

INCLUSÃO DO DISPOSITIVO AMBIENTE NOS DIAGRAMAS TERMoeCONOMICOS COMO A SOLUÇÃO PARA O TRATAMENTO DE ENCARGOS AMBIENTAIS EM TERMoeCONOMIA

Igor Chaves Belisario, igor.belisario@ifes.edu.br¹
Pedro Rosseto de Faria, pedro.faria@ifes.edu.br^{2,3}
Rodrigo Guedes dos Santos, rodrigo.guedes@ifes.edu.br^{3,4}
Marcelo Aiolfi Barone, mabacz@gmail.com³
José Joaquim C. S. Santos, jose.j.santos@ufes.br³

¹Instituto Federal do Espírito Santos (IFES), São Mateus/ES - Brasil

²Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Cariacica/ES - Brasil

³Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória/ES - Brasil

⁴Instituto Federal do Espírito Santos (IFES), Vitória/ES - Brasil

Resumo: Termoeconomia é a disciplina que combina os conceitos de termodinâmica e economia e vem sendo amplamente empregada na análise de sistemas térmicos. Em uma de suas vertentes, a alocação de custos, um critério racional e uma metodologia termoeconômica são necessários para alocar os custos exergéticos e monetários dos insumos do sistema aos fluxos internos e produtos finais. Entretanto, as crescentes preocupações ambientais impulsionam os modelos existentes a adaptarem uma abordagem que possa incorporar a alocação de resíduos e custos ambientais em suas metodologias. Um sistema de conversão de energia pode ser definido como um conjunto de componentes que interagem entre si e com o ambiente através de um conjunto de fluxos de matéria, trabalho ou calor. Ou seja, o ambiente faz parte desse sistema. Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise termoeconômica em sistemas de cogeração (a gás e a vapor) e destacar o papel fundamental do dispositivo que representa o ambiente nos diagramas termoeconômicos para a correta alocação de resíduos e encargos ambientais. Três modelos termoeconômicos (Modelos E, E&S e H&S) são utilizados para estimar as emissões específicas de CO₂ alocadas aos produtos finais das plantas. Em ciclos a gás, essa alocação geralmente pode ser feita através das fontes de queima ou pelo dispositivo que representa o ambiente (nos modelos E&S e H&S). Nos ciclos a vapor, a alocação é realizada via caldeira (equipamento onde é gerado o CO₂). Entretanto, desagregando a caldeira em subsistemas pode-se mostrar que um desses subsistemas do diagrama termoeconômico representa o ambiente. Todas essas alternativas são comparadas e discutidas. Os resultados mostram que o ambiente atua como um dispositivo consistente nas análises termoeconômicas nos ciclos de cogeração, permitindo a internalização adequada de encargos ambientais através do mesmo. Dessa forma a principal contribuição deste trabalho é destacar a presença do ambiente como um dispositivo nos diagramas termoeconômicos de qualquer ciclo, onde é possível realizar a alocação adequada e sistemática dos encargos ambientais do sistema.

Palavras-chave: termoeconomia, encargos ambientais, alocação de emissões, dispositivo ambiental, centrais de cogeração

1. INTRODUÇÃO

Termoeconomia é a disciplina que combina os conceitos de termodinâmica (1ª e 2ª Leis da Termodinâmica) e economia (custo) e vem sendo amplamente empregada na análise de sistemas térmicos. Em uma de suas vertentes, a alocação de custos, um critério racional e uma metodologia termoeconômica são necessários para alocar os custos exergéticos e monetários dos insumos do sistema aos fluxos internos e produtos finais da planta.

Muitas metodologias foram propostas e comparadas sobre a ótica da alocação de custos. Algumas metodologias utilizam o diagrama físico constituído por fluxos físicos e componentes, enquanto outras se baseiam nos diagramas produtivos, os quais utilizam os fluxos produtivos e unidades produtivas para determinar os custos dos fluxos produtivos (Frangopoulos, 1994; von Spakovsky, 1994). A aplicação da desagregação da exergia física em parcelas nos diagramas vem se desenvolvendo no contexto de fornecer um tratamento adequado e consistente para equipamentos dissipativos e resíduos. Além disso, é comum a utilização de fluxos e componentes fictícios por algumas metodologias, mesmo que já tenha se mostrado arbitrariedades (Barone *et al.* 2022) e resultados incomuns (Santos *et al.* 2006).

Tais metodologias vêm se adaptando para incorporar considerações ambientais em sua modelagem, como por exemplo as emissões específicas de CO₂ associadas a cada produto final da planta. Os trabalhos de (Santos *et al.* 2013) e

(Santos *et al.* 2015) mostraram como diferentes métodos podem ser adaptados para alocar as emissões específicas de CO₂ aos produtos finais de plantas de cogeração e uma extensa lista de aplicações termoeconômicas levando em conta distintos aspectos ambientais pode ser encontrada no trabalho de (Faria *et al.* 2021).

Sistemas de cogeração a vapor e a gás são responsáveis pela emissão de grandes quantidades de poluentes na atmosfera. A alocação de resíduos em tais sistemas pode ser considerada como um indicativo da eficiência da produção combinada de seus multiprodutos em relação a produção isolada dos mesmos (dos Santos *et al.* 2016).

Segundo Agudelo *et al.* (2012) a alocação de resíduos está associada ao seu processo de formação de custos e depende de onde e como foi gerado. Esta análise requer a desagregação do sistema em subsistemas que permita a identificação do seu processo de formação de custos. O trabalho de (Carvalho *et al.* 2020) mostrou a influência da desagregação do sistema em vários níveis em uma aplicação para determinar impactos ambientais (emissões de CO₂) em uma planta dual de produção de energia elétrica e água dessalinizada.

Lozano e Valero (1993) definem os sistemas térmicos como um conjunto de equipamentos que interagem entre si e com o ambiente através de um conjunto de fluxos de matéria, trabalho ou calor. Ou seja, o ambiente faz parte desse sistema e pode ser representado por um dispositivo nos diagramas termoeconômicos. Neste sentido, em análises termoeconômicas de ciclos a vapor a caldeira é comumente tratada como um único subsistema limitando assim uma adequada visualização do seu processo de formação de custos e de sua interação com o ambiente. Este equipamento produz vapor através de sucessivas trocas de calor entre os gases gerados na câmara de combustão e a água como fluido de trabalho em equipamentos específicos para esta finalidade além de possuir uma intrínseca relação com o ambiente, que recebe seus gases de exaustão e fornece ar para combustão. Por outro lado, algumas metodologias termoeconômicas aplicadas a ciclos a gás já trazem o dispositivo que representa o ambiente na sua modelagem, por se tratar de um ciclo aberto. Em ciclos a vapor é necessário desagregar a caldeira para incorporar o ambiente nas modelagens termoeconômicas, (Belisario *et al.* 2021).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise termoeconômica em sistemas de cogeração a vapor e a gás destacando o papel fundamental que o dispositivo que representa o ambiente tem na correta alocação de resíduos e encargos ambientais. Para isso, três modelos termoeconômicos (Modelos E, E&S e H&S) são aplicados para estimar as emissões específicas dos fluxos internos e produtos finais das plantas de cogeração. Nos ciclos a gás, a alocação das emissões pode ser feita através da câmara de combustão (CC) ou do dispositivo que representa o ambiente (AMB). Nos ciclos a vapor, a análise é realizada considerando duas alternativas: caldeira agregada e caldeira desagregada em subsistemas. No primeiro, a alocação de CO₂ será feita via caldeira (CALD) e no segundo via (CC) e (AMB), semelhante aos ciclos a gás. Os resultados de emissões específicas de calor útil e potência elétrica para os casos apresentados são comparados e discutidos, destacando o papel do ambiente como um dispositivo consistente na modelagem termoeconômica que permite, de forma adequada e sistemática, a alocação de encargos ambientais em termoeconomia.

2. MODELAGEM TERMoeCONÔMICA

A modelagem termoeconômica convencional utiliza o balanço de custos em cada subsistema (real ou fictício) para determinar o custo exergético e monetário dos fluxos produtivos da planta, sejam eles internos ou produtos finais. Esta modelagem pode ser adaptada para se incorporar análises e impactos ambientais nos custos da planta (dos Santos *et al.* 2016; Lozano *et al.* 2014; Silva *et al.* 2017). Neste sentido, a modelagem termoeconômica é representada pela Eq. (1), utilizada para determinar a emissão específica de CO₂ (λ) dos fluxos produtivos da planta, em kg/MWh. Y_i representa fluxos produtivos genéricos (em kW) que entram e saem de cada subsistema e dependem das magnitudes termodinâmica associadas ao modelo termoeconômico aplicado.

$$\sum(\lambda_{sai} \cdot Y_{sai}) - \sum(\lambda_{ent} \cdot Y_{ent}) = \lambda_c \cdot Q_c \quad (1)$$

Conceitualmente, a emissão específica de CO₂ de um fluxo é a quantidade de dióxido de carbono emitido na atmosfera (em kg/h) para se produzir uma unidade exergética deste fluxo (em MW). Este índice também pode ser interpretado como uma medida da eficiência ambiental associada ao processo produtivo deste fluxo (dos Santos *et al.*, 2016). Em relação a exergia associado ao combustível externo da planta (Q_c), λ_c representa a quantidade de CO₂ emitida devido a combustão de 1,0 kW de exergia do combustível.

O sistema de equações gerado pelo balanço de custo ambiental em cada subsistema do diagrama produtivo, incluindo as unidades fictícias, não retorna um número de equações suficientes para obter todos os custos ambientais da planta. Portanto, equações auxiliares são utilizadas para completar o modelo. Estas equações são descritas utilizando o critério do multiproduto (Frangopoulos, 1994) que atribui custos iguais a fluxos que saem de um mesmo subsistema.

Neste trabalho, realiza-se apenas a alocação de emissões específicas através da Eq. (1). Porém o dispositivo que representa o ambiente nos diagramas pode ter uma função importante em análises de custos monetários, pois através dele pode-se alocar diversos encargos ambientais como os custos monetários associados a equipamentos de tratamento de resíduos, licenças/multas ambientais e valores da precificação das emissões (créditos de carbono), por exemplo. Neste caso, além dos custos monetários (Z) convencionais de capital, operação de manutenção (O&M), adiciona-se ainda os custos ambientais, conforme Eq. (2).

$$Z = Z_{cap} + Z_{O\&M} + Z_{amb} \quad (2)$$

3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste trabalho se baseia em duas plantas de cogeração: uma a vapor e uma a gás. Em ambas, o ambiente se relaciona com o sistema através de fluxos de energia e matéria. Pela ótica da termoeconomia, esta interação traz o ambiente como um dispositivo dos diagramas termoeconômicos que pode ser utilizado no tratamento adequado de encargos ambientais.

3.1. Ciclo a Vapor

Ciclos a vapor são baseados no ciclo Rankine de potência, caracterizados pela utilização de uma fonte de combustível para a produção de potência elétrica a partir da água como fluido de trabalho. São frequentemente utilizados em sistemas de cogeração que, além de energia elétrica, fornecem calor útil para algum processo industrial.

3.1.1. Estrutura Física

O ciclo a vapor em estudo (Fig. 1) é uma planta de cogeração típica de uma indústria sucroenergética, composta por caldeira (CALD), turbina de contrapressão (TVCP) e bomba de alimentação de caldeira (BAC), fornecendo 120 t/h de vapor para o processo à 250 kPa (abs), correspondente a 19,63 MW de calor útil ao processo. Nesta configuração, a planta produz aproximadamente 17,13 MW de potência líquida ao custo da exergia química de 51,95 t/h de bagaço de cana (138,23 MW). As eficiências isentrópicas da turbina e da bomba (η_t e η_b , respectivamente) são consideradas 80% para ambas. Os parâmetros de operação da caldeira assim como a composição elementar do combustível foram retirados de Lora e Nascimento (2004). A umidade do combustível foi considerada 50% e a composição do ar em base seca é de 21% de oxigênio e 79% nitrogênio.

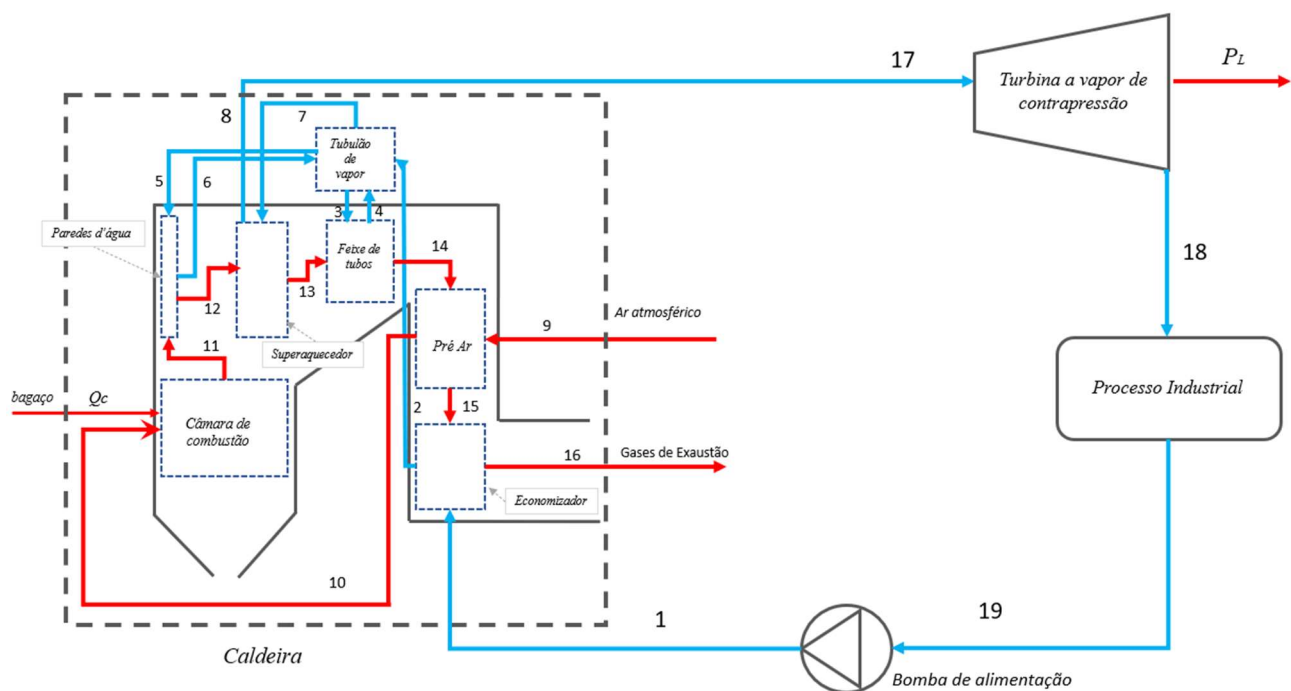


Figura 1. Estrutura física do sistema de cogeração a vapor.

A caldeira é composta por 7 equipamentos: Pré-aquecedor de ar (PAAR), câmara de combustão (CC), paredes d'água (PA), superaquecedor (SAQ), feixe de tubos (FT) e economizador (ECO). Estes equipamentos perfeitamente integrados produzem vapor superaquecido através da liberação da exergia química do bagaço (na CC), das seguidas trocas de calor entre gás/água (PA, SAQ, FT e ECO) e gás/ar (PAAR) e por fim, pela separação das fases líquido e vapor (no TUB). Como resíduo material e exergético, a caldeira libera 228,56 t/h de gás de exaustão no ambiente, dos quais 43 t/h correspondem as emissões de CO₂ (18,8%). Vale ressaltar que a caldeira evidencia a relação do ciclo com o ambiente, sendo este último responsável por receber o resíduo produzido pela caldeira e restituir o ar de combustão para a mesma. Os parâmetros exergéticos necessários aos balanços de massa e energia da caldeira foram adaptados de Belisario *et al.*, (2021). A Tabela 1 mostra os estados termodinâmicos do ciclo a vapor com a caldeira desagregada.

Tabela 1. **Propriedades termodinâmicas do sistema de cogeração.**

Fluxo físico		$\dot{m}$ [kg/s]	T [°C]	P [kPa]	e [kJ/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	e ^{Ch} [kJ/kg]
Nº	Descrição							
0	combustível	14,43	25,0	101,3	0	0	0	9580,0
1	água	33,33	95,0	5691,0	35,4	402,4	1,246	0
2	água	33,33	214,7	5467,0	190,6	920,2	2,462	0
3	líquido saturado	8,77	254,7	4445,0	267,6	1109	2,836	0
4	vapor saturado	8,77	254,7	4445,0	1003,0	2799	6,039	0
5	líquido saturado	28,28	254,7	4445,0	267,6	1109	2,836	0
6	vapor saturado	28,28	254,7	4445,0	1003,0	2799	6,039	0
7	vapor saturado	33,33	254,7	4445,0	1003,0	2799	6,039	0
8	vapor superaquecido	33,33	400,0	4301,0	1207,0	3209	6,732	0
9	ar	49,06	25,0	101,3	0	0	0	0
10	ar	49,06	334	101,3	99,1	315,7	0,727	0
11	gases de exaustão	63,49	1402,0	101,3	1250,0	1834	2,299	101,8
12	gases de exaustão	63,49	881,1	101,3	704,6	1140	1,803	101,8
13	gases de exaustão	63,49	719,5	101,3	549,2	925,1	1,602	101,8
14	gases de exaustão	63,49	544,3	101,3	392,9	691,7	1,343	101,8
15	gases de exaustão	63,49	361,1	101,3	249,7	447,7	1,005	101,8
16	gases de exaustão	63,49	157,0	101,3	132,1	175,8	0,488	101,8
17	vapor superaquecido	33,33	396,0	4086,0	1197,0	3203	6,746	0
18	vapor saturado	33,33	127,4	250,0	618,1	2716	7,050	0
19	líquido comprimido	33,33	94,3	101,3	29,3	395,1	1,242	0

3.1.2. Diagrama Produtivo

Cada subsistema da estrutura física tem uma função produtiva no sistema que se relaciona com os demais subsistemas através de seus fluxos produtivos (insumos e produtos). Esta estrutura produtiva pode ser visualizada através de diagramas que representam graficamente o processo de formação de custos da planta. As unidades produtivas podem ser reais, ou seja, o próprio subsistema, ou fictícias, que unem (junções) e distribuem os fluxos (bifurcações). Essa característica foi inicialmente proposta pela Análise Funcional da Engenharia (von Spakovsky, 1994) e Análise Funcional Termoeconômica (Frangopoulos, 1994) mas também é utilizada pela Teoria Estrutural do Custo Exergético (Valero *et al.* 1992) e o Modelo H&S (Santos *et al.*, 2009).

3.1.2.1. Modelo Exergia Total

A Fig. 2 mostra o diagrama produtivo do ciclo a vapor segundo o Modelo E considerando a caldeira desagregada (a) e agregada (b). A desagregação da caldeira permite analisar o processo de formação de custos dos subsistemas que compõe a mesma. Além do par junção-bifurcação (J-B1) de exergia do vapor semelhante ao ciclo da caldeira agregada, a primeira situação possui um outro par J-B2 para a exergia dos fluidos ar/gás. Os fluxos produtivos E_{ij} são calculados pela variação da exergia total dos fluidos entre os estados termodinâmicos i e j . Uma variação positiva, significa que o fluxo é produto e o contrário, insumo (Lazzaretto e Tsatsaronis, 2006).

Em relação a alocação de CO₂, na Fig. 2a o Modelo E realiza a alocação via câmara de combustão (CC) tendo em vista que este modelo não traz o ambiente como subsistema (Belisario *et al.*, 2021). Na segunda situação (Fig. 2b) a alocação também é realizada na unidade geradora das emissões, ou seja, caldeira.

3.1.2.2. Modelo H&S

Este modelo utiliza os componentes entálpico (H) e entrópico (S) da exergia física para definir insumos e produtos dos subsistemas. O Modelo H&S foi a primeira metodologia termoeconômica capaz de isolar equipamentos dissipativos como condensador e intercooler sem inconsistências (Santos *et al.*, 2006) além de tratar de forma sistemática os resíduos. O Modelo também leva em conta de maneira explícita a exergia química juntamente com as parcelas da exergia física, como demonstrado na Eq. (4):

$$E_{i,j} = H_{i,j} - S_{i,j} + Ch_{i,j} \quad (3)$$

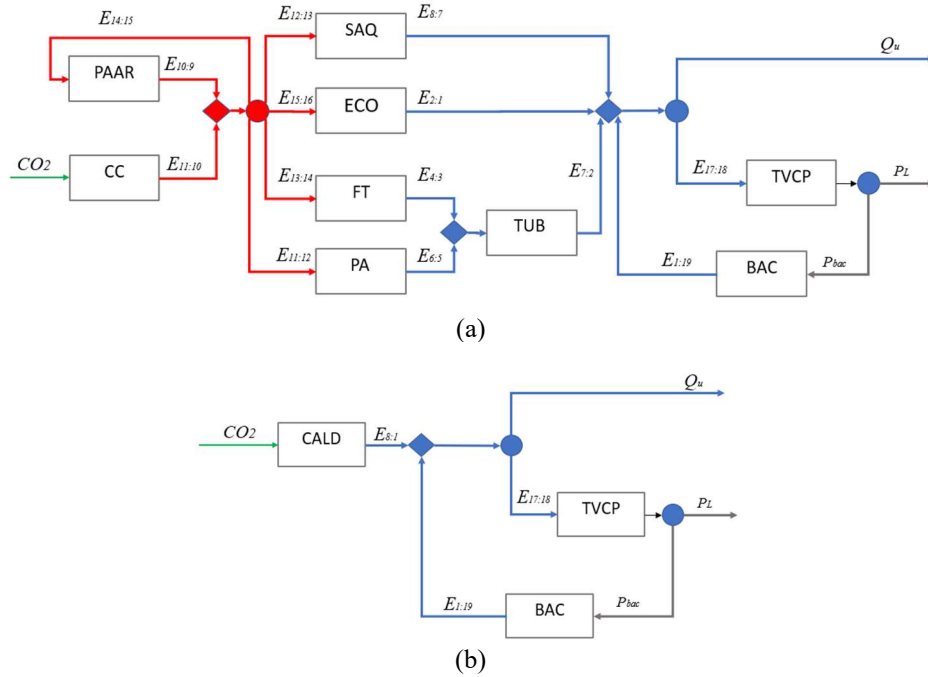


Figura 2. Diagrama produtivo - Modelo E, ciclo a vapor com caldeira desagregada (a) e agregada (b).

A definição de insumos e produtos baseados neste modelo seguem a mesma metodologia dos demais. Uma variação positiva da parcela entálpica (H) significa um produto e o contrário um insumo. Para fluxos da parcela entrópica (S), um aumento significa um insumo e uma diminuição um produto. Isso ocorre devido à contribuição negativa da entropia na exergia física conforme Eq. (3). A Fig. 3 mostra o diagrama produtivo segundo o Modelo H&S para duas alternativas de desagregação da caldeira estudados.

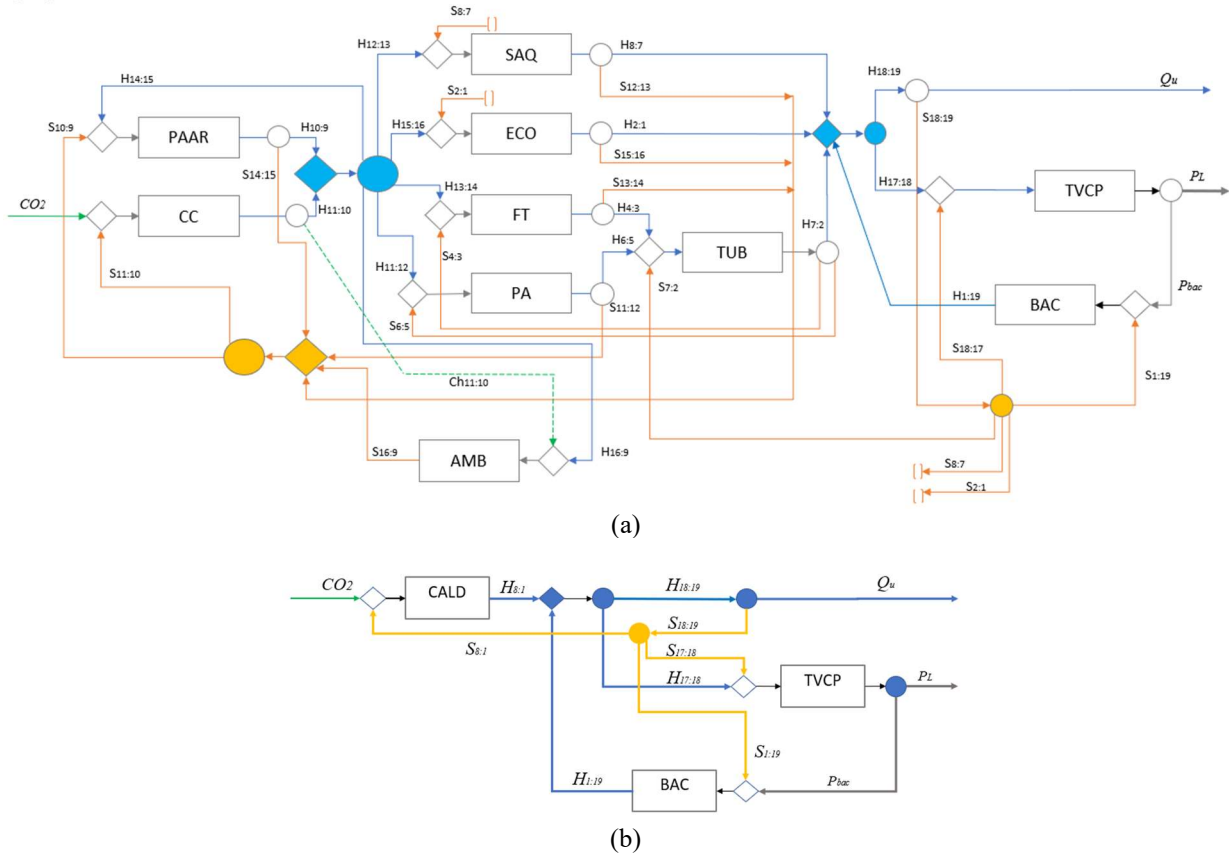


Figura 3. Diagrama produtivo - Modelo H&S, ciclo a vapor com caldeira desagregada (a) e agregada (b).

No diagrama com caldeira desagregada observa-se o subsistema ambiente (AMB) que tem na sua estrutura produtiva como insumo a parcela entálpica da exergia física ($H_{16:9}$) e a exergia química dos gases de exaustão ($Ch_{11:10}$) e como produto a parcela entrópica ($S_{16:9}$). Para esta configuração a alocação de CO_2 pode ocorrer tanto pela câmara de combustão (CC) (como mostrado na Fig. 3a) ou de maneira alternativa, pelo ambiente (AMB). Neste segundo caso, as emissões não são mais consideradas insumo da (CC), mas sim do (AMB). Para a caldeira agregada (Fig. 3b) a alocação ocorre pela própria caldeira (CALD).

3.1.2.3. Modelo E&S

O diagrama produtivo para o ciclo a vapor com caldeira desagregada e agregada de acordo com o Modelo E&S é mostrado na Fig 4. Os fluxos produtivos são representados por exergia total e neguentropia. Os fluxos de neguentropia consideram uma variação positiva de entropia como insumo e o contrário, produto. Frangopoulos (1987) propôs a definição de um produto para o condensador em ciclos a vapor utilizando neguentropia como um fluxo fictício. Para sistemas a gás, este modelo utiliza uma unidade fictícia chamada chaminé (CH), semelhante ao ambiente no modelo anterior.

O ciclo com caldeira desagregada possui 4 pares de junção-bifurcação: uma para cada fluxo produtivo (exergia e neguentropia) e uma para cada tipo de fluido (gás e vapor). Já para caldeira agregada, há um par junção-bifurcação para exergia e uma bifurcação para entropia. Para ambos os casos no lado vapor o processo é o único equipamento que produz neguentropia ($S_{18:19}$). A alocação de CO_2 pode ser realizada tanto pela câmara de combustão (CC) como pela chaminé (CH).

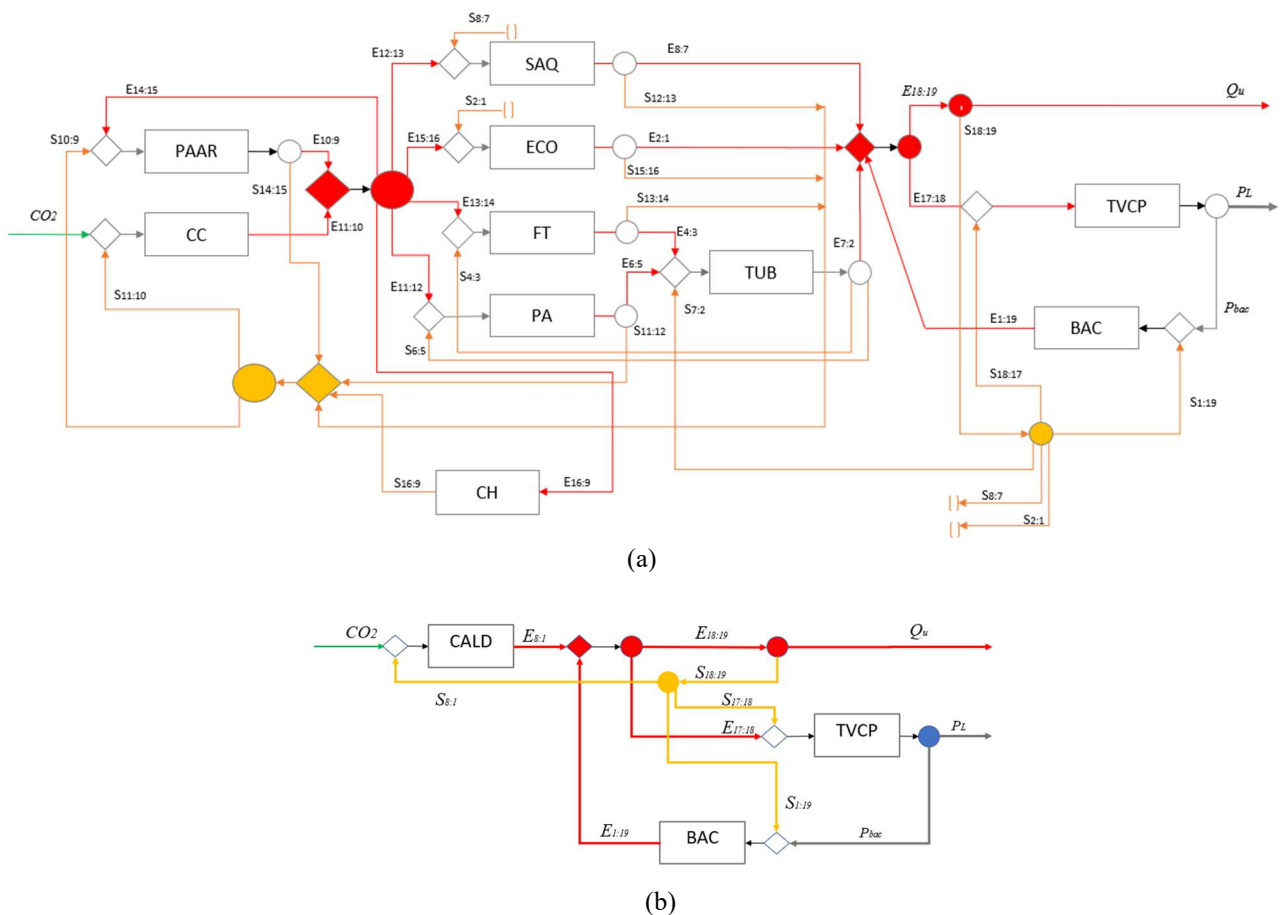


Figura 4. Diagrama produtivo - Modelo E&S, ciclo a vapor com caldeira desagregada (a) e agregada (b).

3.2. Ciclo a Gás

Para critério de comparação e abrangência da utilização do ambiente como dispositivo termoeconômico, será apresentado o estudo realizado por dos Santos *et al.*, (2016) em um sistema de cogeração de ciclo a gás para alocação de CO_2 .

3.2.1. Estrutura Física

A Fig. 5 mostra a estrutura física do ciclo a gás em estudo. A planta possui 5 subsistemas sendo compressor de ar (CA), regenerador (R), câmara de combustão (CC), turbina a gás (TG) e caldeira de recuperação (CR). O sistema produz potência mecânica líquida de 30 MW e consumo de potência pelo compressor de 29,69 MW. A exergia fornecida pelo combustível é de 84,38 MW e o calor útil fornecido pela caldeira de recuperação é de 12,74 MW. A emissão de CO₂ para a atmosfera é de 10,44 t/h. Todos os parâmetros para a análise deste ciclo podem ser visualizados em (dos Santos *et al.*, 2016).

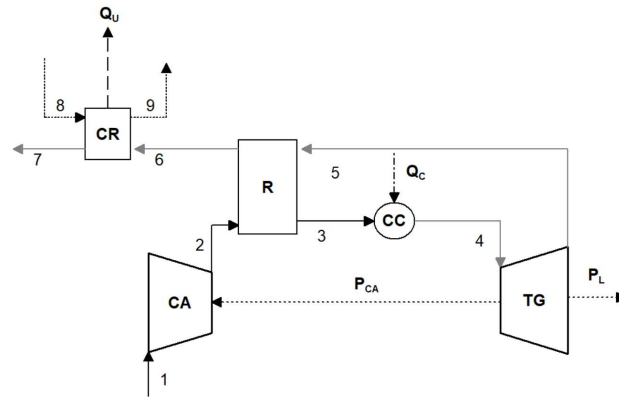


Figura 5. Estrutura física do ciclo a gás. Adaptado de dos Santos *et al.* (2016).

3.2.2. Diagrama Produtivo

Os diagramas produtivos do ciclo a gás segundo os modelos E (a) e H&S (b) são mostrados na Fig. 6 e são definidos seguindo as mesmas premissas do ciclo a vapor. O Modelo E&S apesar de não estar representado tem diagrama semelhante ao H&S bastando apenas trocar os fluxos da parcela entálpica por exergia total. Para o Modelo E, a alocação de CO₂ ocorre via (CC) já que este modelo não traz o ambiente como subsistema. Nos outros dois modelos há duas alternativas de alocação de CO₂ semelhante ao ciclo a vapor: (CC) e (AMB). Apesar disso, na Fig. 6b está representado somente a alocação via CC.

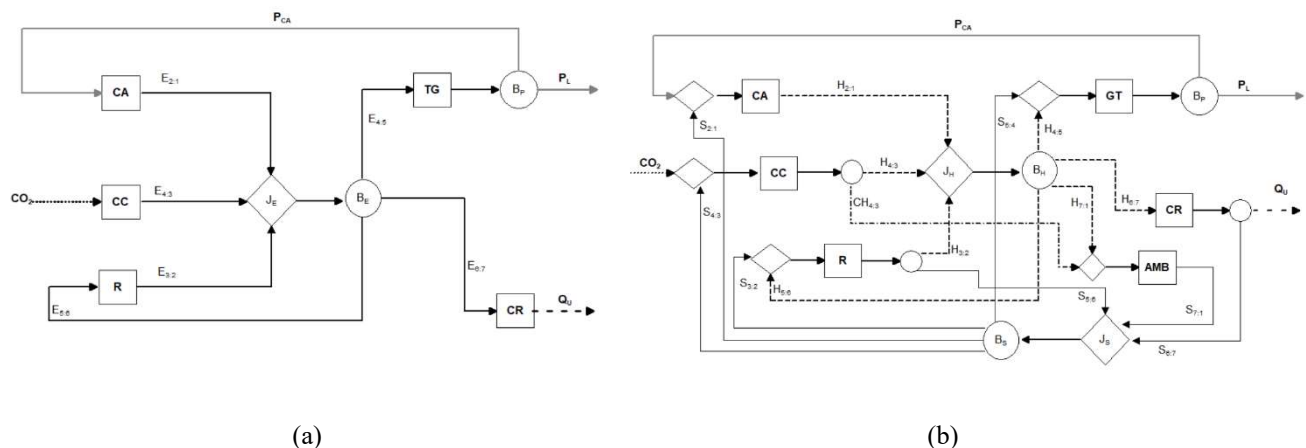


Figura 6. Diagrama produtivo, Modelos E e H&S para ciclo a gás. Adaptado de dos Santos *et al.* (2016)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figs. 7 e 8 comparam as emissões específicas do calor útil (λ_u) e da potência líquida (λ_L) para os sistemas de cogeração a vapor e a gás obtidas com os diferentes modelos aplicados. Para ambos os casos todos os pontos pertencem às suas respectivas retas solução que são específicas para os índices de desempenho das plantas, como a eficiência exergética e a relação potência/calor.

Para a planta a vapor (com turbina de contrapressão) a análise mostra que os Modelos E (1113 e 1236 kg/MWh) e H&S (1112 e 1237 kg/MWh) obtiveram resultados muito próximos para calor útil e potência líquida, respectivamente. Essa característica já foi demonstrada por dos Santos *et al.* (2016) e Faria (2014). Por outro lado, o Modelo E&S (441 e 2006 kg/MWh) penaliza a potência elétrica em detrimento do calor útil. Isso ocorre porque este modelo considera a neguentropia em duplicidade, que penaliza os consumidores de neguentropia e favorece os que produzem.

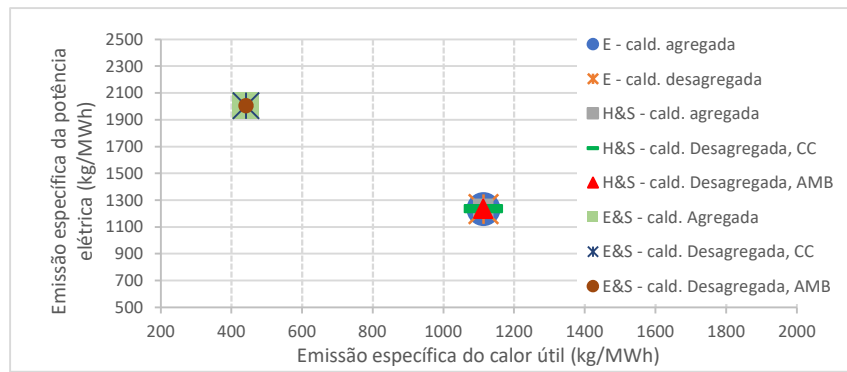


Figura 7. Emissão específica de CO₂ para planta de cogeração a vapor.

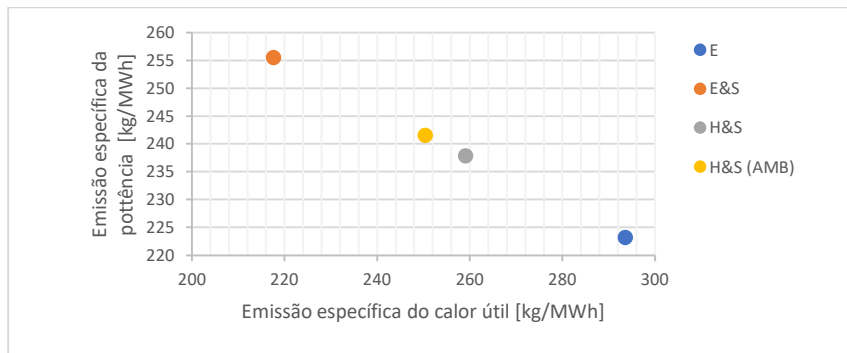


Figura 8. Emissão específica de CO₂ para planta de cogeração a gás. Adaptado de dos Santos *et al.* (2016)

Em relação as alternativas de alocação de CO₂, para os Modelos H&S e E&S os resultados do ciclo a vapor mostram que as duas alternativas estudadas apresentam os mesmos valores para emissões de calor útil e potência elétrica. Ou seja, a desagregação da caldeira permitiu acessar o processo de formação de custos interno dessa trazendo o ambiente como um subsistema para a modelagem, no entanto não promoveu mudança nos resultados dos produtos finais. Apesar disso, a principal contribuição obtida ao desagregar a caldeira em subsistemas é destacar a presença do dispositivo ambiental já que este tem um papel fundamental na alocação de encargos ambientais.

Para o ciclo a gás, o Modelo E&S também retornou o maior valor de emissões específicas para a potência elétrica (255 kg/MWh), enquanto o Modelo E, o menor valor (223 kg/MWh). Os resultados obtidos com as duas alternativas do Modelo H&S apresentaram valores muito próximos, reforçando a consistência de alocar CO₂ no dispositivo ambiental que é justamente onde as emissões são lançadas. Além do mais, essa alocação via ambiente pode ser ainda mais importante em outras plantas onde haja mais de uma fonte de queima e consequentemente mais de uma fonte de geração de emissões, pois esse dispositivo poderá alocar todas as emissões e distribuir para os demais equipamentos da planta.

Para o Modelo E, não é possível a alocação de CO₂ via ambiente, pois este modelo trata os resíduos de forma implícita, distribuindo seus custos proporcionalmente aos insumos dos equipamentos que geram os produtos finais da planta. Em relação ao ciclo a gás, apesar de resultados próximos, a alocação via (AMB) pelo Modelo H&S aumentou as emissões da potência elétrica em relação a alocação via (CC). Essa diferença se dá pelo fato de um dos produtos, a potência, ser gerada na (TG), que se encontra fisicamente entre os dois subsistemas onde o CO₂ pode ser internalizado. No ciclo a vapor isso não ocorre pois os dois produtos são gerados após os subsistemas (CC) e (AMB), ambos subsistemas da (CALD).

5. CONCLUSÕES

Visando uma solução para o tratamento de encargos ambientais por meio da inclusão do dispositivo que representa o ambiente nos diagramas termoeconômicos, este trabalho comparou diferentes metodologias aplicadas em um sistema de cogeração a gás e outro a vapor para alocar as emissões específicas de CO₂ aos produtos finais das plantas, destacando o papel do dispositivo ambiental na modelagem termoeconômica.

Os resultados para alocação de emissões específicas no ciclo a vapor mostram que o dispositivo ambiente (AMB) é um subsistema da caldeira que pode ser visualizado quando essa se encontra desagregada. Neste nível de desagregação, os Modelos H&S e E&S trazem o dispositivo ambiente representados por (AMB) e (CH), respectivamente, como alternativas para alocação de CO₂ em relação a alocação via câmara de combustão (CC). Para as duas alternativas de alocação e, independentemente do nível de desagregação da caldeira, os resultados obtidos foram os mesmos para as emissões específicas de calor útil e potência elétrica. Entretanto, a desagregação é útil para deixar claro a presença do dispositivo ambiental que só é possível visualizá-lo dessa forma.

Para o ciclo a gás, a alocação via dispositivo ambiental trouxe resultados diferentes da alocação via câmara para ambos os modelos H&S e E&S, em relação aos produtos finais da planta. Apesar disso, outros trabalhos já mostraram que o Modelo E&S apresentou resultados negativos para as emissões específicas de calor útil, considerando a alocação via (CH), sendo assim não aconselhável a utilização deste modelo. Os resultados do Modelo H&S, via CC ou AMB, foram parecidos e mostra a consistência da alocação via ambiente o que pode ser mais interessante ainda em plantas com mais de uma fonte de queima. Assim como no ciclo a vapor, o Modelo E não possui alternativa para alocação de CO₂ via dispositivo ambiente.

Portanto, dentre os modelos termoeconômicos aplicados para os dois casos de estudo, o modelo H&S mostrou ser consistente para a alocação via (AMB), já que este modelo traz o ambiente de forma intrínseca em sua originalidade. Assim como pela definição há uma evidente relação do ambiente com os sistemas térmicos, também há uma intrínseca relação com o Modelo que usa as parcelas entálpica e entrópica da exergia quando se trata de alocação de encargos ambientais.

Além disso, a introdução do dispositivo ambiente na modelagem termoeconômica, de forma adequada e sistemática, permite a alocação de custos monetários associados a equipamentos ambientais utilizados em sistemas de cogeração como por exemplo, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos, filtros de mangas, sequestrantes de enxofre, dentre outros. Além desses custos monetários de equipamentos utilizados para tratamentos ambientais, o ambiente pode ser utilizado para alocação de receitas ou despesas financeiras relativas a créditos de carbono quando esse mercado for totalmente estabelecido e precificado.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio de IFES, UFES, CAPES, FAPES e TEVISA.

REFERÊNCIAS

- Agudelo, A., Valero, A., & Torres, C. (2012). Allocation of waste cost in thermoeconomic analysis. *Energy*, **45**(1), 634–643.
- Barone, M. A., Santos, R. G. dos, Faria, P. R. de, Lorenzoni, R. A., Lourenço, A. B., & Santos, J. J. C. S. (2022). On the Arbitrariness and Complexity in Thermoeconomics due to Waste Cost and Supplementary Firing Treatment. *Engineered Science*, **17**, 328–342.
- Belisario, I., Abreu, C. E. S., dos Santos, R. G., Faria, P. R. de, Barone, M. A., & Santos, J. J. C. S. (2021). the Importance of the Environment in the Thermoeconomic Modeling: a Conventional Boiler Waste and Environmental Costs Allocation. In *Proceedings of COBEM - 26th International Congress of Mechanical Engineering*, Florianópolis. doi:10.26678/abcm.cobem2021.cob2021-1737
- Carvalho, M., Roque, Y. B., Roque Diaz, P., ... Silva, J. A. M. da. (2020). Alocação em sistemas energéticos multiproduto: revisão e proposta de métodos. *LALCA: Revista Latino-Americana Em Avaliação Do Ciclo de Vida*, **4**, e44660.
- dos Santos, R. G., Santos, J. J. C. S., & da Silva, J. A. M. (2016). Application of Thermoeconomics for CO₂ Allocation for Net Power and Useful Heat in a Gas Turbine Cogeneration System. *Applied Mechanics and Materials*, **830**, 95–108.
- Faria, P. R. (2014). *Uma Avaliação das Metodologias de Desagregação da Exergia Física para a Modelagem Termoeconômica de Sistemas (dissertação de mestrado - engenharia mecânica)*, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Faria, P. R., dos Santos, R. G., Santos, J. J., Barone, M. A., & Miotto, B. M. (2021). On the Allocation of Residues Cost using Conventional and Comprehensive Thermoeconomic Diagrams. *International Journal of Thermodynamics*, **24**(2), 134–149.
- Frangopoulos, C. A. (1987). Thermo-economic functional analysis and optimization. *Energy*, **12**(7), 563–571.
- Frangopoulos, C. A. (1994). Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*, **19**(3), 323–342.
- Lazzaretto, A., & Tsatsaronis, G. (2006). SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, **31**(8–9), 1257–1289.
- Lora, E. E. S., & Nascimento, M. A. R. do. (2004). *Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação [in Portuguese]*, Interciência.
- Lozano, M. A., Carvalho, M., & Serra, L. M. (2014). Tackling environmental impacts in simple trigeneration systems operating under variable conditions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **19**(5), 1087–1098.
- Lozano, M. A., & Valero, A. (1993). Theory of the exergetic cost. *Energy*, **18**(9), 939–960.
- Santos, J. J. C. S., Nascimento, M. A. R., & Lora, E. E. S. (2006). On The Thermoeconomic Modeling for Cost Allocation in a Dual-Purpose Power and Desalination Plant. In *ECOS 2006 proceedings of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Creta, pp. 441–448.
- Santos, J. J. C. S., Nascimento, M. A. R., Lora, E. E. S., & Martínez-Reyes, A. M. (2009). On the Negentropy Application in Thermoeconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? *International Journal of*

Thermodynamics, **12**(4), 163–176.

Santos, J. J. C. S., Ribeiro, C. C., Faria, P. R., & Donatelli, J. L. M. (2013). On the thermoeconomic modeling for CO₂ allocation in a simple back-pressure steam turbine cogeneration system. In *Proceedings of International Congress on Energy and Environment Engineering and Management*, Lisbon, Portugal.

Santos, R. G., Faria, P. R., Santos, J. J. C. S., & da Silva, J. A. M. (2015). Thermoeconomic modeling for CO₂ allocation in steam and gas turbine cogeneration systems. In *Proceedings of Ecos 2015 - The 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Pau - France.

Silva, J. A. M. da, Santos, J. J. C. S., Carvalho, M., & Oliveira, S. de. (2017). On the thermoeconomic and LCA methods for waste and fuel allocation in multiproduct systems. *Energy*, **127**, 775–785.

Valero, A., Torres, C., & Serra, L. (1992). A general theory of thermoeconomics: Part I - Structural analysis. In A. Valero, ed., *ECOS 1992 - Proceedings of the International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Zaragoza, pp. 137–145.

von Spakovsky, M. R. (1994). Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. *Energy*, **19**(3), 343–364.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THE INCLUSION OF THE ENVIRONMENT DEVICE IN THERMOECONOMIC DIAGRAMS AS A SOLUTION FOR THE TREATMENT OF ENVIRONMENTAL CHARGES IN THERMOECONOMICS

Igor Chaves Belisario, igor.belisario@ifes.edu.br¹

Pedro Rosseto de Faria, pedro.faria@ifes.edu.br^{2,3}

Rodrigo Guedes dos Santos, rodrigo.guedes@ifes.edu.br^{3,4}

Marcelo Aiolfi Barone, mabacz@gmail.com³

José Joaquim C. S. Santos, jose.j.santos@ufes.br³

¹Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), São Mateus/ES - Brasil

²Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Cariacica/ES - Brasil

³Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória/ES - Brasil

⁴Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória/ES - Brasil

Abstract. Thermoeconomics is the discipline that combines the concepts of thermodynamics and economics and has been widely used in the analysis of thermal systems. In one of its fields of application, cost allocation, a rational criterion and a thermoeconomic methodology are necessary to allocate the exergetic and monetary costs of system fuels to internal flows and final products. However, growing environmental concerns drive existing models to adapt an approach that can incorporate waste allocation and environmental costs into their methodologies. An energy conversion system can be defined as a set of components that interact with each other and with the environment through a set of flows of matter, work or heat. In other words, the environment is a component of the system. This work aims to carry out a thermoeconomic analysis in cogeneration systems (gas and steam) and highlight the fundamental role of the device that represents the environment in thermoeconomic diagrams for the correct allocation of waste and environmental charges. Three thermoeconomic models (E, E&S and H&S Models) are used to estimate specific CO₂ emissions from final plant products. In gas cycles, this allocation can usually be done through the burning sources or by the device representing the environment (in E&S and H&S Models). In steam cycles, allocation is carried out via boiler (equipment where CO₂ is generated). However, disaggregating the boiler into subsystems it can be shown that one of these subsystems of the thermoeconomic diagram represents the environment. All these alternatives are compared and discussed. The results show that the environment acts as a consistent device in thermoeconomic analyzes in cogeneration cycles, allowing the adequate internalization of environmental charges through it. Thus, the main contribution of this work is to highlight the presence of the environment as a device in the thermoeconomic diagrams of the cycles, where it is possible to carry out an adequate and systematic allocation of the environmental burdens of the system.

Keywords: thermoeconomics, environmental charges, emissions allocation, environmental device, cogeneration plants