

DESAGREGAÇÃO LOCALIZADA DO DISPOSITIVO QUE REPRESENTA O AMBIENTE NOS DIAGRAMAS TERMoeCONÔMICOS PARA O TRATAMENTO SISTEMATIZADO DE ENCARGOS AMBIENTAIS

Pedro Rosseto de Faria, pedro.faria@ifes.edu.br^{1,2}

Marcelo Aiolfi Barone, mabacz@gmail.com²

Rodrigo Guedes dos Santos, rodrigo.guedes@ifes.edu.br^{2,3}

Igor Chaves Belisario, igor.belisario@ifes.edu.br⁴

José Joaquim C. S. Santos, jose.j.santos@ufes.br²

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

²Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória/ES - Brasil

³Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória/ES - Brasil

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

Resumo: Metodologias termoeconômicas são utilizadas em diversas aplicações, como na alocação de custos, no diagnóstico e na otimização de sistemas térmicos. Diferentes tipos de diagramas podem ser utilizados: físico, produtivo e abrangente. Modelagem com diagrama físico não é suficiente para identificar o processo de formação de custos dos resíduos e por isso a maioria das metodologias utilizam o diagrama produtivo, mas este pode conter arbitrariedades devido à utilização de unidades fictícias. O diagrama abrangente combina conceitos do físico e do produtivo e reduz as arbitrariedades, porém aumenta a complexidade do modelo. Um outro desafio relevante em termoeconomia é o isolamento dos equipamentos dissipativos. Modelos de desagregação da exergia física foram propostos para solucionar este problema e podem ser utilizados com todos os diagramas citados. Apesar de detalhar melhor o processo de formação de custos e isolar os dissipativos, a desagregação aumenta a complexidade. Para reduzir complexidade sem deixar de isolar os equipamentos dissipativos, um método de desagregação localizada foi proposto e aplicado em diagramas produtivo e abrangente. Em um exemplo com sistema de cogeração, este trabalho tem como objetivo enfatizar as vantagens e possíveis limitações da utilização da desagregação localizada nas metodologias e diagramas termoeconômicos, principalmente no que tange aos equipamentos dissipativos e resíduos. Além disso, detalha as aplicabilidades e arbitrariedades de cada tipo de diagrama e desagregações. A novidade do artigo está na utilização do dispositivo que representa o ambiente nos diagramas abrangentes com desagregação localizada ao combinar modelos termoeconômicos. Essa combinação é útil para isolar um componente específico da planta (que representa o ambiente no diagrama) que tem um papel importante na alocação de resíduos e custos ambientais. Os resultados mostram o caminho para a sistematização da modelagem termoeconômica capaz de tratar resíduos e isolar os equipamentos dissipativos com um mínimo de arbitrariedade e complexidade.

Palavras-chave: modelagem termoeconômica, desagregação da exergia, desagregação localizada, equipamento dissipativo, dispositivo ambiental

1. INTRODUÇÃO

Metodologias termoeconômicas são utilizadas em uma vasta gama de aplicações, como por exemplo na alocação de custos, no diagnóstico e na otimização de sistemas térmicos. Dependendo da aplicação e da escolha do analista, diferentes tipos de diagramas podem ser utilizados: físico, produtivo e abrangente.

Na alocação de custos, as diferentes metodologias são comumente aplicadas para estimar custos exergéticos e monetários dos fluxos internos e produtos finais de plantas térmicas. No entanto, recentes preocupações com o meio ambiente fazem com que a inclusão de encargos ambientais sejam cada vez mais incorporada nessas análises. Uma extensa lista de aplicações termoeconômicas para avaliação desses encargos pode ser encontrada em Faria et al. (2021).

Modelagem com diagrama físico não é suficiente para identificar o processo de formação de custos dos resíduos, que representa um desafio em termoeconomia. Por isso, a maioria das metodologias que foram propostas com esse objetivo originalmente utilizavam o diagrama produtivo. Dentre elas destacam-se as propostas por Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), Torres et al. (2008), Santos et al. (2009), Seyyedi, Ajam e Farahat (2010) e Agudelo, Valero e Torres (2012). Entretanto, o diagrama produtivo pode conter arbitrariedades devido à utilização de unidades fictícias para interconectar os subsistemas, como mostrado por Avellar et al. (2018a), Barone et al. (2021) e Barone et al. (2022). O diagrama abrangente (AVELLAR et al., 2018b) combina conceitos do físico e do produtivo e reduz as

arbitrariedades, porém pode aumentar a complexidade do modelo. A metodologia proposta por Santos et al. (2009), conhecida como Modelo H&S, vem sendo aplicada com o diagrama abrangente, como nos trabalhos de Barone et al. (2021) e Barone et al. (2022) e as metodologias propostas por Torres et al. (2008) e Agudelo, Valero e Torres (2012) vem sendo utilizadas através do gráfico de estrutura produtiva (TORRES; VALERO, 2021) que pode ser considerado como equivalente ao diagrama abrangente, porém com nomenclatura e *layout* distintos.

Um outro desafio relevante em termoeconomia é o isolamento dos equipamentos dissipativos, tais como condensador, válvula e *intercooler*. Modelos de desagregação da exergia física foram propostos para solucionar este problema e estes podem ser utilizados com todos os diagramas citados. Dentre esses modelos, destacam-se as desagregações da exergia física em suas parcelas térmica e mecânica (Modelo E^T&E^M), aplicado por exemplo por Faria et al. (2021); desagregação em parcelas entálpica e entrópica (Modelo H&S); e desagregação em parcelas de energia interna, trabalho de fluxo e entrópica, conhecido como Modelo UFS que foi proposto por Lourenço, Santos e Donatelli (2011). Entretanto, apesar de detalhar melhor o processo de formação de custos e isolar os dissipativos, essas desagregações aumentam a complexidade do modelo (LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006).

Para reduzir a complexidade sem deixar de isolar os equipamentos dissipativos, recentemente um método de desagregação localizada foi proposto por Santos et al. (2020) em aplicações com diagrama produtivo e também com diagrama abrangente para isolar condensador (SANTOS et al., 2021) e *intercooler* (BARONE et al., 2022).

Diante disso, esse trabalho tem como objetivo realizar uma análise de alocação de custos exergeticos, mas que pode ser facilmente estendida para alocação de encargos ambientais (como, por exemplo, na alocação de emissões específicas em plantas multiprodutos). Para isso, um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa, *intercooler* e queima suplementar (Figura 1) é utilizado como exemplo.

Visando uma análise sistematizada, primeiro este trabalho faz uma revisão com as principais metodologias e diagramas termoeconômicos, destacando a recente técnica de desagregação localizada para mostrar as vantagens e possíveis limitações de uso, principalmente no que tange os equipamentos dissipativos e resíduos. Após essa revisão, é introduzida a desagregação localizada do dispositivo que representa o ambiente no diagrama abrangente, que é a novidade deste trabalho. Esse método integra um modelo de desagregação da exergia (Modelo H&S) com um modelo sem desagregação para isolar de maneira pontual o dispositivo ambiental que tem um papel importante na alocação de resíduos e encargos ambientais e representa um ponto chave para a sistematização da modelagem termoeconômica completa, ou seja, que leva em conta aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Além disso, nessa sistemática também é levado em conta a necessidade de não elevar demasiadamente a complexidade da modelagem.

2. MODELAGEM TERMoeCONÔMICA

Equação (1) representa um balanço de custo que aplicado aos subsistemas da planta em análise é utilizado para determinar o custo exergetico unitário (k) dos fluxos internos e produtos finais da mesma. Esse custo representa a quantidade de recursos externos (exergia do combustível) necessária para obter uma unidade do fluxo e representa a eficiência termodinâmica do processo de produção do mesmo (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

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

Os subscritos “sai” e “ent” relacionam a entrada e saída dos fluxos no balanço aplicado e Y representa um fluxo interno genérico (em kW, por exemplo) que pode ser a exergia do calor, potência, fluxos de exergia total ou de suas componentes. A exergia do combustível é representada por Q_c e quando não há informações sobre o processo de produção (externo a planta), seu custo é igualado a exergia, ou seja, tem custo unitário de um ($k_c=1\text{kW/kW}$) (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

Ao aplicar o balanço mostrado na Eq. (1), o número de equações, baseadas nas unidades produtivas e/ou componentes dos diagramas, não é suficiente para obter uma solução matemática. Assim, equações auxiliares devem ser utilizadas para completar o modelo. Na modelagem com diagrama produtivo, utiliza-se o critério multiproduto (SANTOS et al., 2009) para assinalar custos iguais para fluxos produzidos no mesmo subsistema. Já na modelagem com diagrama abrangente, utiliza-se as regras do insumo e do produto (LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006).

3. ESTUDO DE CASO

Para analisar variados diagramas e modelos termoeconômicos, um sistema de cogeração é utilizado como estudo de caso por englobar equipamento dissipativo, resíduo e mais de uma fonte de queima de combustível. Além disso, por ser um sistema aberto, permite utilizar o dispositivo ambiental nos diagramas através do Modelo H&S.

3.1. Diagrama Físico

A Fig. 1 mostra a estrutura física do sistema de cogeração escolhido para atender as demandas levantadas. A planta é composta pelos seguintes subsistemas: compressores de baixa (CB) e alta pressão (CA), *intercooler* (IC), regenerador (R), câmara de combustão (CC), turbina a gás (TG), queima suplementar (QS) e caldeira de recuperação (CR). A Tabela 1 mostra os principais parâmetros termodinâmicos do ciclo. As indicações “Gás CC” e “Gás QS” na Tabela 1

destacam que os gases que saem da câmara de combustão e da queima suplementar possuem composições químicas diferentes. Além disso, esses gases são representados por cores diferentes na Fig. 1. O combustível é metano puro (CH_4) com poder calorífico inferior (PCI) de 50023 kJ/kg e utiliza-se o modelo termodinâmico de combustão completa. Os valores de exergia química devido as reações de combustão na CC e na QS são 107,87 kW e 122,25 kW, respectivamente. Mais informações do ciclo podem ser encontradas em Barone et al. (2022).

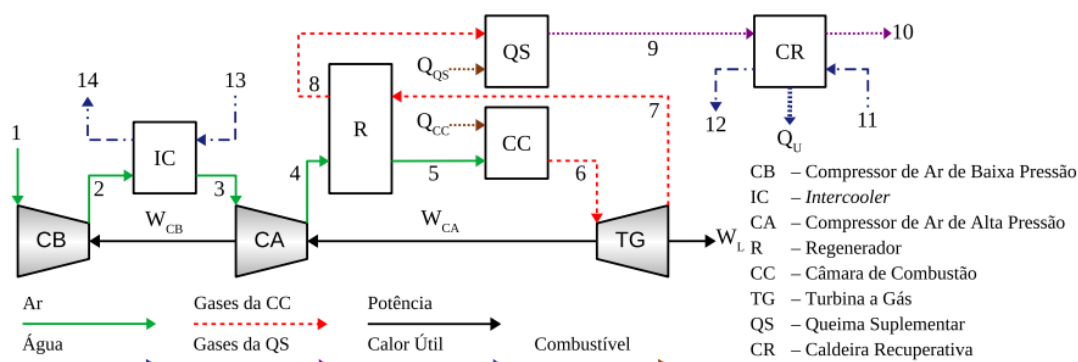


Figura 1. Estrutura física do sistema de cogeração. Adaptado de Barone et al. (2022).

Tabela 1. Propriedades termodinâmicas do sistema de cogeração. Adaptado de Barone et al. (2022).

Fluxo físico		$\dot{m}$ [kg/s]	T [K]	P [bar]	E [kW]	E^H [kW]	E^S [kW]
Nº	Descrição						
1	Ar	10,00	298,15	1,01	0,54	55,99	55,45
2	Ar	10,00	399,57	2,48	919,20	1088,03	168,83
3	Ar	10,00	308,15	2,43	745,08	157,27	-587,81
4	Ar	10,00	412,79	5,96	1698,10	1223,71	-474,40
5	Ar	10,00	915,00	5,81	4600,19	6645,81	2045,62
6	Gás CC	10,13	1435,51	5,67	9584,54	13397,57	3813,03
7	Gás CC	10,13	996,98	1,05	3975,97	7919,09	3943,12
8	Gás CC	10,13	526,13	1,03	679,17	2496,98	1817,81
9	Gás QS	10,15	586,67	1,01	981,02	3175,51	2194,49
10	Gás QS	10,15	435,37	1,01	282,87	1519,26	1236,39
11	Água	0,62	298,15	10,00	0,69	14,86	14,17
12	Vapor saturado	0,62	453,03	10,00	528,83	1671,11	1142,27
13	Água	22,27	298,15	1,01	-	104,90	-
14	Água	22,27	308,15	1,01	-	146,70	-

3.2. Diagrama Produtivo

A descrição do processo de formação de custos em plantas térmicas baseada em fluxos produtivos é característica original da Análise Funcional de Engenharia (VON SPAKOVSKY, 1994) e da Abordagem Funcional Termoeconômica (FRANGOPOULOS, 1994). Entretanto, outras metodologias, como a Teoria Estrutural do Custo Exergético (VALERO; TORRES; SERRA, 1992) e o Modelo H&S (SANTOS et al., 2009) também se utilizam dessa característica.

É importante destacar que cada planta térmica possui uma única estrutura física que a representa e a partir desta, variadas estruturas produtivas podem ser definidas. Entretanto, a estrutura produtiva de um sistema deve ter um significado físico que esteja de acordo com o comportamento da planta para ser capaz de estimar custos exergéticos racionais (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

3.2.1 Modelo Exergia Total

Figura 2 mostra duas possibilidades de arranjos de diagramas produtivos para a mesma planta utilizando fluxos de exergia total (Modelo E). A principal diferença entre eles é que no arranjo 2 a exergia adicionada na queima suplementar é alocada somente para um dos produtos (calor útil). Nesse arranjo há uma segunda junção (J^E_2) responsável por essa distinção. Já no arranjo 1, essa exergia é alocada para os dois produtos da planta. A definição de insumo e produto dos subsistemas leva em conta as variações dos fluxos exergéticos através dos equipamentos em que $E_{i,j}$ representa a variação da exergia entre os estados físicos i e j .

Essa metodologia não é capaz de definir um produto para o *intercooler*, e por escolha do analista, neste caso este equipamento é analisado junto com os compressores de baixa e alta pressão, conforme mostrado pelo subsistema “CIC”

na Fig. 2. Quanto aos resíduos (gases de exaustão), estes são alocados implicitamente em proporção aos consumos exergéticos dos equipamentos responsáveis pelos produtos finais da planta: turbina a gás e caldeira de recuperação.

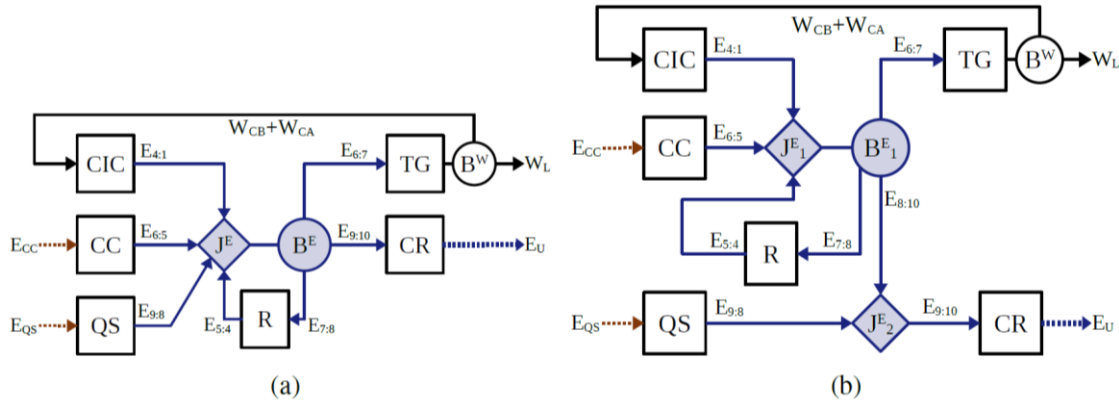


Figura 2. Diagrama produtivo - Modelo Exergia Total, arranjos 1 (a) e 2 (b). Adaptado de Barone et al. (2022).

3.2.2 Modelo H&S

Esse modelo (SANTOS et al., 2009) foi proposto para levar em conta o isolamento de equipamentos dissipativos e o tratamento dos resíduos em termoeconomia ao descrever o comportamento de ciclos termodinâmicos no plano h-s considerando a variação de entalpia e entropia do fluido de trabalho, conforme sugerido por Valero, Royo e Lozano (1995).

O Modelo H&S utiliza o conceito da neguentropia introduzido por Frangopoulos (1987), porém com uma perspectiva diferente, como componente/termo entrópico da exergia que juntamente com o entálpico definem a exergia física de um fluxo, como demonstrado por Lourenço, Nebra e Santos (2014).

A exergia total é a soma das componentes física e química, é e determinada pela Eq. (2), desprezando os efeitos cinéticos e potenciais. A exergia física pode ser desagregada em dois componentes: entálpico (E^H) e entrópico (E^S). Além do mais, esse método considera explicitamente a exergia química (E^{QUI}) nos diagramas termoeconômicos.

Segundo Torres et al. (2008), um sistema de conversão energia é 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 do sistema e é representado pelo dispositivo “AMB” nos diagramas quando se utiliza alguns modelos de desagregação, como o Modelo H&S. É através deste dispositivo que os resíduos (gases de exaustão) são dissipados e é de onde o sistema recebe o ar ambiente.

Além disso, esse dispositivo tem um papel fundamental na inclusão de custos ambientais associados a equipamentos e processos de tratamento ambiental, como por exemplo o custo de precipitadores eletrostáticos usados na eliminação de cinzas em gases de combustão ou filtros de manga para controle da poluição do ar, dispositivos usados para captura e armazenamento de carbono, licenças ambientais e multas por emissão de poluentes. Assim, pode-se alocar encargos ambientais no dispositivo que representa o ambiente nos diagramas termoeconômicos.

$$E^{TOTAL} = E^H - E^S + E^{QUI} \quad (2)$$

De maneira similar ao modelo anterior, o Modelo H&S também pode definir dois arranjos de diagramas produtivos. O primeiro (Fig. 3a) aloca a exergia adicionada na queima suplementar para ambos os produtos da planta e o segundo (Fig. 3b) aloca somente para o calor útil através de um novo conjunto de junção-bifurcação ($J^{H_2-B^{H_2}}$) para a parcela entálpica da exergia. Esse método é capaz de isolar o *intercooler* no diagrama ao definir seu produto com base na parcela entrópica da exergia, e assim, todos os subsistemas estão isolados no diagrama. O calor residual do *intercooler* é internalizado no próprio componente para que esse custo seja refletido no dos produtos finais da planta. Os insumos e produtos dos subsistemas são sistematicamente definidos levando-se em conta as variações dos fluxos dos componentes entálpico, entrópico e químico de todos os fluxos. A nomenclatura $E_{i,j}^H$, $E_{i,j}^S$ e $E_{i,j}^{QUI}$ representa a variação desses componentes entre os estados físicos i e j , respectivamente.

3.2.3 Desagregação Localizada

A desagregação localizada (SANTOS et al., 2020) foi proposta com o intuito de isolar todos os subsistemas nos diagramas termoeconômicos sem o aumento da complexidade que a desagregação total pode causar. Na Fig. 4 há uma integração do método sem desagregação da exergia com o Modelo H&S. O Modelo Exergia Total é aplicado em todos os equipamentos da planta exceto o *intercooler*, onde o H&S é utilizado já que é capaz de definir um produto com base na parcela E^S . Nesse caso, a junção-bifurcação ($J^{E_1-B^{E_1}}$) mantém um balanço conservativo.

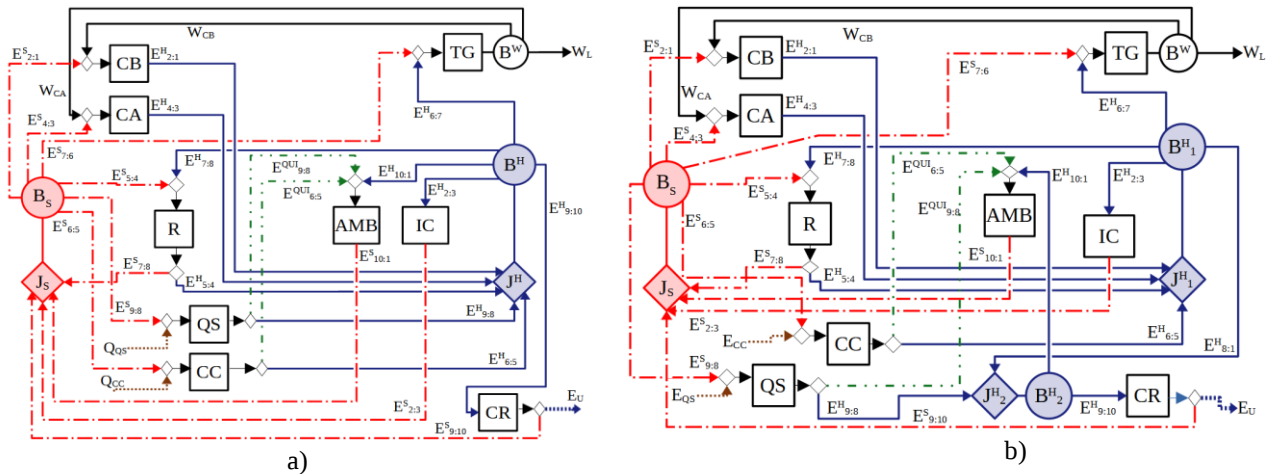


Figura 3. Diagrama produtivo - Modelo H&S, arranjos 1 (a) e 2 (b). Adaptado de Barone et al. (2022).

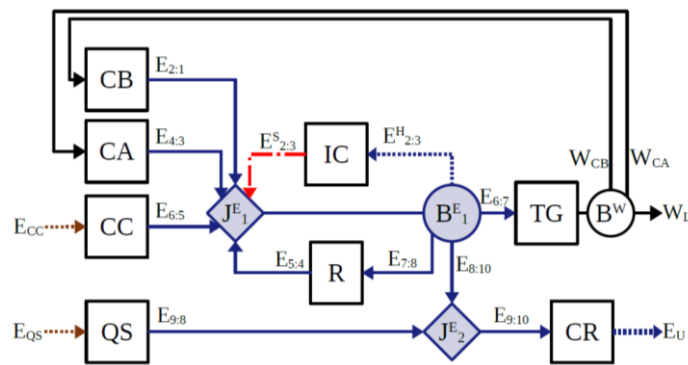


Figura 4. Diagrama produtivo com desagregação localizada no intercooler. Adaptado de Barone et al. (2022).

3.3. Diagrama Abrangente

O diagrama abrangente, apresentado por Avellar et al. (2018b) e sistematizado por Barone et al. (2022), combina características dos diagramas físico e produtivo e consegue determinar de forma simultânea os custos dos fluxos físicos e produtivos da planta. Além disso, conecta os subsistemas com os mesmos fluxos físicos da planta, e dessa forma evita as arbitrariedades associadas a utilização de unidades fictícias dos produtivos, como junções e bifurcações.

3.3.1 Modelo Exergia Total

A Fig. 5 mostra o diagrama abrangente de acordo com o modelo sem desagregação da exergia. Pode-se notar a combinação dos fluxos físicos (E_i) e produtivos ($E_{i,j}$), e mais algumas características devem ser destacadas. Primeiro, o *intercooler* apesar de estar separado dos outros equipamentos no diagrama, não pode ser considerado isolado, pois de acordo com Evans (1980) o isolamento significa definir insumo e produto (propósito produtivo) dos subsistemas e neste caso, os fluxos de entrada e saída do *intercooler* não podem ser considerados insumo e produto, respectivamente.

No trabalho de Barone et al. (2022), o *intercooler* foi isolado através da técnica de desagregação localizada, porém outro fator ainda limita uma análise sistematizada nesse diagrama. Conforme mostrado na Fig. 5, a planta tem um resíduo (fluxo E_{10}) que precisa ter o custo alocado para os produtos finais da planta. Nesse cenário, há uma diversidade de critérios que podem ser utilizados de acordo com objetivo e preferência do analista. Alguns desses critérios são os propostos por: Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), Torres et al. (2008), Seyyedi, Ajam e Farahat (2010), Agudelo, Valero e Torres (2012), Denise et al. (2020) e Faria et al. (2021). Diante de tantas possibilidades e da falta de um critério sistematizado, neste trabalho o diagrama abrangente com Modelo Exergia Total não é aplicado.

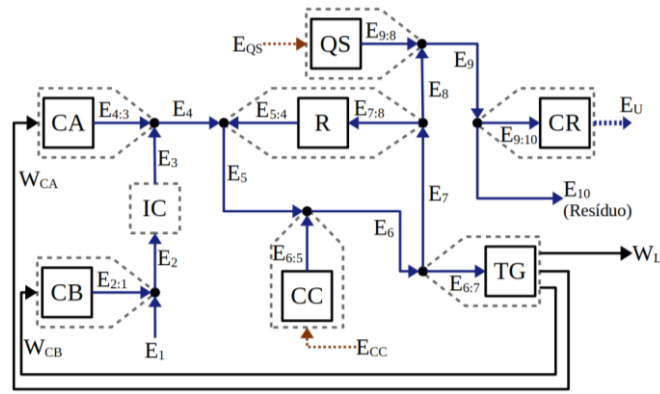


Figura 5. Diagrama abrangente - Modelo Exergia Total.

3.3.2 Modelo H&S

A Fig. 6 mostra o diagrama abrangente obtido com o Modelo H&S. Observa-se que todos os equipamentos estão isolados no diagrama, além da presença do componente que representa o ambiente (AMB). Os fluxos são definidos com base nos componentes entálpicos, entrópicos e químicos da exergia. Observa-se que há 3 loops internos de fluxos, dois (E^H e E^{QUI}) deles em um sentido e outro (E^S) em sentido oposto, já que as parcelas entálpica e química tem contribuição positiva e a entrópica negativa na definição da exergia, Eq. (2). Nota-se um aumento considerável na quantidade de fluxos no diagrama e consequentemente no número de equações do modelo em relação ao Modelo E. Os custos exergéticos unitários são obtidos nesse tipo de diagrama ao aplicar o balanço da Eq. (1) em todos os componentes e unidades produtivas do diagrama, além das regras do insumo e do produto. Mais detalhe dessa metodologia pode ser encontrado no trabalho de Avellar et al. (2018b).

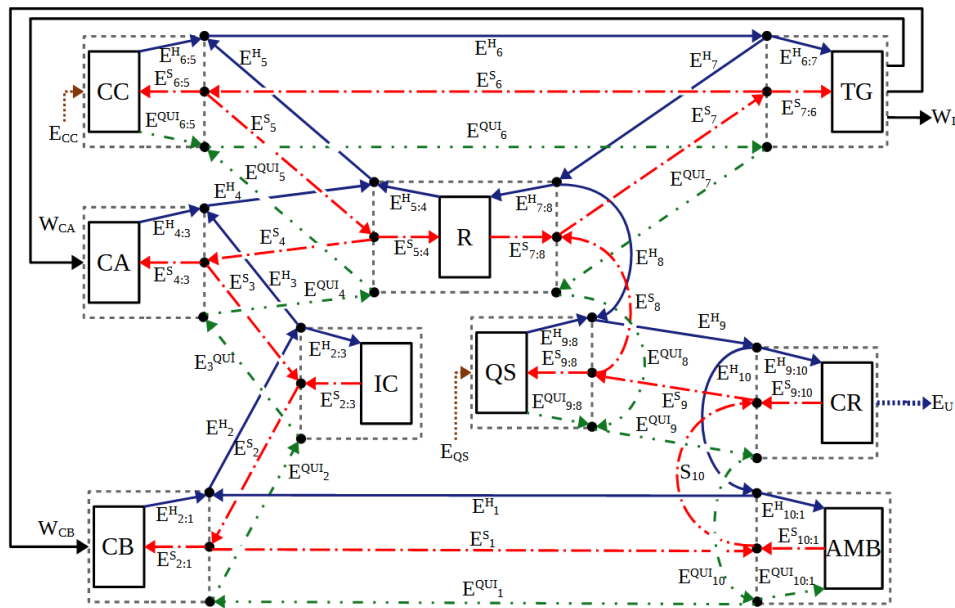


Figura 6. Diagrama abrangente - Modelo H&S. Adaptado de Barone et al. (2022).

3.3.3 Desagregação Localizada

Para evitar a complexidade das modelagens que utilizam a desagregação de exergia física, como a do Modelo H&S – Fig. 6, esse trabalho introduz uma desagregação localizada somente nos equipamentos dissipativos da planta. Essa desagregação no *intercooler* já foi realizada no trabalho de Barone et al. (2022), porém o tratamento do resíduo não pode ser realizado de maneira sistemática devido aos inúmeros critérios possíveis. Assim, a desagregação localizada é realizada no *intercooler* e também no dispositivo que representa o ambiente. Fluxos de exergia total são utilizados em todos os componentes da planta, exceto *intercooler* e ambiente que são isolados através da desagregação localizada da exergia em parcelas entálpica e entrópica (Modelo H&S). Essa desagregação insere o dispositivo que representa o ambiente no modelo (característica original do Modelo H&S) que não era utilizado em casos de aplicação do Modelo E (Figs. 2, 4 e 5). Esse dispositivo tem papel importante na inclusão de encargos ambientais em termoeconomia.

Figura 7 destaca o isolamento do dispositivo ambiente enquanto que a Fig. 8 mostra o diagrama abrangente completo com a desagregação localizada em que todos os equipamentos estão isolados e a modelagem pode ser

realizada de forma sistemática sem a utilização de critérios adicionais para o tratamento dos resíduos. Nota-se uma redução na complexidade do modelo em relação ao último apresentado.

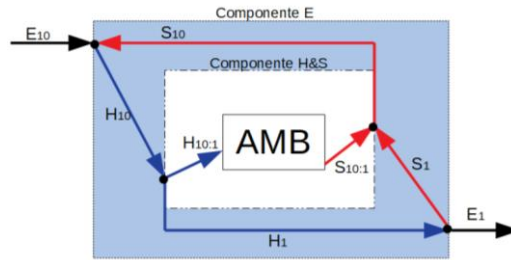


Figura 7. Integração dos modelos Exergia Total e H&S para desagregação localizada do dispositivo ambiente.

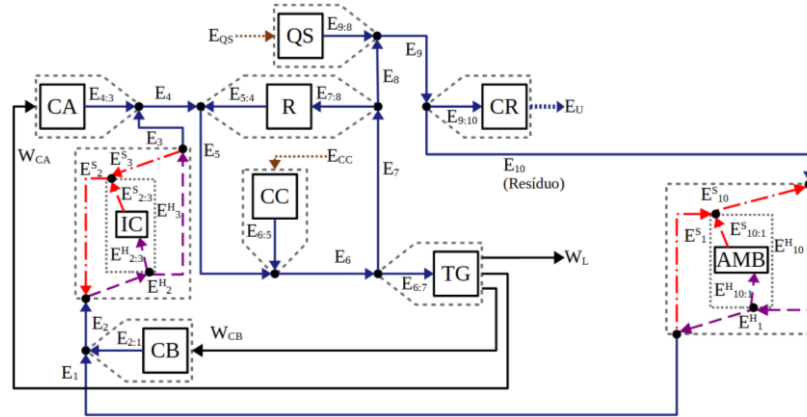


Figura 8. Diagrama abrangente com desagregações localizadas do intercooler e ambiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 9 compara os custos exergéticos unitários do calor útil e da potência líquida para o sistema de cogeração obtidos com os diferentes métodos aplicados neste estudo. Todos os pontos pertencem a reta solução que é específica para os índices de desempenho da planta, como a eficiência exergética e a relação potência/calor.

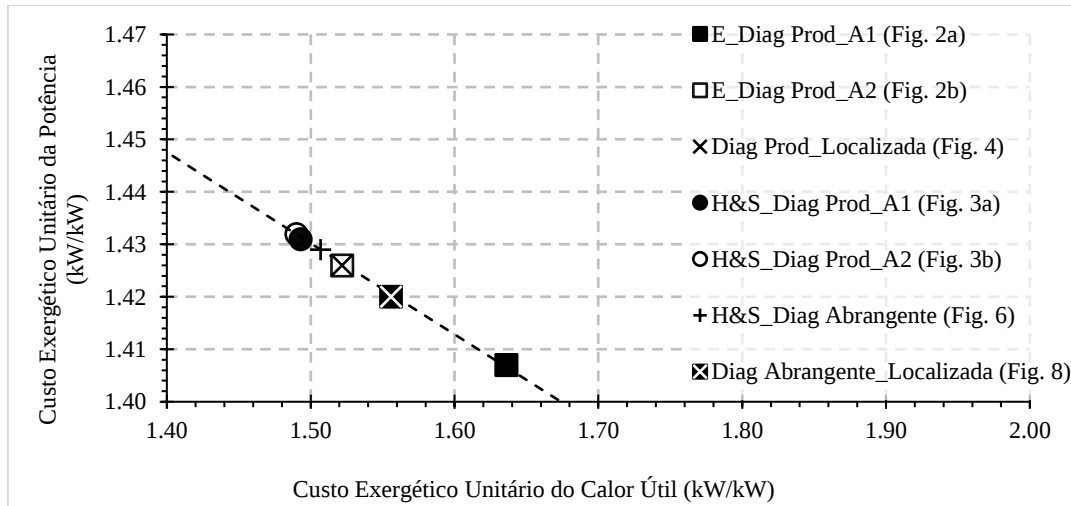


Figura 9. Custo exergético unitário dos produtos finais de acordo com as metodologias aplicadas.

A tendência dos pontos obtidos na reta solução foi apresentada e discutida em detalhes nos trabalhos de Barone et al. (2021, 2022). Em resumo, os modelos utilizados apresentam diferentes critérios de alocação de custos dos resíduos. No Modelo E, esse custo é alocado implicitamente na potência e no calor proporcionalmente ao insumo da turbina e da caldeira de recuperação, respectivamente. Já no Modelo H&S (SANTOS et al., 2009), o custo é alocado em parte diretamente nos equipamentos que aumentam a entropia do fluido de trabalho e como a CR não é um desses equipamentos, não se aloca diretamente o custo dos resíduos no calor útil. Dessa forma, penaliza-se mais o custo da potência. Além disso, o Modelo E não é capaz de definir um produto para o intercooler com base em fluxos de exergia total.

A modelagem através do diagrama abrangente Modelo E não foi realizada, pois necessita de um critério adicional para alocar o custo dos resíduos. Para isso, os critérios introduzidos por Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), Torres et al. (2008), Seyyedi, Ajam e Farahat (2010), Agudelo, Valero e Torres (2012), Denise et al. (2020) e Faria et al. (2021), dentre outros, poderiam ser utilizados. Entretanto, todos eles precisam definir uma razão de distribuição do custo dos resíduos (ψ_{jr}) para determinar qual a porcentagem do resíduo que será alocada em um determinado equipamento. Como esses critérios definem ψ_{jr} e internalizam o custo de maneiras distintas, não poderiam ser sistematizados e por isso fogem do objetivo deste trabalho.

O par ordenado de custo de calor útil e potência obtido com o método introduzido neste trabalho (diag. abrangente – desagregação localizada, Fig. 8) apresenta um valor intermediário (Fig. 9) e coerente do ponto de vista termodinâmico.

Observa-se pela escala de valores no gráfico da Fig. 9 que a diferença de custos unitários obtidos pelos variados modelos é bem pequena, ou seja, os valores são bem próximos. Os resultados de custo exergético unitário de todos os métodos ficam dentro da seguinte faixa: 1,563 ($\pm 0,073$) kW/kW e 1,42 ($\pm 0,013$) kW/kW para calor útil e potência, respectivamente. Ou seja, o custo unitário do calor varia no máximo em torno de 9% e o da potência em menos de 2%. O trabalho de Faria et al. (2015) mostrou que a melhoria da precisão devido à desagregação da exergia física é pequena em relação à grande melhoria que há partindo de uma análise de energia (baseada apenas na entalpia) para uma análise exergética. A melhoria nas metodologias de desagregação pode ser considerada como um “ajuste fino”.

Figura 10 permite comparar as quantidades de fluxos e equações auxiliares necessárias em cada modelo deste trabalho. No diagrama produtivo, o arranjo 2 aumenta em somente um fluxo em relação ao arranjo 1 para ambos os modelos. Ainda nos produtivos, o Modelo H&S aumenta em mais de duas vezes (+115%) as quantidades de fluxos e equações auxiliares em relação ao Modelo E (arranjo 1). Esse aumento no arranjo 2 é da mesma ordem da grandeza. Já a desagregação localizada apresenta valores intermediários entre os modelos.

O diagrama abrangente Modelo H&S aumenta consideravelmente a complexidade da modelagem: em relação ao modelo E (diagrama produtivo) há um aumento de mais de três vezes na quantidade de fluxos em relação aos arranjos 1 (+269%) e 2 (+243%); em relação ao Modelo H&S (diagrama produtivo) o aumento é de 71% e 66%. Por outro lado, ao utilizar o diagrama abrangente com desagregação localizada somente no *intercooler* e no ambiente, o número de fluxos e equações auxiliares cai para 36 e 11, respectivamente. Ou seja, uma redução de 25% e 42% nos fluxos e equações auxiliares se comparado a modelagem com diagrama abrangente e desagregação total (Modelo H&S).

Assim, é possível observar que a desagregação localizada introduzida neste trabalho é capaz de isolar corretamente todos os componentes da planta sem elevada complexidade. Além disso, sua análise é sistematizada, sem necessidade de critério adicional para alocar o custo dos resíduos, e o uso do dispositivo que representa o ambiente tem importância na inclusão de encargos ambientais em termoeconomia. Os modelos utilizados neste trabalho já foram aplicados por exemplo na alocação de emissões específicas para os produtos finais em plantas de cogeração nos trabalhos de Santos et al., (2015, 2016).

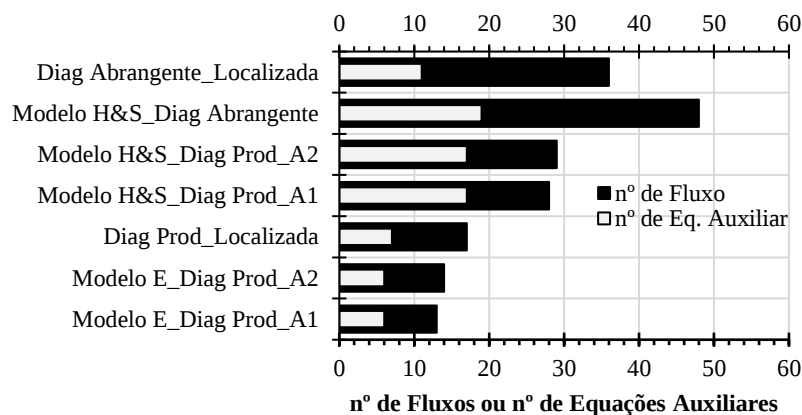


Figura 10. Análise da complexidade da modelagem realizada.

5. CONCLUSÕES

Visando uma metodologia termoeconômica sistematizada de alocação de custos com um mínimo de arbitrariedade e complexidade, este trabalho fez uma revisão das principais metodologias e diagramas utilizados em um exemplo com um sistema de cogeração, até chegar numa proposta de desagregação localizada tanto dos equipamentos dissipativos convencionais, como o *intercooler*, como do dispositivo que representa o ambiente.

Para identificar o processo de formação de custo dos resíduos, a maioria dos métodos utiliza o diagrama produtivo e/ou desagregações da exergia. Entretanto, este tipo de diagrama pode conter arbitrariedades devido aos componentes fictícios, conforme mostrado pelas diferentes possibilidades de arranjo para uma mesma estrutura física. Além disso, a desagregação da exergia apesar de melhorar a precisão dos resultados e isolar os equipamentos dissipativos, acarreta num aumento da complexidade da modelagem.

A técnica da desagregação localizada reduz essa complexidade. No diagrama abrangente, essa técnica nunca havia sido aplicada para isolar o dispositivo que representa o ambiente nos diagramas. Essa novidade introduzida neste trabalho mostrou resultados coerentes do ponto de visto termoeconômico (pertencente a reta solução junto com os demais pares ordenados de custo de potência e calor), sem apresentar as arbitrariedades relacionadas com o diagrama produtivo e com menor complexidade em relação a desagregação total (Modelo H&S) com diagrama abrangente.

Apesar desse trabalho ter aplicado diversas metodologias e diagramas para avaliação de custos exergeticos, outros trabalhos já mostraram que essas metodologias podem ser facilmente estendidas para alocação de encargos ambientais, como as emissões específicas de CO₂.

Diante disso, essa novidade aqui introduzida representa um caminho para a sistematização, sem elevada complexidade, da modelagem termoeconômica que é importante para uma análise completa, levando-se em conta aspectos técnicos, econômicos e ambientais em termoeconomia para atender recentes apelos ambientais e de sustentabilidade. Além do mais, esse dispositivo que representa o ambiente nos diagramas tem papel importante na inclusão de encargos ambientais não somente pelo tratamento dos resíduos, como os gases de exaustão desse estudo de caso. Através desse dispositivo, os custos monetários associados a equipamentos de tratamento, licenças ambientais e receitas e despesas do mercado de carbono podem ser internalizados na análise, por exemplo.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) – 288/2022.

7. REFERÊNCIAS

- AGUDELO, A.; VALERO, A.; TORRES, C. Allocation of waste cost in thermoeconomic analysis. *Energy*, v. 45, n. 1, p. 634–643, set. 2012.
- AVELLAR, L. M. DE et al. A Comprehensive Thermoeconomic Diagram Based on Both Subsystem Productive Purposes and Physical Connections. *ENCIT 2018 proceedings of the 7th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. Anais...Águas de Lindóia, SP: ABCM, 2018a.
- AVELLAR, L. M. DE et al. Comprehensive Thermoeconomic Diagram for the Thermal System Cost Assessment using Physical and Productive Internal Flows. *ECOS 2018 Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Anais...Guimarães: 2018b.
- BARONE, M. A. et al. Arbitrariness and Waste Cost Treatment of a Cogeneration System with Intercooler and Supplementary Firing. *Proceedings of Ecos 2021 - The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Anais...Taormina - Italy: 2021.
- BARONE, M. A. et al. On the Arbitrariness and Complexity in Thermoeconomics due to Waste Cost and Supplementary Firing Treatment. *Engineered Science*, v. 17, p. 328–342, 2022.
- DENISE, L.-M. H. et al. An Irreversibility-Based Criterion to Determine the Cost Formation of Residues in a Three-Pressure-Level Combined Cycle. *Entropy*, v. 22, n. 3, p. 299, 5 mar. 2020.
- EVANS, R. B. Thermoeconomic isolation and essergy analysis. *Energy*, v. 5, n. 8–9, p. 804–821, ago. 1980.
- FARIA, P. R. et al. Disaggregation of the Physical Exergy to Improve the Accuracy of the Results in Thermoeconomics. *COBEM 2015 - 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. Anais...Rio de Janeiro: 2015.
- FARIA, P. R. et al. On the Allocation of Residues Cost using Conventional and Comprehensive Thermoeconomic Diagrams. *International Journal of Thermodynamics*, v. 24, n. 2, p. 134–149, 26 maio 2021.
- FRANGOPOULOS, C. A. Thermo-economic functional analysis and optimization. *Energy*, v. 12, n. 7, p. 563–571, 24 jan. 1987.
- FRANGOPOULOS, C. A. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 323–342, 25 jan. 1994.
- LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, v. 31, n. 8–9, p. 1257–1289, 25 jul. 2006.
- LOURENÇO, A. B.; NEBRA, S. A.; SANTOS, J. J. C. S. Another Perspective on the Physical Exergy of a Flow. *ECOS 2014 proceedings of the 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Anais...Turku, Finland: 2014.
- LOURENÇO, A. B.; SANTOS, J. J. C. S.; DONATELLI, J. L. M. Thermoeconomic Modeling of a Simple Heat Pump Cycle: An Alternative Approach for Valve Isolation. (D. Mitrović, M. Laković, Eds.) *SimTerm 2011 Proceedings of the 15th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia*. Anais...Sokobanja, Serbia: 2011.
- SANTOS, J. J. C. S. et al. On the Negentropy Application in Thermoeconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? *International Journal of Thermodynamics*, v. 12, n. 4, p. 163–176, 2009.
- SANTOS, R. G. et al. Thermoeconomic modeling for CO₂ allocation in steam and gas turbine cogeneration systems. *Proceedings of Ecos 2015 - The 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Anais...Pau - France: 2015.

- SANTOS, R. G. et al. Thermoeconomic modeling for CO₂ allocation in steam and gas turbine cogeneration systems. *Energy*, v. 117, p. 590–603, 24 jan. 2016.
- SANTOS, R. G. et al. On the Localized Physical Exergy Disaggregation for Dissipative Component Isolation in Thermoeconomics. *Revista de Engenharia Térmica*, v. 19, n. 2, p. 63–69, 21 dez. 2020.
- SANTOS, R. G. et al. On the Thermoeconomic Diagnosis through the Localized Physical Exergy Disaggregation for Dissipative Component Isolation. *Proceedings of Ecos 2021 - The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Anais...Taormina - Italy: 2021.*
- SEYYEDI, S. M.; AJAM, H.; FARAHAT, S. A new criterion for the allocation of residues cost in exergoeconomic analysis of energy systems. *Energy*, v. 35, n. 8, p. 3474–3482, ago. 2010.
- TORRES, C. et al. On the cost formation process of the residues. *Energy*, v. 33, n. 2, p. 144–152, fev. 2008.
- TORRES, C.; VALERO, A. The Exergy Cost Theory Revisited. *Energies*, v. 14, n. 6, p. 1594–1636, 13 mar. 2021.
- VALERO, A.; ROYO, J.; LOZANO, M. A. The Characteristic Equation and Second Law Efficiency of Thermal Energy Systems. *International Conference Second Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21st Century. Anais...E. Sciubba, M.J. Moran. Roma “La Sapienza,” 1995.*
- VALERO, A.; SERRA, L.; UCHE, J. Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoeconomics. Part I: Theory. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 128, n. 1, p. 1–8, 2006.
- VALERO, A.; TORRES, C.; SERRA, L. A general theory of thermoeconomics: Part I - Structural analysis. (A. Valero, Ed.) *ECOS 1992 - Proceedings of the International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Anais...Zaragoza: 1992.*
- VON SPAKOVSKY, M. R. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 343–364, 24 jan. 1994.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

LOCALIZED DISAGGREGATION OF THE ENVIRONMENT DEVICE IN THE THERMOECONOMIC DIAGRAMS FOR THE SYSTEMATIZED TREATMENT OF ENVIRONMENTAL CHARGES

Pedro Rosseto de Faria, pedro.faria@ifes.edu.br^{1,2}

Marcelo Aiolfi Barone, mabacz@gmail.com²

Rodrigo Guedes dos Santos, rodrigo.guedes@ifes.edu.br^{2,3}

Igor Chaves Belisario, igor.belisario@ifes.edu.br⁴

José Joaquim C. S. Santos, jose.j.santos@ufes.br²

¹Federal Institute of Espírito Santo (IFES), Cariacica/ES - Brazil

²Federal University of Espírito Santo (UFES), Vitória/ES - Brazil

³Federal Institute of Espírito Santos (IFES), Vitória/ES - Brazil

⁴Federal Institute of Espírito Santos (IFES), São Mateus/ES - Brazil

Abstract. Thermoeconomic methodologies are used in a wide range of applications, such as cost allocation, diagnosis, and optimization of thermal systems. Different kinds of diagrams can be used: physical, productive, and comprehensive. Modelling with a physical diagram is not enough to identify the waste cost formation process, and therefore most methodologies use the productive one, however, this can contain arbitrariness due to the use of fictitious units. The comprehensive diagram combines physical and productive concepts and reduces arbitrariness, but can increase the model complexity. Another relevant challenge in thermoeconomics is the isolation of dissipative equipment. Models of physical exergy disaggregation were proposed to solve this problem and they can be used with all the diagrams mentioned. However, despite better detailing the cost formation process and isolating the dissipative, it increases the complexity of the model. To reduce the complexity while isolating the dissipative equipment, a localized disaggregation method was recently proposed and applied with productive and comprehensive diagrams. Through an example of a complex cogeneration system, the main objective of this work is to emphasize the advantages and possible limitations of the use of localized disaggregation in thermoeconomic methodologies and diagrams, especially concerning dissipative equipment. In addition, it details the advantages, applicability and arbitrariness of each type of diagram and the exergy disaggregation when applied to the isolation of dissipative equipment and waste treatment. The novelty of the study is the localized disaggregation of the device that represents the environment in the comprehensive diagrams. This disaggregation integrates an exergy disaggregation model with a non-disaggregation model to isolate the environment device. This device plays an important role in the allocation of waste and environmental burdens. The results show the way toward the systematization of thermoeconomic modelling capable of treating waste and isolating dissipative equipment with a minimum of arbitrariness and complexity.

Keywords: thermoeconomic modelling, exergy disaggregation, localized disaggregation, environment device