ar de entrada no MCI; capacidade de calor do *syngas*, eficiência térmica e eficiência de eletricidade do MCI, eficiência a frio do gaseificador, eficiência do sistema, custos de produção de eletricidade, de gás de síntese, de água quente e economia anual esperada.

Os resultados indicam que o sistema Gasificador/MCI é uma tecnologia atraente e tecnicamente viável, permitindo uma menor emissão de poluentes em comparação com outras tecnologias de combustão. Na análise ecológica, a queima do *syngas* teve uma melhor sustentabilidade ambiental do que a queima de combustíveis, como diesel e biodiesel B20. A análise econômica avaliou o gás de síntese, o custo de produção de água e água quente e a

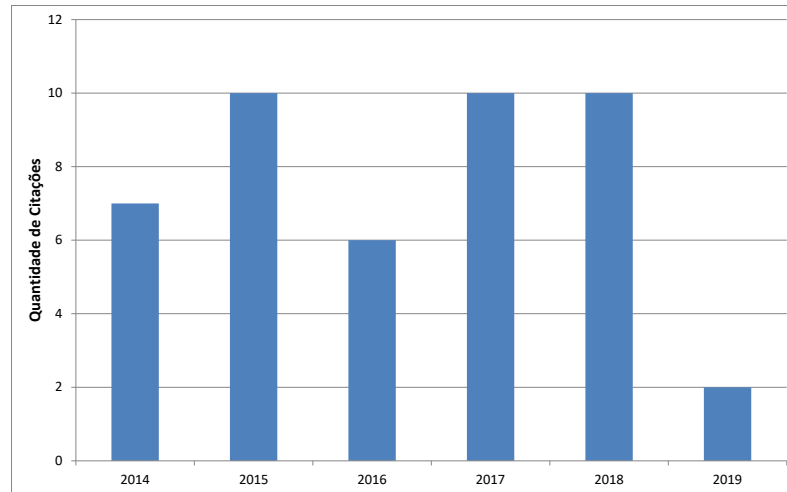
economia anual esperada no sistema Gaseificador/ICE, o estudo mostrou a viabilidade do sistema para o período de retorno de 4 anos adotando uma taxa de juros anual de 12%.

O artigo [5] foi o resultado de um mestrado de uma aluna visitante da Espanha, orientada pelo Prof. Dr. José Luz Silveira, em que o docente auxiliou na análise exergoeconômica. Neste trabalho, o método de análise funcional termoeconômica foi aplicado para permitir uma melhor configuração de uma planta de cogeração, em paridade térmica, associada a um hospital universitário, com geração de calor, frio e potência. A eficiência ecológica também foi avaliada. As configurações analisadas foram a associação do motor de combustão interna a gás natural com um HRSG para a produção de vapor e água quente e a associação com uma máquina de absorção para a produção de água gelada.

A crescente demanda por energia elétrica fotovoltaica motivou o estudo técnico e econômico, apresentado no artigo [6], de uma usina solar de 15 kW instalada em uma comunidade isolada, destacando a importância da necessidade de subsídio financeiro do governo. Neste trabalho avaliou-se a importância de parâmetros como taxa de juro anual, investimento, custo marginal de expansão da oferta de energia elétrica e subsídio do governo no tempo de amortização do capital investido. Os custos de aquisição e produção de energia elétrica do sistema de geração fotovoltaica foram comparados com os de um sistema tradicional de geração isolada de eletricidade utilizando motor a diesel. O estudo foi realizado em conjunto com um professor da USP de Lorena.

O artigo [7] é resultado do projeto de pesquisa intitulado “Desenvolvimento e Otimização de Sistemas de Produção de Hidrogênio para Acionamento de Células de Combustível”, financiado pela FAPESP, desenvolvido entre 2009 e 2012. Neste trabalho, são apresentados os aspectos técnicos, econômicos e ecológicos da produção de hidrogênio por reforma a vapor de biogás. O cálculo de viabilidade econômica foi realizado para avaliar o processo analisando os custos de investimento, operação e manutenção do reformador de vapor de biogás. Foi obtido um custo de produção de hidrogênio no valor de 0,27 US\$/kWh com um período de retorno de 8 anos e uma eficiência ecológica de 94,95%. Os resultados obtidos por essas análises mostraram que esse tipo de produção de hidrogênio é uma via ambientalmente atrativa. Este é o segundo artigo mais citado do autor, na figura 11 apresenta-se a distribuição das citações deste artigo desde a sua publicação. Este projeto deu início aos estudos do Grupo de Otimização em Sistemas Energéticos (GOSE) na área de produção de H_2 .

Figura 11 - Quantidade de citações estratificadas por ano na base Scopus do artigo [7]



Fonte: Autoria própria

Dando continuidade as pesquisas na área da produção e utilização do hidrogênio na geração de energia, foi realizada uma análise comparativa técnica, econômica e ecológica entre um motor de combustão interna (MCI) a diesel associado com um gerador de eletricidade, e uma célula combustível de membrana de troca de prótons (PEM) alimentada por hidrogênio produzido por reforma a vapor de etanol [11]. A análise técnica mostrou as vantagens da célula PEM em comparação ao MCI baseado em aspectos energéticos e exergéticos. A análise econômica demonstrou que as células de combustível não são competitivas em termos econômicos quando comparadas ao motor de combustão interna acionando um gerador de eletricidade com a mesma capacidade de geração, só será economicamente viável em longo prazo devido aos grandes investimentos necessários. A análise ambiental foi baseada em conceitos de CO₂ equivalente, indicador de poluição e eficiência ecológica. Diferente do sistema MCI, a célula PEM não emite poluentes diretamente e a emissão relacionada a essa tecnologia está ligada principalmente à produção de hidrogênio. A eficiência ecológica da célula PEM foi de 96% considerando o ciclo de dióxido de carbono, para o sistema MCI este parâmetro atingiu 51%. Do ponto de vista exergético, a comparação mostrou que o sistema de célula de combustível pode ser mais eficiente que o MCI. O MCI utilizando diesel como combustível obteve uma eficiência exergética de 22,36%, contra 40,34% obtida pela célula a combustível.

O artigo [14] foi o resultado de uma orientação de doutorado realizado pelo docente. Este trabalho apresentou uma análise técnica, ecológica e econômica da incorporação da produção de hidrogênio através da reforma a vapor de etanol em uma indústria tradicional de cana-de-açúcar (açúcar, etanol). Essa proposta foi alcançada através de uma redução na

quantidade de combustível (bagaço) normalmente utilizada para gerar eletricidade sem afetar os processos de produção de açúcar e etanol. O bagaço excedente é utilizado para produzir vapor para produção de hidrogênio. Para tanto, determinou-se em função da quantidade de bagaço disponível o volume máximo de hidrogênio que pode ser produzido e seus insumos (etanol hidratado e anidro). A incorporação deste novo processo foi avaliada através de uma comparação desta planta inovadora com as tradicionais. Observou-se que a eficiência da usina com a produção de hidrogênio apresentou um aumento de aproximadamente 6% para a produção de 5000 Nm³/h de hidrogênio.

Através de uma parceria entre o GOSE, USP-Lorena e um pesquisador da Universidade de Perugia, na Itália, realizou-se um intercâmbio de um aluno de mestrado que originou no artigo [15]. O sistema de cogeração deste estudo consiste em um motor de combustão interna usando gás natural ou biogás como combustível, combinado com dois trocadores de calor e um *chiller* de absorção utilizando o par água-amônia. Este trabalho apresentou uma comparação energética e econômica entre gás natural e biogás como combustível utilizado pelo sistema proposto. A análise econômica também comparou os custos de produção no Brasil e na Itália. Os resultados são úteis para identificar as aplicações viáveis para este sistema, como o setor residencial em áreas isoladas, hotéis, universidades, fazendas, etc.

5 CONCLUSÃO

A produção científica após o doutorado do docente abordou assuntos de interesse a área de energia, fortalecendo as linhas de pesquisa do departamento em que atua nos temas voltados a análise exergética e exergoeconômica de sistemas de geração de energia elétrica e térmica.

Os princípios e métodos da análise exergética estão bem estabelecidos. A análise de segunda lei fornece a ferramenta para uma clara distinção entre perdas de energia para o meio ambiente e irreversibilidades internas no processo, e avalia quantitativamente o efeito de fenômenos irreversíveis que aumentam a imperfeição termodinâmica do processo considerado. Os critérios de projeto ideais para qualquer sistema térmico podem ser alcançados maximizando a saída exergética e a eficiência exergética do sistema, ou reduzindo a irreversibilidade do sistema. Termodinamicamente há uma relação direta entre a irreversibilidade do processo e a quantidade de trabalho útil dissipada durante o processo.

A análise exergoeconômica avalia o custo de recursos consumidos, dinheiro e irreversibilidades do sistema em termos dos processos de produção globais. Metodologias apresentadas por meio da exergoeconomia podem ajudar a indicar como os recursos podem ser usados efetivamente para o desenvolvimento sustentável. A avaliação do custo dos fluxos e processos em um sistema complexo ajuda a entender o processo de formação de custos desde os recursos de entrada até os produtos finais. Essas análises resolvem problemas relacionados a sistemas complexos de energia, como produção combinada de calor e energia, que não poderiam ser resolvidos usando a análise de energia convencional.

Após aplicar as metodologias de exergoeconomia em sistemas de cogeração, o docente passou a aplicar em outros sistemas, primeiro foi em sistemas de produção de hidrogênio por reforma a vapor de biogás e de etanol. As análises foram efetuadas no protótipo reformador a vapor de biogás desenvolvido pelo grupo de pesquisa que participa e foram descritas em seu ultimo artigo indexado publicado (TUNA et. al, 2018). Em seguida, o docente concentra suas pesquisas e orientações no campo da gaseificação de biomassa, também com a construção de um protótipo gaseificador de leito fluidizado (em fase ajustes finais e posteriores testes). Além da gaseificação, o docente atua no IPBEN, Unidade de Guaratinguetá, realizando pesquisas e orientando na área de bioenergia, mais precisamente na geração fotovoltaica, geração eólica e produção de hidrogênio por eletrólise.

A partir destas pesquisas desenvolvidas após o doutorado em colaboração com outros pesquisadores do grupo, e de suas orientações de mestrado e doutorado, 19 artigos e 6

capítulos de livro foram publicados até o ano de 2018. Destes, 10 foram selecionados para a análise crítica, sendo identificadas as contribuições e os impactos destas publicações através das respectivas citações.

Para os próximos anos, esperam-se publicações relevantes voltadas a gaseificação de biomassa, geração híbrida, biocombustíveis e índices de sustentabilidade, em decorrência de defesas de alunos de pós-graduação orientados pelo docente.

REFERÊNCIAS

- ABUSOGLU, A.; KANOGLU, M. Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2295-2308, 2009.
- ALVARADO, S.; GHERARDELLI, C. Exergoeconomic optimization of a cogeneration plant. **Energy**, Oxford, v.19, n. 12, p.1225-1233, 1994a.
- ALVARADO, S.; GHERARDELLI, C. Input-output exergoeconomic optimization of multicomponent-multiproduct systems methodology. **Energy**, Oxford, v.19, p.251-258, 1994b.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design and optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- BIDINI, L. G.; STECCO, S. S. A computer code using exergy for optimizing thermal plants. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v.113, n. 1, p.145-150, 1991.
- EL-SAYED, Y. M. A decomposition strategy for thermoeconomic optimization. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v.111, n. 3, p.111-120, 1989.
- EL-SAYED, Y. M. A second-law-based optimization: part 1 – methodology. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v.118, n.4, p.693-703, 1996.
- EL-SAYED, Y. M. A second-law-based optimization: part 2 - application. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v.118, n.4, p.698, 1996.
- ELSAYED Y. M.; APLENC A. J. Application of the thermoeconomic approach to the analysis and optimization of vapor–compression desalting system. Transactions of ASME, **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v. 92, n. 1, p. 17–26, 1970.
- EL–SAYED Y.M.; EVANS R.B. Thermoeconomics and the design of heat systems. Transactions of ASME, **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v. 92, n.1, p. 2735, 1970.
- EL-SAYED, Y. M.; GAGGIOLI, R. A. A critical review of second law costing methods: I: background and algebraic procedures. **Journal of Energy Resources Technologies**, v. 111, n. 1, p. 1 – 7, 1989.
- EVANS, R. B. Thermoeconomic isolation and exergy analysis. **Energy**, Oxford, v. 5, p. 805 – 821, 1980.
- FRANGOPOULOS C. A. **Thermo-economic functional analysis: a method for optimal design or improvement of complex thermal systems**. 1983. 211f. Thesis (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Georgia Institute Of Technology, Atlanta, 1983.

FRANGOPOULOS, C. A. Thermo-economic functional analysis and optimization. **Energy**, Oxford, v.12, n. 7, p.563-571, 1987.

FRANGOPOULOS, C. A. Functional decomposition for optimal design of complex thermal systems. **Energy**, v.13, n. 3, p.239-244, mar. 1988.

FRANGOPOULOS, C. A. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem, **Energy**, v. 19, n. 3, 1994. p. 323-342

FRANGOPOULOS, C. A. **Methods of energy systems optimization**. Summer school notes: optimization of energy systems and processes. Gliwice, Poland. 2003. 120 p.

FRANGOPULOS, C.A.; EVANS, R. B. Thermoeconomics isolation and optimization of thermal system components. Second Law Aspects of Thermal Design. In: 22ND NATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE, Niagara Falls, NY, **Proceedings** [...]. HDT v. 33, p. 87-94, New York: ASME, 1984.

GAGGIOLI, R. A. Efficiency and costing. **A.C.S. Symposium series**, Canadá, n. 235, p.3-12, 1983.

GAGGIOLI, R. A.; EL-SAYED, Y. M.; EL-NASHAR, A. M.; KAMALUDDIN, B. Second law efficiency and cost analysis of a combined power and desalination plant. **Journal of Energy Resources Technology**, v.110, p.114-118, 1988.

GOOGLE ACADÊMICO. **Celso Eduardo Tuna**. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/citations?user=dJ53LR8AAAAJ&hl=pt-BR>. Acesso em: 05 fev. 2019.

KENNEY, W. F. **Energy conservation in the process industries**. Orlando: Academic Press, 1984.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. London: Butterworths, 1985.

LAZZARETTO, A.; MACOR, A. Direct calculation of average and marginal costs from the productive structure of an energy system. **Journal of Energy Resources Technology**, v.117, p.171-178, 1995.

LAZZARETTO, A.; TOFFOLO, A.; REINI, M.; TACCANI, R.; ZALETA-AQUILAR, A.; RANGEL-HERNANDEZ, V.; VERDA, V. Four approaches compared on the TADEUS (thermoeconomic approach to the diagnosis of energy utility systems) test case. **Energy**, Oxford, v. 31, p. 1586 – 1613, 2006;

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. Speco: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, **Energy**, Oxford, v. 31, p 1257-1289, 2006.

LONDON, A. L. Economics and the second law: an engineering view and methodology. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.25, p.743-751, 1982.

MORAN, M. J.; SCIUBBA, E. Exergy analysis: principle and practice. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, New York, v.116, p.285-290, 1994.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

MOROSUK, T.; TSATSARONIS, G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems, **Energy**, Oxford, v. 169, p 238-246, 2019.

RESEARCHID. **Tuna, Celso E.:** researchID Y-9381-2018. Disponível em: <<https://www.researchid.com/workspace.action>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

SCOPUS. **Author details:** Tuna, C. E., author ID: 6507957135. Disponível em: <<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507957135>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

SILVEIRA, J. L.; BALESTIERI, J. A. P.; SANTOS, A. H. M.; ALMEIDA, R. A.; Thermoeconomic analysis: a criterion for the selection of cogeneration systems. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 1996, Atlanta. **Proceedings** [...].Atlanta: ASME, 1996. p.235-240.

SILVEIRA, J. L.; NOGUEIRA, L. H. N. Thermoeconomic functional analysis applied in cogenerations systems associated to cellulose plants. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EFFICIENCY, COSTS, OPTIMIZATION AND SIMULATION OF ENERGY SYSTEMS, 1992, Zaragoza. **Proceedings** [...]. Zaragoza: ASME, 1992. p.381-386.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E. Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems: part I. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 479 – 485, 2003.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E. Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems: part II. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 30, n. 6, p. 673 – 678, 2004.

SZARGUT, J. **Exergy method:** technical and ecological applications. Southampton, UK: WIT press, 2005.

TSATSARONIS, G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. **Progress in Energy Combustion and Science**, Oxford, v.19, n.3, p.227-257, 1993.

TSATSARONIS, G.; HO-PARK, M. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems. **Energy Conversion Management**, v. 43, n. 9-12, p. 1259 – 1270, 2002.

TSATSARONIS, G.; LIN, L.; PISA, J. Exergy costing in Exergoeconomics. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 115, n. 1, p. 9 – 16, 1993.

TSATSARONIS, G., WINHOLD, M. Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants: I: a new general methodology. **Energy**, Oxford, v.10, p.69-80, 1985a.

TSATSARONIS, G., WINHOLD, M. Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants – II: analysis of a coal-fired steam power plant. **Energy**, Oxford, v.10, p.81-94, 1985b.

TUNA, C.E.; SILVEIRA, J.L.; SILVA, M.E.; BOLOY, R.M.; BRAGA, L.B.; PÉREZ, N.P. Biogas steam reformer for hydrogen production: Evaluation of the reformer prototype and catalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.43, n. 4, p.2108 - 2120, 2018.

VALERO, A.; TORRES, C.; SERRA, L. A general theory of thermoeconomics: part I. structural analysis, part II: the relative free energy function. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EFFICIENCY, COSTS, OPTIMIZATION AND SIMULATION OF ENERGY SYSTEMS, 1992, Espanha. **Proceedings** [...] Espanha, 1992, p.137-154.

VALERO, A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L.; TSATSARONIS, G.; PISA, J.; FRANGOPOULOS, C. A; VON SPAKOVSKY, M. R. CGAM problem: definition and conventional solution. **Energy**, Oxford, v. 19, n. 3, p. 279 – 286, 1994.

VERDA, V. Accuracy level in thermoeconomic diagnosis of energy systems. **Energy**, Oxford, v. 31, n. 15, p. 3248 – 3260, 2006.

VERDA, V.; BORCHIELLINI, R. Exergy method for the diagnosis of energy systems using measured data. **Energy**, v. 32, n. 4, p. 490 – 498, 2007

VON SPAKOVSKY, M. R. The design and performance optimization of thermal system components. **Journal of Energy Resources Technology**, v.111, n. 4, p.231-238, 1989.

APÊNDICE A – Lista dos Artigos Avaliados

- [1] SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E. Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 29, p. 479 - 485, 2003.
- [2] SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E. Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part II. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 30, p. 673 - 678, 2004.
- [3] SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W.Q.; VILLELA, I. A. C. A contribution for thermoeconomic modelling: a methodology proposal. **Applied Thermal Engineering**. v. 30, p. 1734 - 1740, 2010.
- [4] BOLOY, R. A. M.; SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; CORONADO, C. R.; ANTUNES, J. S. Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: technical and economic aspects. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v. 15, p. 5194 - 5201, 2011.
- [5] SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. Q.; TUNA, C. E.; VILLELA, I. A. C.; MIRO, L. S. Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v. 16, p. 2894 - 2906, 2012.
- [6] SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q. The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**.v. 20, p. 133 - 141, 2013.
- [7] BRAGA, L. B.; SILVEIRA, J. L.; SILVA, M. E. da; TUNA, C. E.; MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T. Hydrogen production by biogas steam reforming: a technical, economic and ecological analysis. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v. 28, p. 166 - 173, 2013.
- [8] SOBRINHO, P. M.; TUNA, C. E. Experimental research on the influence of the air humidity conditions in an air conditioning system. **Experimental Thermal and Fluid Science**. v. 49, p. 152 - 159, 2013.
- [9] DINIZ FILHO, P. T.; SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q. Energetic, ecologic and fluid-dynamic analysis of a fluidized bed gasifier operating with sugar cane bagasse. **Applied Thermal Engineering**. v. 57, p. 116 - 124, 2013.
- [10] CORONADO, C. J. R.; TUNA, C. E.; ZANZI, R.; VANE, L. F.; SILVEIRA, J. L. Development of a thermoeconomic methodology for the optimization of biodiesel production. Part I: Biodiesel plant and thermoeconomic functional diagram. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v. 23, p. 138 - 146, 2013.
- [11] BRAGA, L. B.; SILVEIRA, J. L.; SILVA, M. E. da; MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; TUNA, C. E. Comparative analysis between a pem fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: technical, economical and ecological aspects. **Applied Thermal Engineering**. v. 63, p. 354 - 361, 2014.

- [12] SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q.; SILVA, M. E. da; MARTINELLI, V. J. Thermodynamic and economic analysis of hydrogen production integration in the Brazilian sugar and alcohol industry. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v. 30, p. 869 - 876, 2014.
- [13] SANTOS, C. F. P.; PAULINO, R. F. S.; TUNA, C. E.; SILVEIRA, J. L.; ARAUJO, F. H. M. thermodynamics analysis and ecological efficiency of a combined cycle power plant. **Engenharia Térmica**. v. 13, p. 03 - 08, 2014.
- [14] SILVEIRA, J. L.; MARTINELLI, V. J.; VANE, L. F.; FREIRE JUNIOR, J. C.; ZANZI, R.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q.; PAULINO, R. F. S. Incorporation of hydrogen production process in a sugar cane industry: steam reforming of ethanol. **Applied Thermal Engineering**. v. 71, p. 94 - 103, 2014.
- [15] BRIZI, F.; SILVEIRA, J. L.; DESIDERI, U.; REIS, J. A.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q. Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: comparison between natural gas and biogas. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v. 38, p. 193 - 211, 2014.
- [16] CORONADO, C. R.; TUNA, C. E.; ZANZI, R.; VANE, L. F.; SILVEIRA, J. L. Development of a thermoeconomic methodology for optimizing biodiesel production. Part II: Manufacture exergetic cost and biodiesel production cost incorporating carbon credits, a Brazilian case study. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v. 29, p. 565 - 572, 2014.
- [17] PÉREZ, N. P.; SADAMITSU, M. T.; SILVEIRA, J. L.; ANTUNES, J. S.; TUNA, C. E.; VALLE, A. E.; SILVA, N. F. Energetic and exergetic analysis of a new compact trigeneration system run with liquefied petroleum gas. **Energy (Oxford)**. v.1, p.1 - 9, 2015.
- [18] BOLOY, R. A. M.; SILVA, M. E. da; VALLE, A. E.; SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E. Thermoeconomic analysis of hydrogen incorporation in a biodiesel plant. **Applied Thermal Engineering**. v. 113, p. 519 - 528, 2017.
- [19] TUNA, C. E.; SILVEIRA, J. L.; SILVA, M. E. da; BOLOY, R. M.; BRAGA, L. B.; PÉREZ, N. P. Biogas steam reformer for hydrogen production: evaluation of the reformer prototype and catalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 43, p. 2108 - 2120, 2018.

APÊNDICE B – Lista dos Capítulos de Livros Avaliados

- [20] SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. Q.; ANTUNES, J. S.; TUNA, C. E.; RODRIGUEZ, C. J. C.; BOLOY, R. A. M. Biodiesel e gás de gaseificação em motor de combustão interna. In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (eds), **Bioenergia: Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação**. São Paulo: Editora Unesp, 2012, v. 1, cap. 19, p. 633-656.
- [21] SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; PEDROSO, D. T.; SILVA, M. E. da; MACHIN, E. B.; BRAGA, L. B.; MARTINELLI, V. J. Technological advancements in biohydrogen production and bagasse gasification process in the sugarcane industry with regard to brazilian conditions. In: da SILVA S., CHANDEL A. (eds). **Biofuels in Brazil**. Springer International Publishing, 2014, v.1, cap. 18, p. 393-411.
- [22] BRAGA, L. B.; TUNA, C. E.; ARAUJO, F. H. M. de; VANE, L. F.; PEDROSO, D. T.; SILVEIRA, J. L. Thermodynamic analysis of hydrogen production processes. In: SILVEIRA, J. L. **Sustainable Hydrogen Production Process – Energy, Economic and Ecological Issues - Green Energy and Technology**. Springer International Publishing, 2017, v.1, cap. 3, p. 77-108.
- [23] BRAGA, L. B.; SILVA, M. E. da; COLOMBAROLI, T. S.; TUNA, C. E.; ARAUJO, F. H. M. de; VANE, L. F.; PEDROSO, D. T.; SILVEIRA, J. L. Hydrogen production processes. In: SILVEIRA, J. L. **Sustainable Hydrogen Production Process – Energy, Economic and Ecological Issues - Green Energy and Technology**. Springer International Publishing, 2017, v. 1, cap. 2, p. 5-76.
- [24] BRAGA, L. B.; TUNA, C. E.; ARAUJO, F. H. M. de; VANE, L. F.; PEDROSO, D. T.; SILVEIRA, J. L. Economic studies of some hydrogen production processes. In: SILVEIRA, J. L. **Sustainable hydrogen production process – Energy, economic and ecological issues - Green energy and technology**. Springer International Publishing, 2017, v.1, cap. 4, p. 109-125.
- [25] BRAGA, L. B.; TUNA, C. E.; ARAUJO, F. H. M. de; VANE, L. F.; PEDROSO, D. T.; SILVEIRA, J. L. Ecological efficiency of some hydrogen production processes. In: SILVEIRA, J. L. **Sustainable Hydrogen Production Process – Energy, Economic and Ecological Issues - Green Energy and Technology**. Springer International Publishing, 2017, v.1, cap. 5, p. 127-137.

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS

(continua)

Scopus

Citation overview

[Back to document results](#)

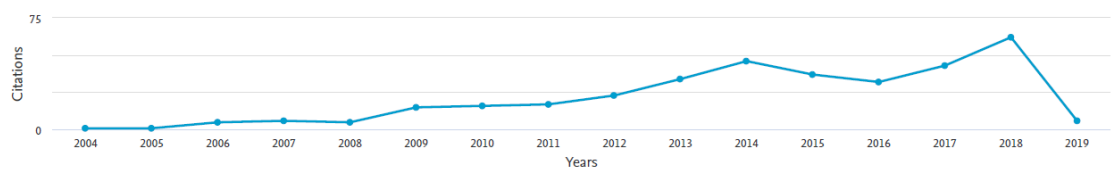
[Export](#) [Print](#)

This is an overview of citations for the documents you've selected.

Document *h*-index : 9 [View *h*-graph](#)

19 cited documents [+ Save to list](#)

Date range: 2004 to 2019 ☐ Exclude self citations of all authors ☐ Exclude citations from books [Update](#)



Sort on: [Date \(newest\)](#)

☐ Page ☐ Remove

Documents	Citations	<2004	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Subtotal	>2019	Total	
		Total	0	1	1	5	6	5	15	16	17	23	34	46	37	32	43	62	6	349	0	349
☐ 1	Biogas steam reformer for hydrogen production: Evaluation of...	2018																5	1	6		6
☐ 2	Thermoeconomic analysis of hydrogen incorporation in a biodi...	2017																1		1		1
☐ 3	Energetic and exergetic analysis of a new compact trigenerat...	2015															1	1		2		2
☐ 4	Incorporation of hydrogen production process in a sugar cane...	2014													4	1	2	4		11		11
☐ 5	Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal...	2014												1	1	1	1	5		9		9
☐ 6	Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogen...	2014													3	3	2	3		11		11
☐ 7	Technological advancements in biohydrogen production and bag...	2014															1			1		1
☐ 8	Thermodynamic and economic analysis of hydrogen production i...	2014												1			1	1		3		3
☐ 9	Development of a thermoeconomic methodology for optimizing b...	2014													2	1	1			4		4
☐ 10	Experimental research on the influence of the air humidity c...	2013														1		2		3		3
☐ 11	Energetic, ecologic and fluid-dynamic analysis of a fluidize...	2013												1	2		2	2	1	8		8
☐ 12	The need of subsidy for the implementation of photovoltaic s...	2013												4	1	2	5	7		19		19
☐ 13	Development of a thermoeconomic methodology for the optimiza...	2013												1	1	2	2	1		7		7
☐ 14	Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, ...	2013												7	10	6	10	10	2	45		45

Fonte: Scopus (2019).

Display: 20 results per page 1 ^ Top of page

[Help](#)

[Contact us](#)

RELX Group™

Fonte: Scopus (2019).

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS (continuação)

05/02/2019

Celso Eduardo Tuna - Citações do Google Acadêmico



Celso Eduardo Tuna

Unesp
- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
Termodinâmica
Cogeração
Biocombustíveis

	Todos	Desde 2014
Citações	535	349
Índice h	11	10
Índice i10	13	12

TÍTULO	CITADO POR	ANO
Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I JL Silveira, CE Tuna Progress in energy and Combustion Science 29 (6), 479-485	173	2003
Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems—part II JL Silveira, CE Tuna Progress in energy and Combustion Science 30 (6), 673-678	68	2004
Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis LB Braga, JL Silveira, ME da Silva, CE Tuna, EB Machin, DT Pedroso Renewable and Sustainable Energy Reviews 28, 166-173	60	2013
Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital JL Silveira, WQ Lamas, CE Tuna, IAC Villela, LS Miro Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (5), 2894-2906	39	2012
The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil JL Silveira, CE Tuna, WQ Lamas Renewable and Sustainable Energy Reviews 20, 133-141	36	2013
Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects RAM Boloy, JL Silveira, CE Tuna, CR Coronado, JS Antunes Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (9), 5194-5201	27	2011
Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas F Brizi, JL Silveira, U Desideri, JA dos Reis, CE Tuna, ... Renewable and Sustainable Energy Reviews 38, 193-211	21	2014
A contribution for thermoeconomic modelling: A methodology proposal JL Silveira, CE Tuna, W de Queiroz Lamas, I Aparecida de Castro Villela Applied Thermal Engineering 30 (13), 1734-1740	18	2010
Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: Technical, economical and ecological aspects LB Braga, JL Silveira, M Evaristo da Silva, EB Machin, DT Pedroso, ... Applied Thermal Engineering 63 (1), 354-361	17	2014
Incorporation of hydrogen production process in a sugar cane industry: Steam reforming of ethanol JL Silveira, VJ Martinelli, LF Vane, JCF Junior, RAZ Vigouroux, CE Tuna, ... Applied Thermal Engineering 71 (1), 94-103	16	2014
Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems, Part 1 JL Silveira, CE Tuna Progress in Energy and Combustion Science 29, 479-485	13	2003
Development of a thermoeconomic methodology for the optimization of biodiesel production—Part I: Biodiesel plant and thermoeconomic functional diagram CR Coronado, CE Tuna, R Zanzi, LF Vane, JL Silveira Renewable and Sustainable Energy Reviews 23, 138-146	11	2013
Energetic, ecologic and fluid-dynamic analysis of a fluidized bed gasifier operating with sugar cane bagasse PT Diniz Filho, JL Silveira, CE Tuna, W de Queiroz Lamas Applied Thermal Engineering	11	2013
Development of a thermoeconomic methodology for optimizing biodiesel production. Part II: Manufacture exergetic cost and biodiesel production cost incorporating carbon credits ... CR Coronado, CE Tuna, R Zanzi, LF Vane, JL Silveira Renewable and Sustainable Energy Reviews 29, 565-572	5	2014

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS

(continuação)

05/02/2019

Celso Eduardo Tuna - Citações do Google Acadêmico

TÍTULO	CITADO POR	ANO
THERMODYNAMICS ANALYSIS AND ECOLOGICAL EFFICIENCY OF A COMBINED CYCLE POWER PLANT CF de Paula Santos, RFS Paulino, CE Tuna, J Iuz Silveira, ...	4 *	2014
Experimental Research on the Influence of the Air Humidity Conditions in an Air Conditioning System PM Sobrinho, CE Tuna Experimental Thermal and Fluid Science	4	2013
Thermodynamic and economic analysis of hydrogen production integration in the Brazilian sugar and alcohol industry JL Silveira, CE Tuna, WQ Lamas, ME da Silva, VJ Martinelli Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, 869-876	3	2014
Thermoeconomic analysis of hydrogen incorporation in a biodiesel plant RAM Boloy, ME Silva, AE Valle, JL Silveira, CE Tuna Applied Thermal Engineering 113, 519-528	2	2017
Hydrogen Production Processes LB Braga, ME da Silva, TS Colombaroli, CE Tuna, FHM de Araujo, ... Sustainable Hydrogen Production Processes, 5-76	2	2017
Energetic and exergetic analysis of a new compact trigeneration system run with liquefied petroleum gas NP Pérez, MT Sadamitsu, JL Silveira, JS Antunes, CE Tuna, AE Valle, ... Energy 90, 1411-1419	2	2015

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS

(continuação)

27/12/2018
ResearcherID.com

Home
My Researcher Profile
Refer a Colleague
Logout
Search
Interactive Map
EndNote
Publons >

Tuna, Celso E
Get A Badge
ResearcherID Labs
Your labs page and badge show only your public data

ResearcherID: Y-9381-2018
Other Names:
E-mail: celso.tuna@unesp.br
URL: http://www.researcherid.com/rid/Y-9381-2018
Subject: Enter a Subject
Keywords: Enter a Keyword
Publons: Track peer review work with Publons
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2020-7063

Exchange Data With ORCID

My Institutions (more details)
Primary Institution: UNESP - São Paulo State University
Sub-org./Dept:
Role: Researcher (Academic)
Joint Affiliation:
Sub-org./Dept:
Role:
Past Institutions:

Manage Profile
Preview Public Version

My Publications
My Publications (23)
View Publications
Citation Metrics
Manage | Add

ResearcherID labs
Create A Badge
Collaboration Network
Citing Articles Network

Publication Groups
Publication List 1 (0)
https://www.researcherid.com/Workspace.action

My Publications: View

This list is to be used for publications that you have authored. You have the ability to make this list public or private. If public, then visitors of ResearcherID can see your scholarly output, and your list will be sent to the *Web of Science* (click here for more information). Click on the **Manage Profile** button at the top-right corner of the page and select the Publication Lists tab to change the privacy settings of your data.

23 publication(s)
Page 1 of 1
Go

Sort by: Times Cited
Results per page: 25

1. Title: Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I
Author(s): Silveira, J.L.; Tuna, C.E.
Source: Progress in Energy and Combustion Science Volume: 29 Issue: 6 Pages: 479-485 Published: 2003
Times Cited: 114
DOI: 10.1016/S0360-1285(03)00041-8 / Author-provided URL :

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS

(continuação)

2/5

27/12/2018

[View Publications](#)
[Citation Metrics](#)
 Manage | Add

[Publication List 2 \(0\)](#)
[View Publications](#)
[Citation Metrics](#)
 Manage | Add

[Help](#)
[Refer a Colleague](#)
[How to use these lists](#)

ResearcherID.com

2. **Title:** Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis
Author(s): Braga, L.B.; Silveira, J.L.; Da Silva, M.E.; et al.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 28 **Pages:** 166-173 **Published:** 2013
Times Cited: 38
DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.060  / **Author-provided URL :**  added 26-Dec-18
3. **Title:** Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems - Part II
Author(s): Silveira, J.L.; Tuna, C.E.
Source: Progress in Energy and Combustion Science **Volume:** 30 **Issue:** 6 **Pages:** 673-678 **Published:** 2004
Times Cited: 32
DOI: 10.1016/j.pecs.2003.06.001  / **Author-provided URL :**  added 26-Dec-18
4. **Title:** Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital
Author(s): Silveira, J.L.; Lamas, W.D.Q.; Tuna, C.E.; et al.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 16 **Issue:** 5 **Pages:** 2894-2906 **Published:** 2012
Times Cited: 24
DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.007  / **Author-provided URL :**  added 26-Dec-18
5. **Title:** The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil
Author(s): Silveira, J.L.; Tuna, C.E.; Lamas, W.D.Q.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 20 **Pages:** 133-141 **Published:** 2013
Times Cited: 19
DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.054  / **Author-provided URL :**  added 26-Dec-18
6. **Title:** Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects
Author(s): Boly, R.A.M.; Silveira, J.L.; Tuna, C.E.; et al.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 15 **Issue:** 9 **Pages:** 5194-5201 **Published:** 2011
Times Cited: 12
DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.009  / **Author-provided URL :**  added 26-Dec-18
7. **Title:** Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas
Author(s): Brizi, F.; Silveira, J.L.; Desideri, U.; et al.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 38 **Pages:** 193-211 **Published:** 2014
Times Cited: 10
DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.088  / **Author-provided URL :**  added 26-Dec-18
8. **Title:** A contribution for thermoeconomic modelling: A methodology proposal
Author(s): Silveira, J.L.; Tuna, C.E.; De Queiroz Lamas, W.; et al.
Source: Applied Thermal Engineering **Volume:** 30 **Issue:** 13 **Pages:** 1734-1740 **Published:** 2010
Times Cited: 10
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.04.003  / **Author-provided URL :**  added 26-Dec-18

Fonte: ResearchID (2018).

<https://www.researcherid.com/Workspace.action>

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS

(continuação)

3/5

27/12/2018

ResearchID.com

9. **Title:** Incorporation of hydrogen production process in a sugar cane industry: Steam reforming of ethanol
Author(s): Silveira, J.L.; Martinelli, V.J.; Vane, L.F.; et al.
Source: Applied Thermal Engineering **Volume:** 71 **Issue:** 1 **Pages:** 94-103 **Published:** 2014
Times Cited: 9
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.032  / **Author-provided URL :** 
added
26-Dec-18
10. **Title:** Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: Technical, economical and ecological aspects
Author(s): Braga, L.B.; Silveira, J.L.; Evaristo Da Silva, M.; et al.
Source: Applied Thermal Engineering **Volume:** 63 **Issue:** 1 **Pages:** 354-361 **Published:** 2014
Times Cited: 7
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.10.053  / **Author-provided URL :** 
added
26-Dec-18
11. **Title:** Development of a thermoeconomic methodology for the optimization of biodiesel production - Part I: Biodiesel plant and thermoeconomic functional diagram
Author(s): Coronado, C.R.; Tuna, C.E.; Zanzi, R.; et al.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 23 **Pages:** 138-146 **Published:** 2013
Times Cited: 6
DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.015  / **Author-provided URL :** 
added
26-Dec-18
12. **Title:** Energetic, ecologic and fluid-dynamic analysis of a fluidized bed gasifier operating with sugar cane bagasse
Author(s): Diniz Filho, P.T.; Silveira, J.L.; Tuna, C.E.; et al.
Source: Applied Thermal Engineering **Volume:** 57 **Issue:** 1-2 **Pages:** 116-124 **Published:** 2013
Times Cited: 5
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.01.045  / **Author-provided URL :** 
added
26-Dec-18
13. **Title:** Biogas steam reformer for hydrogen production: Evaluation of the reformer prototype and catalysts
Author(s): Tuna, C.E.; Silveira, J.L.; da Silva, M.E.; et al.
Source: International Journal of Hydrogen Energy **Published:** 2017
Times Cited: 4
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.008  / **Author-provided URL :** 
added
26-Dec-18
14. **Title:** Development of a thermoeconomic methodology for optimizing biodiesel production. Part II: Manufacture exergetic cost and biodiesel production cost incorporating carbon credits, a Brazilian case study
Author(s): Coronado, C.R.; Tuna, C.E.; Zanzi, R.; et al.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 29 **Pages:** 565-572 **Published:** 2014
Times Cited: 4
DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.064  / **Author-provided URL :** 
added
26-Dec-18
15. **Title:** Thermodynamic and economic analysis of hydrogen production integration in the Brazilian sugar and alcohol industry
Author(s): Silveira, J.L.; Tuna, C.E.; Lamas, W.D.Q.; et al.
Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews **Volume:** 30 **Pages:** 869-876 **Published:** 2014
added
26-Dec-18

Fonte: ResearchID (2018).

<https://www.researcherid.com/Workspace.action>

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS

(continuação)

4/5

27/12/2018

ResearcherID.com

	Times Cited: 3	DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.012  / Author-provided URL : 	added 26-Dec-18
16.	Title: Thermoeconomic analysis of hydrogen incorporation in a biodiesel plant Author(s): Boley, R.A.M.; Silva, M.E.; Valle, A.E.; et al. Source: Applied Thermal Engineering Volume: 113 Pages: 519-528 Published: 2017 Times Cited: 1	DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.171  / Author-provided URL : 	
17.	Title: Energetic and exergetic analysis of a new compact trigeneration system run with liquefied petroleum gas Author(s): Pérez, N.P.; Sadamitsu, M.T.; Silveira, J.L.; et al. Source: Energy Volume: 90 Pages: 1411-1419 Published: 2015 Times Cited: 1	DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.094  / Author-provided URL : 	added 26-Dec-18
18.	Title: Experimental research on the influence of the air humidity conditions in an air conditioning system Author(s): Sobrinho, P.M.; Tuna, C.E. Source: Experimental Thermal and Fluid Science Volume: 49 Pages: 152-159 Published: 2013 Times Cited: 1	DOI: 10.1016/j.expthermflusc.2013.04.013  / Author-provided URL : 	added 26-Dec-18
19.	Title: Hydrogen Production Processes Source: Sustainable Hydrogen Production Processes Published: 2016 Times Cited: 1	DOI: 10.1007/978-3-319-41616-8_2 	added 27-Dec-18
20.	Title: Ecological Efficiency of Some Hydrogen Production Processes Source: Sustainable Hydrogen Production Processes Published: 2016 Times Cited: 0	DOI: 10.1007/978-3-319-41616-8_5 	added 27-Dec-18
21.	Title: Economic Studies of Some Hydrogen Production Processes Source: Sustainable Hydrogen Production Processes Published: 2016 Times Cited: 0	DOI: 10.1007/978-3-319-41616-8_4 	added 27-Dec-18
22.	Title: Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production Processes Source: Sustainable Hydrogen Production Processes Published: 2016 Times Cited: 0	DOI: 10.1007/978-3-319-41616-8_3 	added 27-Dec-18
23.	Title: Technological advancements in biohydrogen production and bagasse gasification process in the sugarcane industry with regard to Brazilian conditions Author(s): Silveira, J.L.; Tuna, C.E.; Pedrosa, D.T.; et al.		added 26-Dec-18

<https://www.researcherid.com/Workspace.action>

Fonte: ResearchID (2018).

ANEXO A – Relatório de Citação do Scopus, Google Acadêmico e WoS

(conclusão)

5/5

27/12/2018

ResearchID.com

Source: Biofuels in Brazil: Fundamental Aspects, Recent Developments, and Future Perspectives **Pages:** 393-411 **Published:** 2014

DOI: 10.1007/978-3-319-05020-1_18 / **Author-provided URL :** 

23 publication(s)

Page of 1 

Sort by: Results per page:

[Community Forum](#) | [Register](#) | [FAQ](#)
[Support](#) | [Privacy Policy](#) | [Terms of Use](#) | [Logout](#)

© COPYRIGHT 2018

Fonte: ResearchID (2018).

<https://www.researchid.com/Workspace.action>