















ARTIGO DE REVISÃO

## Alocação em sistemas energéticos multiproduto: revisão e proposta de métodos

*Asignación en sistemas energéticos multiproducto: revisión y propuesta de métodos*

*Allocation in multiproduct energy systems: review and method proposals*

Monica Carvalho<sup>1\*</sup>    
Yipsy Benito Roque<sup>2</sup>    
Pablo Roque Diaz<sup>3</sup>    
Alfredo Alejandro Leyva Cespedes<sup>3</sup>    
José Joaquim Conceição Soares Santos<sup>4</sup>    
Marcelo Aiolfi Barone<sup>4</sup>    
Júlio Augusto Mendes da Silva<sup>5</sup>  

<sup>1</sup> Departamento de Eng. de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

<sup>3</sup> Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Ambientales, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba

<sup>4</sup> Departamento de Eng. Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil

<sup>5</sup> Departamento de Eng. Mecânica, Universidade Federal da Bahia, Brasil, Salvador, BA, Brasil

\* [monica@cear.ufpb.br](mailto:monica@cear.ufpb.br), Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, 58051-970, João Pessoa, Paraíba, Brasil.

**Recebido:** 17 abril 2019

**Aceito:** 01 julho 2020

**Publicado:** 18 julho 2020

**Copyright:** © 2020 Carvalho et al. Este artigo é publicado em acesso aberto e distribuído sob os termos da [Licença Creative Commons Atribuição](#) (CC BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos, desde que creditados os autores e a fonte original.

**Financiamento:** Agência Nacional de Energia Elétrica (Projeto PD-6483-0318/2018); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PQ-307394/2018-2); Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo.

**Publicado por:**



### Resumo

Considerando que uma quantidade considerável do calor e trabalho consumidos hoje são produzidos em plantas de cogeração, estudos sobre alocação de impactos ambientais em sistemas energéticos multiproduto são relevantes. Diferentes critérios de alocação de custos podem ser aplicados em análises multiprodutos e a escolha desses critérios impacta fortemente nos resultados. Além disso, a desagregação usada para o sistema analisado influencia nos resultados. O objetivo principal desse trabalho é estudar a influência de dois aspectos: (i) nível de desagregação e (ii) critérios de alocação de custos na determinação do impacto ambiental dado pelas emissões de CO<sub>2</sub>. O presente estudo aborda especificamente aspectos da desagregação da estrutura física e produtiva e critérios de alocação e suas consequências nos resultados da alocação de impactos ambientais em sistemas energéticos multiprodutos. Inicialmente discute-se os métodos comumente aplicados em estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e sua aplicabilidade aos sistemas energéticos multiprodutos. Em seguida, técnicas termoeconômicas são apresentadas e discutidas. À maneira de exemplo, um sistema de cogeração hipotético para a produção combinada de eletricidade e água dessalinizada é apresentado. Os resultados demonstraram que a termoeconomia permite o detalhamento do processo de formação dos impactos ambientais por meio de critérios de alocação mais racionais baseados nas leis da termodinâmica. Conclui-se que a termoeconomia deve ser usada para alocação sempre que o objeto de estudo seja um sistema energético multiproduto e também quando os produtos não-energéticos possam ser expressos racionalmente por meio de custos exergéticos.

Palavras-chave: Alocação. Termoeconomia. Exergia. Energia. Desagregação.

## Resumen

Considerando que gran parte del calor y el trabajo consumidos hoy en día es producida en plantas de cogeneración, estudios sobre la asignación de impactos ambientales en sistemas energéticos multiproduto son relevantes. Diferentes criterios de asignación de costes pueden ser aplicados en análisis multiproduto y la elección de estos criterios afecta significativamente los resultados. Por su parte, la desagregación utilizada para el análisis de un sistema también repercute en los resultados. El objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia de dos aspectos: (i) nivel de desagregación y (ii) criterios de asignación de costes en la determinación del impacto ambiental dado por emisiones de CO<sub>2</sub>. Este estudio aborda, específicamente, aspectos de la desagregación de la estructura física y productiva y algunos criterios de asignación y sus consecuencias en la determinación de impactos ambientales en sistemas energéticos multiproduto. Inicialmente, se discuten los métodos comúnmente usados en estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y su aplicabilidad a sistemas energéticos multiproduto. Después, técnicas termoeconómicas son presentadas y discutidas. Como ejemplo, se presenta un sistema de cogeneración hipotético para la producción combinada de electricidad y agua desalinizada. Los resultados obtenidos demuestran que la termoeconomía permite un nivel superior de detalles en el proceso de formación de impactos ambientales por medio de criterios de asignación más racionales basados en leyes de la termodinámica. Se ha concluido que la termoeconomía debe ser utilizada para asignación siempre que el objeto de estudio sea un sistema energético multiproduto y también cuando los productos no-energéticos puedan ser expresados racionalmente por medio de costes exeréticos.

Palabras clave: Asignación. Termoeconomía. Exergia. Energía. Desagregación.

## Abstract

Considering that significant amounts of heat and work are consumed in cogeneration systems, studies on the allocation of environmental impacts in multiproduct energy systems are relevant. Different allocation criteria can be applied in multiproduct analyses and the choice of a criterion can strongly affect the results. Besides, the level of disaggregation employed influences the precision of results. This study approaches aspects of the disaggregation of the physical and productive structures as well as allocation criteria to improve the precision of the results obtained when allocating environmental impacts in multiproduct energy systems. The main objective of this study is to study the influence of two aspects: (i) disaggregation level and (ii) allocation criteria when determining the environmental impact associated with the case study. Initially, the methods commonly applied in Life Cycle Assessment (LCA) studies are discussed, along with their applicability to multiproduct energy systems. Thermoeconomic techniques are then presented and discussed. A hypothetical cogeneration system is employed as a case study, producing electricity and desalinated water. The results demonstrated that thermoeconomics enables the detailing of the cost formation process by means of more rational allocation criteria, based on thermodynamics. It is concluded that thermoeconomics can be used for allocation when the study object is a multiproduct energy system and also when any non-energy products can be rationally expressed by means of exergy costs.

Keywords: Allocation. Thermoeconomics. Exergy. Energy. Disaggregation.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade da alocação de custos ou impactos ambientais surge sempre que há um sistema produzindo mais de um produto com valor de mercado. Devido às subjetividades inerentes à sua escolha, a alocação se torna um ponto crítico do estudo. Dependendo do critério aplicado para a alocação, o custo final dos produtos é afetado, podendo dificultar a avaliação da relação custo-benefício ou até passar informações errôneas (Rosen 2008).

A alocação de custos monetários ou impactos ambientais, além de permitir a distribuição de recursos, também deve proporcionar uma análise das consequências de tal alocação. A ideia em sistemas energéticos multiproduto é que, quando comparados com sistemas de produção separada, os custos dos produtos fornecidos sejam inferiores. Uma alocação justa contribui para a aceitação de sistemas multiprodutos, que são mais eficientes, mas mais complexos que a tradicional produção separada de energia.

A alocação em sistemas energéticos multiproduto ainda gera debates e é bastante discutida em estudos termodinâmicos que envolvem Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (Agostini et al. 2020; Ekvall 2020; Majeau-Bettez et al. 2018; Noussan 2018; Rehberger, Hiete 2019; Tereshchenko, Nord 2015; Timonen et al. 2019), inclusive com testes para novos métodos (Aldrich et al. 2011; Gordillo, Rankovic, Abdul-Manan 2018; Mackenzie, Leinonen, Kyriazakis 2017; Santos et al. 2016). Curran (2007) já havia mencionado que não há um método que proporcione solução geral. Na produção separada de energia, não há problema. Na produção combinada, relações físicas causais podem ser usadas para identificar fatores de alocação adequados, o que é impossível no caso de produção simultânea. A alocação racional de impactos ambientais em sistemas energéticos multiprodutos é um desafio, e Ramírez (2009) já havia citado mais de 26 metodologias que são usadas em função do tipo de sistema energético sendo analisado.

A termoeconomia combina a Segunda Lei da Termodinâmica com a economia para descrever o processo de formação dos custos dos produtos finais do sistema, baseado numa estrutura produtiva que define os produtos e os recursos (Lozano, Valero 1993). Em geral, modelos termoeconômicos são usados para alocar recursos externos (exergia ou custos monetários) para os produtos finais do sistema por meio dessa estrutura produtiva definida. A exergia é um parâmetro termodinâmico que contém informações sobre a qualidade da energia, e é muito usada para localizar e quantificar perdas. Porém, considerações ambientais podem ser incorporadas aos modelos termoeconômicos (Lozano, Carvalho, Serra 2014; Silva et al. 2017). O trabalho de da Silva et al. (2017) mostrou que para o caso de sistemas energéticos multiprodutos, a termoeconomia proporcionou uma abordagem mais detalhada por desagregar o sistema em seus subsistemas. Porém, quando a exergia é usada como critério de alocação, como acontece em um método muito usado na ACV, os resultados obtidos são bem próximos dos obtidos pelos métodos termoeconômicos.

O objetivo deste trabalho é discutir os métodos comumente aplicados na alocação de impactos ambientais em sistemas energéticos multiproduto, finalizando com a apresentação de técnicas de

alocação baseadas na termoeconomia. A partir de um caso de estudo, avalia-se a influência da desagregação do sistema térmico em seus subsistemas (para três níveis diferentes) combinada com os critérios termodinâmicos de alocação (base energética e base exergética). Determinam-se os impactos ambientais (emissões de CO<sub>2</sub>) em uma planta dual que combina uma unidade de cogeração com uma unidade da dessalinização, para a geração de energia elétrica e produção de água dessalinizada.

## 2. MÉTODOS

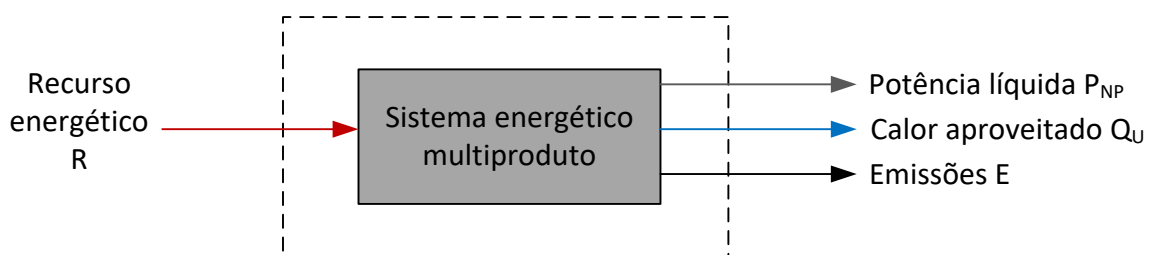
A seguir serão abordadas questões fundamentais referentes aos diferentes métodos de abordar o impacto ambiental em sistemas energéticos multiproduto.

### 2.1 Avaliação de Ciclo de Vida

A ISO 14044 (2006) estabeleceu os princípios para alocação, e também definiu que nos casos nos quais uma relação física não pudesse ser estabelecida ou usada como base para alocação, outro tipo de relação entre os produtos deveria ser aplicada. Apesar de haver estudos comparativos sobre diferentes diretrizes de alocação em ACV, sua interpretação não é direta, como concluído por Hanes et al. (2015) e Pelletier et al. (2015). Schrijvers, Loubet e Sonnemann (2016) fizeram uma revisão crítica da consistência de procedimentos de alocação, concluindo que não há suficientes diretrizes para identificar o método de alocação mais apropriado, e por isso há um grande número de métodos (e combinações de métodos).

Focando em sistemas energéticos multiproduto, Silva et al. (2017) destacaram que, em estudos de ACV, a alocação é geralmente feita com base no valor econômico do fluxo material, ou em base mássica (alguns estudos na área alimentícia usam o conteúdo de gordura, energia ou proteína, para alocação). A Figura 1 mostra o volume de controle aplicado a sistemas energéticos multiproduto (na abordagem ACV somente as entradas e saídas são mensuráveis).

**Figura 1.** Volume de controle para os métodos de alocação tradicionalmente aplicados na ACV de sistemas energéticos multiproduto.



Fonte: elaboração própria.

Os métodos mais comumente aplicados em ACV de sistemas energéticos multiproduto são descritos a seguir. A nomenclatura segue o exposto na Figura 1.

*Alocação com base na energia*, onde as frações correspondentes às emissões e recursos são alocados a potência líquida ( $f_{PNP}$ ) e ao calor útil ( $f_{QU}$ ) com base em seu conteúdo energético, como expresso nas Equações (1) e (2):

$$f_{PNP} = \frac{P_{NP}}{P_{NP} + Q_U} \quad (1)$$

$$f_{QU} = \frac{Q_U}{P_{NP} + Q_U} \quad (2)$$

*Alocação com base na exergia*, onde as frações correspondentes às emissões e recursos são alocados à potência líquida ( $f_{PNP}$ ) e ao calor útil ( $f_{QU}$ ) com base em seus respectivos conteúdos exergéticos, expressos pela letra B ( $B_{PNP} = 100\%$  e  $B_{QU} = Q_U \cdot \eta_{Carnot}$ ), conforme mostrado pelas equações (3) e (4):

$$f_{PNP} = \frac{B_{PNP}}{B_{PNP} + B_{QU}} \quad (3)$$

$$f_{QU} = \frac{B_{QU}}{B_{PNP} + B_{QU}} \quad (4)$$

No caso da eletricidade, o valor numérico da exergia ( $B_{PNP}$ ) coincide com o valor de sua energia ( $P_{NP}$ ). Porém, no caso do calor, seu conteúdo exergético depende da temperatura na qual é produzido e fornecido ao consumidor.

*Alocação com base no valor das emissões*, onde as emissões e recursos são alocados proporcionalmente às emissões ( $E$ ) da produção separada, como mostrado nas Equações (5) e (6). Para eletricidade, considera-se àquela disponível na rede elétrica nacional ( $E_{rede\ elétrica}$ ). Para calor ( $E_{caldeira}$ ), considera-se uma caldeira de referência (com eficiência  $\eta$ ).

(5)

$$f_{PNP} = \frac{E_{rede\ elétrica}}{E_{rede\ elétrica} + E_{caldeira}}$$

(6)

$$f_{QU} = \frac{E_{caldeira}}{E_{rede\ elétrica} + E_{caldeira}}$$

*Alocação com base no rateio marginalista*, onde se subtrai a energia primária necessária para produzir um dos serviços energéticos do sistema, de maneira separada (neste caso,  $Q_F$ ), como mostrado na Equação (7). O restante da energia primária é alocado à outra forma de energia (Equação 8). Esse método também pode ser chamado de *fuel chargeable to power*.

(7)

$$f_{QU} = \frac{Q_U}{Q_F}$$

(8)

$$f_{PNP} = 1 - f_{QU}$$

*Alocação com base nas emissões compartilhadas*, onde cada produto do sistema é avaliado em proporção a energia primária hipotética que seria consumida na produção separada, relativo à energia primária hipotética total que seria consumida para produzir os produtos, separadamente, como mostrado nas Equações (9) e (10):

(9)

$$f_{PNP} = \frac{\frac{P_{NP}}{\eta_{PP}}}{\frac{P_{NP}}{\eta_{PP}} + \frac{Q_U}{\eta}}$$

(10)

$$f_{QU} = \frac{\frac{Q_U}{\eta}}{\frac{P_{NP}}{\eta_{PP}} + \frac{Q_U}{\eta}}$$

Na Equação 9, a eletricidade ( $P_{NP}$ ) é dividida pelo rendimento de seu processo de geração ( $\eta_{PP}$ ), e o calor aproveitado ( $Q_U$ ) é dividido pelo rendimento de seu processo de geração ( $\eta$ ).

Existem outros métodos, obviamente, mas não são recomendados dentro do objetivo de aplicar uma alocação justa e racional em sistemas energéticos multiprodutos: 100% emissões alocadas ao vapor, 100% emissões alocadas a eletricidade, valor econômico, ou por meio de contratos ou acordos. Noussan (2018) apresentou outros métodos, que na prática não são aplicados devido às suas limitações.

## 2.2 Termoeconomia

A alocação por meios termoeconômicos pode ser adaptada a qualquer sistema multiproduto independentemente do tipo de produtos do sistema (energéticos ou não). Várias metodologias termoeconômicas foram desenvolvidas, especialmente nos últimos 35 anos, e todas seguem o mesmo princípio, calculado a partir de uma base racional, a Segunda Lei da Termodinâmica (Erlach, Serra, Valero 1999).

Um modelo para alocação de custos pode ser aplicado para calcular o custo monetário de cada fluxo interno e produto final. Tal modelo é um conjunto de equações obtidas por meio de balanços de custo em cada subsistema do diagrama termoeconômico (físico ou produtivo), como mostrado na equação (11). A solução deste conjunto de equações é o custo monetário unitário para cada fluxo interno e produto final, que é a quantidade de unidades monetárias necessárias para obter uma unidade de fluxo (medida da eficiência econômica do processo produtivo que gera o fluxo) (Valero, Serra, Uche 2006).

(11)

$$\sum(c_{out} \cdot Y_{out}) - \sum(c_{in} \cdot Y_{in}) = Z + c_F \cdot Q_F$$

Onde  $c_{out}$  e  $c_{in}$  são incógnitas que representam os custos monetários unitários para os fluxos internos na saída e entrada do subsistemas;  $Y_{out}$  e  $Y_{in}$  representam os fluxos produtivos genéricos internos na entrada e saída de subsistemas, e que podem ser avaliados utilizando qualquer magnitude termodinâmica: potência, exergia total, neguentropia, entalpia, etc.  $Z$  representa o custo externo por unidade de tempo para o subsistema, devido ao capital inicial, operação e manutenção do equipamento;  $c_F$  é um custo de mercado conhecido para a exergia do recurso externo, e  $Q_F$  é o consumo da exergia do recurso externo do sistema.

A equação (12) foi obtida após modificação da equação (11), e agora proporciona o custo exerético unitário ( $k_{out}$  e  $k_{in}$ ) de cada fluxo produtivo do sistema:

(12)

$$\sum(k_{out} \cdot Y_{out}) - \sum(k_{in} \cdot Y_{in}) = k_F \cdot Q_F$$

O custo exerético unitário de um fluxo é a quantidade de exergia necessária para obter uma unidade de exergia deste fluxo. Este custo é uma medida da eficiência termodinâmica do processo produtivo que gera esse fluxo. Neste caso considerou-se que o custo do subsistema devido ao capital inicial, operação e manutenção é zero ( $Z=0$ ). O custo monetário unitário para a exergia do recurso externo é substituído pelo custo exerético unitário da exergia do recurso externo (1.00 kW/kW) se não há consideração de exergia destruída antes do processo produtivo (Valero, Serra, Uche 2006).  $Y_{out}$  e  $Y_{in}$  permanecem os mesmos.

Como o número de fluxos produtivos internos é sempre maior que o número de subsistemas ou unidades, equações auxiliares são necessárias. Para modelos termoeconômicos baseados em diagramas produtivos, há duas maneiras de obter as equações auxiliares: co-produtos ou critério de igualdade.

Considerando que cada subsistema só pode ter um produto ou função principal, os outros fluxos produtivos internos que saem do subsistema são co-produtos, e possuem o mesmo custo unitário que o produto de outros subsistemas que só produzem esses tipos de fluxos produtivos internos (Erlach et al. 1999). O critério da igualdade considera que todos os fluxos produtivos internos que saem do mesmo subsistema são produtos, e possuem o mesmo custo unitário, já que foram produzidos com os mesmos recursos e irreversibilidades (Frangopoulos 1987; Santos et al. 2009).

Para modelos termoeconômicos baseados em diagramas físicos, há duas maneiras de obter as equações auxiliares: o princípio do produto e o princípio do insumo. O primeiro diz que todos os fluxos de saída identificados como produtos têm o mesmo custo unitário. O segundo diz que quando um fluxo atravessa um subsistema apenas para ceder exergia (ou outra magnitude termodinâmica) o seu custo unitário permanece constante (Lazzaretto, Tsatsaronis 2006).

Os modelos termoeconômicos devem ser adaptados para obter a equação (13), para calcular as emissões específicas ( $\lambda_{out}$  e  $\lambda_n$ ) dos fluxos internos e produtos finais:



(13)

$$\sum (\lambda_{out} \cdot Y_{out}) - \sum (\lambda_{in} \cdot Y_{in}) = \lambda_F \cdot Q_F$$

As emissões específicas de um fluxo são a quantidade de emissões necessárias para obter uma unidade de exergia do fluxo avaliado. Esse índice pode ser usado como parte de uma medida da eficiência ambiental do processo produtivo que gera o fluxo. Neste caso, o parâmetro  $\lambda_F$  representa a quantidade de emissões geradas devido ao consumo de uma unidade de exergia do recurso externo do sistema. As equações auxiliares e os fluxos e produtos finais ( $Y_{out}$  e  $Y_{in}$ ) são os mesmos das equações (11) e (12).

Diferentes abordagens termoeconômicas podem ser utilizadas: modelo E (a estrutura produtiva é definida usando somente o fluxo de exergia), modelo E&S (utiliza um fluxo fictício, a negentropia, combinada à exergia), e o modelo UFS que utiliza a exergia física desagregada em suas componentes de energia interna, trabalho de fluxo e entropia.

Adicionalmente, pode-se definir aqui dois tipos de diagramas termoeconômicos de acordo com os tipos de fluxos que conectam seus subsistemas: o diagrama físico e o diagrama produtivo. Nos diagramas físicos, a interconexão é por meio dos próprios fluxos físicos presentes no fluxograma da planta. Nos diagramas produtivos, os subsistemas são ligados por fluxos produtivos definidos como insumos e produtos dos subsistemas. Outra diferença é que nos diagramas produtivos existem componentes fictícios, chamados de junções (J) e bifurcações (B). Estes componentes fictícios servem para acoplar os produtos de alguns subsistemas (junção) e distribuir os produtos de alguns subsistemas como insumos para outros subsistemas (bifurcação).

Os insumos e produtos do tipo  $Y_{j:k}$  e  $Y_{k:j}$  são valores positivos, diferentemente dos fluxos físicos  $Y_j$  e  $Y_k$  que podem tomar tanto valores negativos quanto positivos.

### 3. ESTUDO DE CASO

No estudo de caso, diferentes critérios de alocação de custos são aplicados para diferentes níveis de desagregação de uma planta energética multiproduto hipotética.

A planta dual estudada aqui é definida como um sistema de cogeração, que gera eletricidade e calor útil para uma unidade de dessalinização. Nesta planta dual, tanto a água como a eletricidade produzida são consideradas como produtos e não existe subproduto. Para avaliar a influência da desagregação do sistema térmico, a planta dual será apresentada em três níveis diferentes, N1,

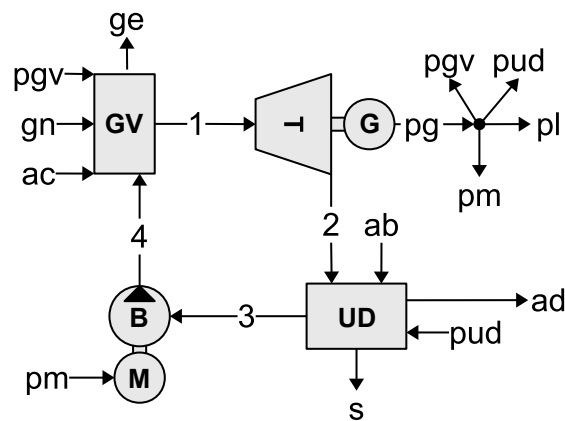
N2 e N3. Para cada um deles, serão determinadas as emissões de CO<sub>2</sub> usando dois critérios de alocação: base energética (En) e base exergética (Ex).

### 3.1 Descrição da planta dual

A Figura 2 representa uma planta dual para a produção de água dessalinizada e energia elétrica, descrita detalhadamente por Santos (2005). O sistema contém seis subsistemas: o gerador de vapor (GV), a turbina de vapor (T), o gerador elétrico (G), a unidade de dessalinização (UD), a bomba (B) e o motor (M).

A planta gera 1.052,91 kW de potência elétrica bruta (pg). As demandas auxiliares são: 27,21 kW para os ventiladores do gerador de vapor (pgv), 14,30 kW para o motor da bomba (pm) e 200 kW para as bombas e outros auxiliares da unidade de dessalinização (pud).

Figura 2. Fluxograma da Planta Dual.



Fonte: elaboração própria.

A Tabela 1 mostra os parâmetros dos fluxos que representam o fluido de trabalho. Os outros fluxos do sistema são: água bruta do mar (ab), a salmoura rejeitada ao mar (s), ar de combustão (ac) e os gases de exaustão (ge).

Tabela 1. Parâmetros dos fluxos do sistema.

i	m (kg/s)	T (°C)	p (bar)
1	3,194	330	25
2	3,194	136	2
3	3,194	60,2	1,013
4	3,194	60,7	26,01

Fonte: elaboração própria.

No ponto de projeto, a planta produz 811,40 kW de potência elétrica líquida (pl) e 2.400 m<sup>3</sup>/dia de água dessalinizada (ad), consumindo 10.480,31 kW exergéticos de gás natural (gn) e emitindo 2.032,72 kg/h de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

### 3.2 Modelagem para alocação de CO<sub>2</sub>

Conhecendo o diagrama termoeconômico, o modelo matemático para alocação é formulado usando a Equação (14):

(14)

$$\lambda_{ad} \cdot Q_{ad} + \sum (\lambda_{sai} \cdot Y_{sai}) - \sum (\lambda_{ent} \cdot Y_{ent}) = M_{CO_2}$$

onde  $\lambda$  são incógnitas que representam emissões de CO<sub>2</sub> específicas (kg/kWh) devido à produção de uma unidade de um determinado fluxo. Y representam os já conhecidos fluxos internos e produtos em base energética ou exergética (kW).

No caso específico de planta dual, um dos produtos pode não ser calculado em termos energéticos ou exergéticos (como é o caso da água dessalinizada). Sendo assim, a Equação (14) inclui a variável  $Q_{ad}$  que representa a vazão volumétrica de água dessalinizada (em m<sup>3</sup>/h) para obter a sua emissão específica ( $\lambda_{ad}$ ) em kg/m<sup>3</sup>, uma vez que a emissão total de CO<sub>2</sub> ( $M_{CO_2}$ ) é dada em kg/h.

### 3.3 Diagramas termoeconômicos

A Tabela 2 mostra a definição de insumo e produto dos sistemas e subsistemas. A interconexão entre sistemas e subsistemas está representada por meio de diagramas nas Figuras 3 a 5.

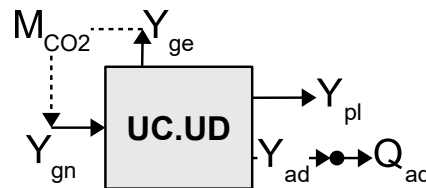
**Tabela 2.** Definição de Insumo e Produto dos Sistemas e Subsistemas usando Fluxos Físicos e Produtivos.

Sistemas e Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
Gerador de Vapor (GV)	$Y_{gn} + Y_{pgv}$	$Y_{gn} + Y_{pgv}$	$Y_1 - Y_4$	$Y_{1:4}$
Bomba e Motor (BM)	$Y_{pm}$	$Y_{pm}$	$Y_4 - Y_3$	$Y_{4:3}$
Turbina e Gerador (TG)	$Y_1 - Y_2$	$Y_{1:2}$	$Y_{pg}$	$Y_{pg}$
Unidade de Cogeração (UC)	$Y_{gn}$	$Y_{gn}$	$Y_2 - Y_3 + Y_{pud} + Y_{pl}$	$Y_{2:3} + Y_{pud} + Y_{pl}$
Unidade de Dessalinização (UD)	$Y_2 - Y_3 + Y_{pud}$	$Y_{2:3} + Y_{pud}$	$Y_{ad} \text{ ou } Y_{ad}$	$Y_{ad} \text{ ou } Q_{ad}$
Planta Dual (UC.UD)	$Y_{gn}$	$Y_{gn}$	$Y_{pl} + Q_{ad}$	$Y_{pl} + Q_{ad}$

Fonte: elaboração própria.

Algumas figuras são baseadas no diagrama físico (Figuras 3, 4a e 5a), e outras são formuladas usando diagrama produtivo (Figuras 3, 4b e 5b). A Figura 3 mostra o diagrama termoeconômico de Nível 1 usado na ACV para alocação em base energética (N1.D.En) e também em base exergética (N1.D.Ex), dependendo da base de cálculo usado para os fluxos internos e produtos (Y).

**Figura 3.** Diagrama Termoeconômico do Primeiro Nível (N1.D).

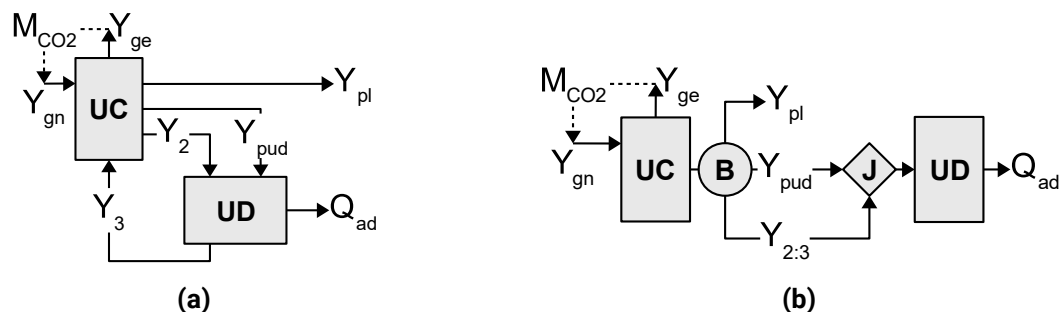


Fonte: elaboração própria.

Neste caso, a água dessalinizada precisa também ser calculada em base energética e exergética devido a uma das regras para formulação de equações auxiliares que atribui a mesma emissão específica para ambos produtos. A emissão de  $CO_2$  dos gases (ge) é alocada para o combustível (gn).

As Figuras 4a e 4b representam diagramas termoeconômicos físicos e produtivos de Nível 2, respectivamente, ambos usados para alocação em base energética (N2.DF.En e N2.DP.En) e exergética (N2.DF.Ex e N2.DP.Ex). Há uma separação entre a unidade de cogeração (UC) e a de dessalinização (UD). Pela regra do produto, três dos fluxos ( $Y_{pl}$ ,  $Y_{pud}$  e  $Y_2$ ) tem a mesma emissão específica e, pela regra do insumo, dois deles ( $Y_2$  e  $Y_3$ ) também tem a mesma emissão específica. Os fluxos que saem da bifurcação (B) tem a mesma emissão específica ( $Y_{pl}$ ,  $Y_{pud}$  e  $Y_{2:3}$ ).

**Figura 4.** Diagramas Termoeconômicos do Segundo Nível (N2).

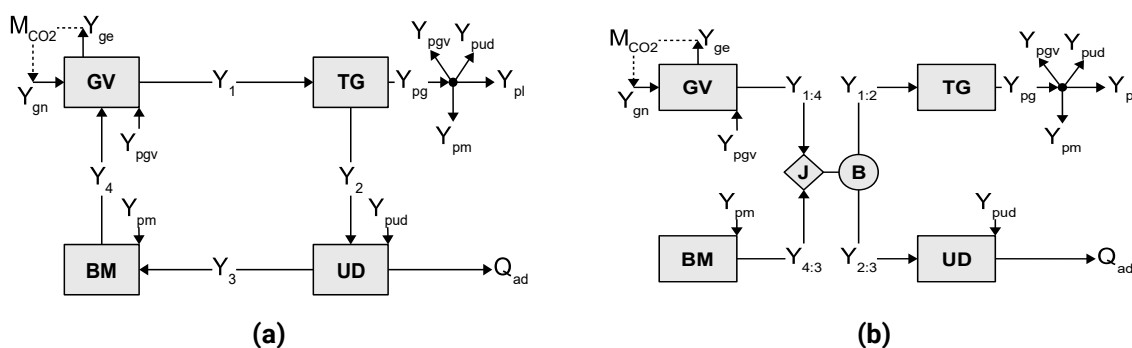


(a) Físico (DF) e (b) Produtivo (DP). Fonte: elaboração própria.

Analogamente, as Figuras 5a e 5b são diagramas termoeconômicos físicos e produtivos para o Nível 3 de desagregação, respectivamente, usados para alocação em base energética (N3.DF.En e N3.DP.En) e exergética (N3.DF.Ex e N3.DP.Ex).

Nas Figuras 5a e 5b aparecem quatro subsistemas porque a bomba e o motor (BM) e também a turbina e o gerador (TG) formam dois subsistemas, respectivamente. Pela regra do produto, todas as potências (pg, pl, pud pgv e pm) tem a mesma emissão específica e os fluxos que saem da bifurcação (B) tem também a mesma emissão específica (Y<sub>1:2</sub> e Y<sub>2:3</sub>). Pela regra do insumo, três fluxos (1, 2 e 3) também tem a mesma emissão específica.

**Figura 5.** Diagrama Termoeconômico do Terceiro Nível (N3).



(a) Físico (DF) e (b) Produtivo (DP). Fonte: elaboração própria.

Em qualquer sistema com dois produtos, conhecendo o encargo total a ser alocado aos dois produtos finais, independentemente do método de alocação a ser utilizado, o resultado é sempre um par ordenado pertencente a uma reta solução geral do dado problema de alocação. A linha reta pode ser representada pela Equação (15):

(15)

$$\lambda_{pl} = -\frac{Q_{ad}}{Y_{pl}} \cdot \lambda_{ad} + \frac{Y_{gn}}{Y_{pl}} \cdot \lambda_{gn}$$

Portanto, há uma correlação entre as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à eletricidade (λ<sub>pl</sub>) e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à água dessalinizada (λ<sub>ad</sub>).

Outros níveis de maior desagregação poderiam ser propostos, porém estes seriam desnecessários, uma vez que estariam compostos por equipamentos que trabalham em série para um único produto, como por exemplo, motor e bomba, turbina e gerador ou os componentes da unidade de dessalinização.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os métodos tradicionalmente aplicados à alocação de emissões em estudos de ACV, a alocação com base na energia não considera a qualidade da energia (seu real valor) e assim avalia igualmente a eletricidade e o calor. Já para o método baseado na exergia, ainda que as emissões por unidade de exergia fossem iguais para a eletricidade e o calor, o processo de formação dos produtos não foi considerado. Para a alocação de emissões com base no rateio marginalista, e com base nas emissões compartilhadas, os resultados dependem fortemente na eficiência da planta de referência. A escolha desses métodos pode alcançar resultados muito diferentes, podendo levar os consumidores de calor ou eletricidade a erroneamente acreditarem que estão consumindo produtos com menor teor de carbono do que em alternativas de produção por separado. Os métodos tradicionalmente aplicados em estudos de ACV penalizam a produção de calor em comparação com os resultados obtidos pelas abordagens termoeconômicas (Santos et al. 2016; Silva et al. 2017). Isso causa o excesso de emissões para os produtos que utilizam calor, privilegiando os produtos dependentes em eletricidade com baixas emissões.

No caso de Karlsson et al. (2018), verificou-se que os resultados da alocação de custos para um sistema de cogeração de distrito na Suécia foram mais adequados quando se usou o valor econômico de mercado como critério de reparto. Isso ocorreu porque o calor é a forma de energia mais valorizada na Suécia, para fins de conforto térmico, e dessa forma os consumidores obtiveram custos mais baixos que o da produção em separado.

A Tabela 3 mostra os fluxos dos diagramas termoeconômicos, físicos (DF) e produtivos (DP), seus valores e respectivas emissões específicas de CO<sub>2</sub> obtidos todos em base energética (En), para os três diferentes níveis (N1, N2 e N3).

A Tabela 4 mostra os fluxos dos diagramas termoeconômicos, físicos (DF) e produtivos (DP), seus valores e respectivas emissões específicas de CO<sub>2</sub> obtidos todos em base exérgica (Ex), para os três diferentes níveis (N1, N2 e N3).

**Tabela 3.** Fluxos dos Diagramas Termoeconômicos e suas Emissões Específicas de CO2 alocadas em Base Energética.

Fluxo	Valor (kW)	Emissões Específicas (g/kWh)				
		N1.D.En	N2.DF.En	N2.DP.En	N3.DF.En	N3.DP.En
$Y_1$	9.840,04	-	-	-	226,06	-
$Y_2$	8.751,37	-	226,93	-	226,06	-
$Y_3$	805,16	-	226,93	-	226,06	-
$Y_4$	818,54	-	-	-	226,45	-
$Y_{1:4}$	9.021,51	-	-	-	-	226,02
$Y_{1:2}$	1.088,67	-	-	-	-	226,06
$Y_{2:3}$	7.946,21	-	-	226,93	-	226,06
$Y_{4:3}$	13,37	-	-	-	-	249,94
$Y_{pg}$	1.052,90	-	-	-	233,74	233,74
$Y_{pl}$	811,40	371,79	226,93	226,93	233,74	233,74
$Y_{pud}$	200,00	-	226,93	226,93	233,74	233,74
$Y_{pgv}$	27,20	-	-	-	233,74	233,74
$Y_{pm}$	14,30	-	-	-	233,74	233,74
$Y_{ad}$	4.656,04	371,79	-	-	-	-
$Q_{ad}$	**100,00	*17.310,51	*18.485,91	*18.485,91	*18.430,62	*18.430,62

\*\*( $m^3/h$ ); \*( $g/m^3$ ). Fonte: elaboração própria.

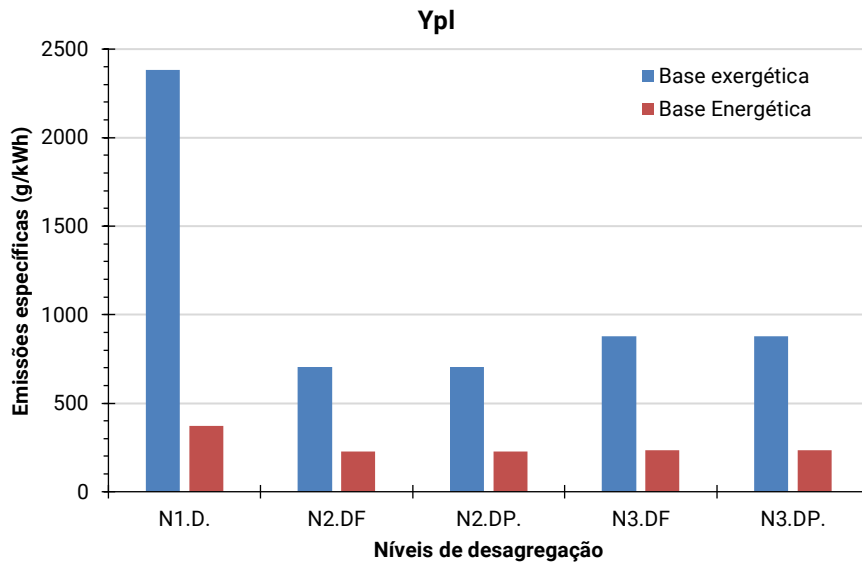
**Tabela 4.** Fluxos dos Diagramas Termoeconômicos e suas Emissões Específicas de CO2 alocadas em Base Exergética.

Fluxo	Valor (kW)	Emissões Específicas (g/kWh)				
		N1.D.Ex	N2.DF.Ex	N2.DP.Ex	N3.DF.Ex	N3.DP.Ex
$Y_1$	3.410,45	-	-	-	611,32	-
$Y_2$	1.899,03	-	704,66	-	611,32	-
$Y_3$	25,75	-	704,66	-	611,32	-
$Y_4$	34,42	-	-	-	821,83	-
$Y_{1:4}$	3.376,03	-	-	-	-	609,17
$Y_{1:2}$	1.511,42	-	-	-	-	611,32
$Y_{2:3}$	1.873,28	-	-	704,66	-	611,32
$Y_{4:3}$	8,67	-	-	-	-	1446,60
$Y_{pg}$	1.052,90	-	-	-	877,54	877,54
$Y_{pl}$	811,40	2380,82	704,66	704,66	877,54	877,54
$Y_{pud}$	200,00	-	704,66	704,66	877,54	877,54
$Y_{pgv}$	27,20	-	-	-	877,54	877,54
$Y_{pm}$	14,30	-	-	-	877,54	877,54
$Y_{ad}$	42,39	2380,82	-	-	-	-
$Q_{ad}$	**100,00	*1.009,25	*14.609,59	*14.609,59	*13.206,85	*13.206,85

\*\*( $m^3/h$ ); \*( $g/m^3$ ). Fonte: elaboração própria.

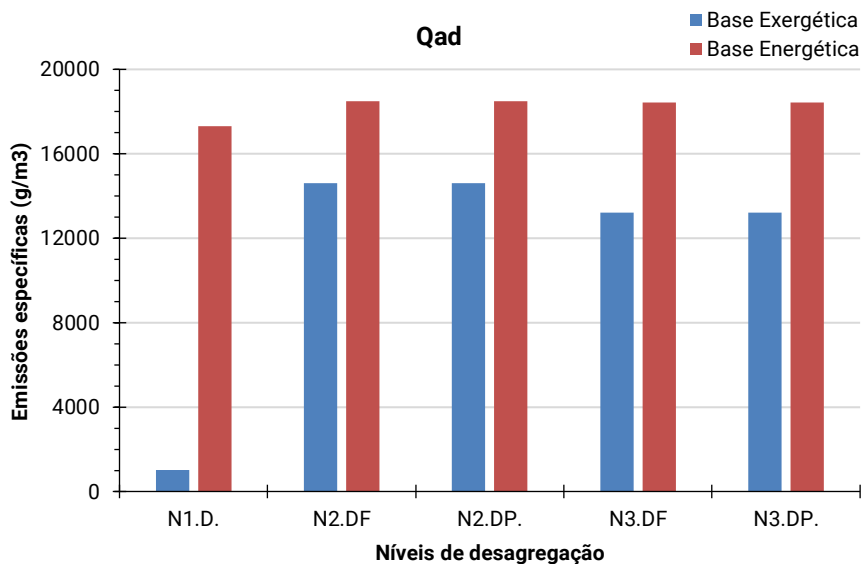
A alocação de emissões de CO<sub>2</sub> para a potência líquida e a água dessalinizada é apresentada nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Nelas se compara o valor das emissões para vários níveis de agregação e para dois critérios de alocação: base energética e base exergética.

**Figura 6.** Valor das emissões específicas para a potência líquida produzida.



Fonte: elaboração própria.

**Figura 7.** Valor das emissões específicas para a água dessalinizada produzida.



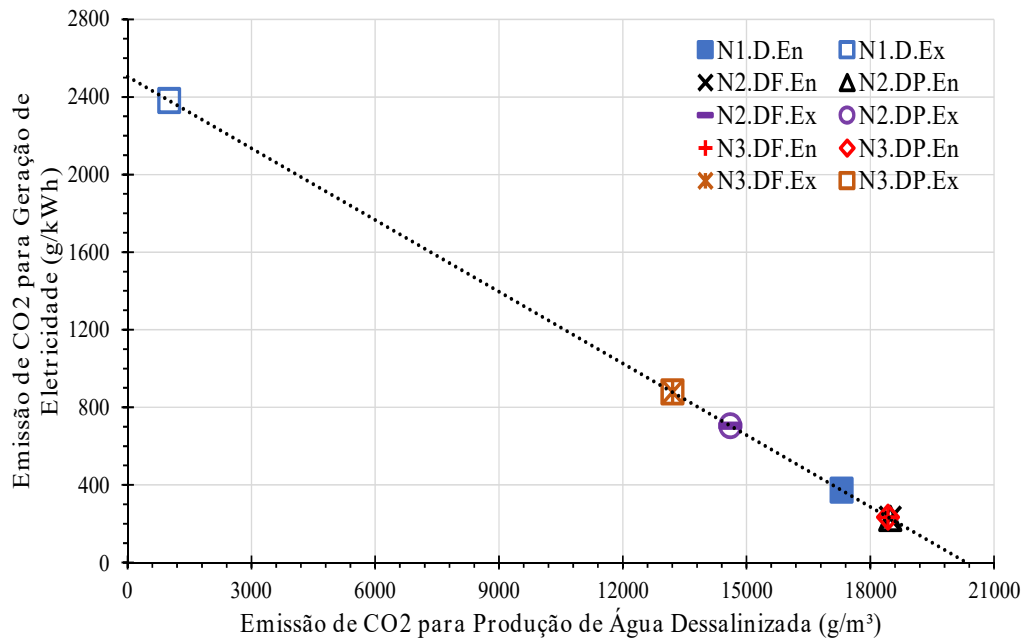
Fonte: elaboração própria.

A Figura 8 compara as emissões específicas de CO<sub>2</sub> para os dois produtos finais da planta dual, potência elétrica líquida ( $Y_{pl}$ ) e água dessalinizada ( $Q_{ad}$ ), em função da magnitude termodinâmica



(En e Ex), do diagrama termoeconômico (DF e DP) e do nível de desagregação do sistema em subsistemas (N1, N2 e N3).

**Figura 8.** Comparação das Emissões Específicas de CO<sub>2</sub> para a Eletricidade e Água Dessalinização na Reta Solução.



Fonte: elaboração própria.

A Figura 8 mostra que, apesar de todos os resultados estarem na reta solução, existem métodos que sobrecarregam um produto em detrimento do outro. Independentemente do nível de desagregação e do tipo de diagrama usado para alocação, a energia como base de alocação acaba sobrecarregando a água dessalinizada em detrimento da eletricidade líquida, quando comparado com a alocação em base exérgica. Isto já era esperado porque a energia supervaloriza o calor (vapor) que é o insumo majoritário da unidade de dessalinização. Além disso, a termodinâmica já nos diz que, em sistemas energéticos, equivalência entre fluxos de naturezas distintas deve ser estabelecida com base nas suas exergias.

Quando avaliando somente En e Ex, observa-se que o valor mais alto de emissões associadas a eletricidade foi obtido pelo diagrama de primeiro nível com exergia (N1.D.Ex), com 2380 g/kWh. A água dessalinizada obteve o valor mais baixo de emissões com 1009 g/m<sup>3</sup>. Considerando um diagrama de segundo nível com energia (N2.DF.En e N2.DP.En), obteve-se o valor mais baixo para as emissões associadas a eletricidade (226 g/kWh) e o valor mais alto para emissões associadas a água dessalinizada (18.485 g/m<sup>3</sup>). Portanto, em função da magnitude

termodinâmica, há variações de  $\pm 90\%$  nas emissões de CO<sub>2</sub> para eletricidade e de  $\pm 95\%$  nas emissões para água dessalinizada.

Os diagramas de terceiro nível com exergia (N3.DF.Ex e N3.DP.Ex) obtiveram emissões de CO<sub>2</sub> iguais a 877 g/kWh e 13.206 g/m<sup>3</sup> para eletricidade e água dessalinizada, respectivamente. Isso representa uma redução de 37% nas emissões associadas a eletricidade e um aumento de 1309% nas emissões da água dessalinizada, em relação a N1.D.Ex. Quando comparado a N2.DF.En e N2.DP.En, há um aumento de 387% nas emissões associadas a eletricidade e uma redução de 71% nas emissões da água dessalinizada. Observa-se que ao comparar os diagramas de terceiro nível para exergia e energia, as emissões possuem variações de 73% e 28% para eletricidade e água dessalinizada, respectivamente.

Quanto ao tipo de diagrama termoeconômico, para o mesmo nível de desagregação e magnitude termodinâmica, independente de usar diagrama físico ou produtivo, os resultados da alocação dos encargos para os produtos finais são coincidentes. De certa forma, isto já era esperado uma vez que é hoje sabido que, em termoeconomia, não havendo discrepância na definição de insumos e produtos e nem nas interconexões dos subsistemas, os encargos alocados a cada um dos produtos finais serão os mesmos. Neste caso, as arbitrariedades poderiam afetar os métodos que usam o diagrama produtivo uma vez que as interconexões não se estabelecem mantendo a configuração física da planta.

Finalmente, quanto aos níveis de desagregação da planta dual em seus subsistemas, pode ser intuitivo afirmar que, quanto mais desagregado mais preciso é o resultado. Neste caso, os diagramas do terceiro nível com exergia (N3.DF.Ex e N3.DP.Ex) seriam os que fornecem os resultados mais precisos. Porém, há sempre um nível adequado de desagregação. Mesmo usando a exergia como critério de alocação, o tratamento da planta como um único sistema (N1.D.Ex), procedimento comumente usado para alocação na ACV, acabou sobrecarregando demais a potência elétrica líquida em detrimento da água dessalinizada. Em outras palavras, o resultado depende do nível da desagregação da exergia; nível da decomposição dos subsistemas que formam o sistema, e modelo termodinâmico adotado (e.g., combustão completa, ar padrão frio). Assim quanto mais detalhado o processo de formação de custo, mais informação possui, logo tem-se um valor mais preciso. Diferentemente dos níveis N1 e N2 em que alguns subsistemas foram unidos.

O trabalho de Salehi et al. (2020) verificou o retorno energético do investimento<sup>1</sup> (*Energy Return on Investment, EROI*) em sistemas energéticos multiproduto, e concluiu após uma análise detalhada que um sistema desagregado proporciona resultados mais adequados na distribuição dos custos. A alocação do investimento energético com base na exergia foi identificado como um *benchmark* eficaz para a avaliação do EROI já que incorpora detalhes do processo produtivo e pode rastrear o processo de formação de custos ao longo do sistema (custos monetários ou impactos ambientais). Os resultados aqui apresentados corroboram também as conclusões de Paulillo et al. (2019), que demonstram que a escolha de um método para alocação é uma etapa crucial e enfatizam a importância de normatizar o procedimento de alocação em ACV. Assim como foi feito aqui, diferentes estratégias foram empregadas para quantificar uma faixa de valores de impactos ambientais associados às saídas energéticas de um sistema.

As diferenças entre os métodos termoeconômicos dependem do tipo de sistema analisado, sendo extremamente importante compreender por que estas diferenças ocorrem. A variação presente nos métodos termoeconômicos é devida a pequenas divergências com relação à função termodinâmica de cada componente (estrutura produtiva) e critério de alocação utilizado para definir as emissões ou custos associados a cada saída dos componentes. Portanto, a arbitrariedade é menor e menos impactante do que nos métodos tradicionalmente usados em ACV.

## 5. CONCLUSÕES

Os métodos termoeconômicos de avaliação de custos e sua progressão pelas etapas do processo produtivo permitem a alocação de custos e impactos, minimizando o grau de subjetividade. Contudo, os métodos não-termoeconômicos (tradicionalmente empregados em ACV) permanecem como uma possibilidade em determinadas condições específicas não relacionadas à termodinâmica e à economia (e.g., a importância social ou a intenção de recuperar regiões em risco de desaparecimento ou afetação devido a várias causas naturais ou artificiais).

A aplicação de diferentes métodos de alocação de custos não-termoeconômicos no caso de plantas duais (baseadas inteiramente nos benefícios termodinâmicos e ambientais dos esquemas de cogeração) produzem diferentes padrões de distribuição de custos e emissões entre os produtos, no caso de estudo, energia elétrica e água dessalinizada. Esta distribuição subsidia ou penaliza um ou outro produto com base em critérios que perdem a racionalidade em maior ou menor grau, diferentemente do método termoeconômico. Este método é essencialmente baseado em um grau

---

<sup>1</sup> Quantidade de energia produzida pelo sistema dividida pela quantidade de energia utilizada em sua obtenção.

variável e mensurável de economia de combustível relativa que reflete objetivamente sobre si os benefícios econômicos e o efeito de proteção ambiental da redução da energia primária em comparação à produção separada.

As reflexões sobre a alocação de custos e impactos ambientais em sistemas energéticos multiprodutos permitem concluir que produtos tangíveis, que podem ser avaliados de maneira objetiva (exergética), são prioritariamente afetados, recebendo alocações proporcionais a sua exergia ou dos recursos consumidos. Ao contrário, os produtos intangíveis, deverão receber uma alocação convencional de custos e impactos, obtida com ajuda de especialistas em comparação ao produto principal.

Os resultados mostram que tanto os critérios de alocação como a desagregação do sistema influenciam nos resultados. Neste ponto, diferente dos métodos comumente empregados em ACV, a termoeconomia apresenta vantagens devido à desagregação do sistema e uso de critérios de alocação racionais com base nas leis da termodinâmica. Assim, a termoeconomia deveria ser usada para alocação na ACV sempre que a planta em estudo envolver sistemas energéticos multiprodutos e também quando os produtos não-energéticos possam ser expressos racionalmente por meio de custos exergéticos.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINI, Alessandro, GIUNTOLI, Jacopo, MARELLI, Luisa e AMADUCCI, Stefano, 2020. Flaws in the interpretation phase of bioenergy LCA fuel the debate and mislead policymakers. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [em linha]. 1 janeiro 2020. vol. 25, no. 1, p. 17–35. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1007/s11367-019-01654-2](https://doi.org/10.1007/s11367-019-01654-2). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01654-2>
- ALDRICH, Remei, LLAURÓ, F. Xavier, PUIG, Josep, MUTJÉ, Pere e PÈLACH, M. Àngels, 2011. Allocation of GHG emissions in combined heat and power systems: a new proposal for considering inefficiencies of the system. *Journal of Cleaner Production* [em linha]. 1 junho 2011. vol. 19, no. 9, p. 1072–1079. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/j.jclepro.2011.02.014](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.014). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611000722>
- CARVALHO, Monica, LOZANO, Miguel A., SERRA, Luis M. e WOHLGEMUTH, Volker, 2012. Modeling simple trigeneration systems for the distribution of environmental loads. *Environmental Modelling & Software* [em linha]. 1 abril 2012. vol. 30, p. 71–80. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/j.envsoft.2011.11.005](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.005). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481521100260X>
- CURRAN, Mary, 2007. Co-product and input allocation approaches for creating life cycle inventory data: A literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 agosto 2007. vol. 12, p. 65–78. DOI [10.1065/lca2006.08.268](https://doi.org/10.1065/lca2006.08.268).
- EKVALL, Tomas, 2020. Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. Em: *Sustainability Assessment at the 21st century* [em linha]. IntechOpen. [Acesso em 4 julho 2020]. ISBN 978-1-78984-976-9. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/sustainability-assessment-at-the-21st-century/attributional-and-consequential-life-cycle-assessment>

- EL-NASHAR, Ali M., 2001. Cogeneration for power and desalination – state of the art review. *Desalination* [em linha]. 20 abril 2001. vol. 134, no. 1, p. 7–28. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/S0011-9164\(01\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00111-4). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916401001114>
- ERLACH, Berit, SERRA, Luis e VALERO, Antonio, 1999. Structural theory as standard for thermoeconomics. *Energy Conversion and Management* [em linha]. 1 outubro 1999. vol. 40, no. 15, p. 1627–1649. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/S0196-8904\(99\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00057-6). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499000576>
- FRANGOPOULOS, Christos A., 1987. Thermo-economic functional analysis and optimization. *Energy* [em linha]. 1 julho 1987. vol. 12, no. 7, p. 563–571. [Acesso em 6 julho 2020]. DOI [10.1016/0360-5442\(87\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0360-5442(87)90097-1). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360544287900971>
- GORDILLO, Victor, RANKOVIC, Nicolas e ABDUL-MANAN, Amir F.N., 2018. Customizing CO2 allocation using a new non-iterative method to reflect operational constraints in complex EU refineries. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [em linha]. 1 agosto 2018. vol. 23, no. 8, p. 1527–1541. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1007/s11367-017-1380-1](https://doi.org/10.1007/s11367-017-1380-1). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1380-1>
- HANES, Rebecca J., CRUZE, Nathan B., GOEL, Prem K. e BAKSHI, Bhavik R., 2015. Allocation Games: Addressing the Ill-Posed Nature of Allocation in Life-Cycle Inventories. *Environmental Science & Technology* [em linha]. 7 julho 2015. vol. 49, no. 13, p. 7996–8003. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1021/acs.est.5b01192](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01192)
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION, 2006. *ISO 14044:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines* [em linha]. Geneva, CH: ISO. [Acesso em 11 fevereiro 2020]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- KARLSSON, Johan, BRUNZELL, Lena e VENKATESH, G., 2018. Material-flow analysis, energy analysis, and partial environmental-LCA of a district-heating combined heat and power plant in Sweden. *Energy* [em linha]. 1 fevereiro 2018. vol. 144, p. 31–40. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/j.energy.2017.11.159](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.159). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217320170>
- LAZZARETTO, Andrea e TSATSARONIS, George, 2006. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy* [em linha]. 1 julho 2006. vol. 31, no. 8, p. 1257–1289. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/j.energy.2005.03.011](https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544205000630>
- LOZANO, Manuel Angel, CARVALHO, Monica e SERRA, Luis M., 2014. Tackling environmental impacts in simple trigeneration systems operating under variable conditions. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [em linha]. 1 maio 2014. vol. 19, no. 5, p. 1087–1098. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1007/s11367-014-0719-0](https://doi.org/10.1007/s11367-014-0719-0). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0719-0>
- LOZANO, Miguel e VALERO, Antonio, 1993. Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems. Em: *Thermodynamics and the design analysis and improvement of energy systems*. New York, NY: ASME Book. p. 311–320. ISBN 978-0-7918-1042-2.
- LUO, Lin, VAN DER VOET, Ester, HUPPES, Gjalt e UDO DE HAES, Helias A., 2009. Allocation issues in LCA methodology: a case study of corn stover-based fuel ethanol. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [em linha]. 1 setembro 2009. vol. 14, no. 6, p. 529–539. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1007/s11367-009-0112-6](https://doi.org/10.1007/s11367-009-0112-6). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0112-6>
- MACKENZIE, Stephen G., LEINONEN, Ilkka e KYRIAZAKIS, Ilias, 2017. The need for co-product allocation in the life cycle assessment of agricultural systems—is “biophysical” allocation progress? *The International Journal of Life Cycle Assessment* [em linha]. 1 fevereiro 2017. vol. 22, no. 2, p. 128–137. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1007/s11367-016-1161-2](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1161-2). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1161-2>
- MAJEAU-BETTEZ, Guillaume, DANDRES, Thomas, PAULIUK, Stefan, WOOD, Richard, HERTWICH, Edgar, SAMSON, Réjean e STRØMMAN, Anders Hammer, 2018. Choice of Allocations and Constructs for Attributional or Consequential Life Cycle Assessment and Input-Output Analysis. *Journal of Industrial Ecology* [em linha]. 2018. vol. 22, no. 4, p. 656–670. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1111/jiec.12604](https://doi.org/10.1111/jiec.12604). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12604>

- NOUSSAN, Michel, 2018. Allocation factors in Combined Heat and Power systems – Comparison of different methods in real applications. *Energy Conversion and Management* [em linha]. 1 outubro 2018. vol. 173, p. 516–526. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/j.enconman.2018.07.103](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.103). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418308446>
- PAULILLO, Andrea, STRIOLO, Aberto e LETTIERI, Paola, 2019. The environmental impacts and the carbon intensity of geothermal energy: A case study on the Hellisheiði plant. *Environment International* [em linha]. 1 dezembro 2019. vol. 133, p. 105226. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1016/j.envint.2019.105226](https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105226). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019318689>
- PELLETIER, Nathan, ARDENTE, Fulvio, BRANDÃO, Miguel, CAMILLIS, Camillo de e PENNINGTON, David, 2015. Rationales for and limitations of preferred solutions for multi-functionality problems in LCA: is increased consistency possible? *The International Journal of Life Cycle Assessment* [em linha]. 1 janeiro 2015. vol. 20, no. 1, p. 74–86. [Acesso em 4 julho 2020]. DOI [10.1007/s11367-014-0812-4](https://doi.org/10.1007/s11367-014-0812-4). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0812-4>
- RAMÍREZ, Paola Karina Sánchez, 2009. *Análise de métodos de alocação utilizados em avaliação do ciclo de vida* [em linha]. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Florianópolis, SC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. [Acesso em 4 julho 2020]. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93144>
- REHBERGER, Max e HIETE, Michael, 2019. Allocation Procedures for Generic Cascade Use Cases - An Evaluation Using Monte Carlo Analysis. Em: *Materials Science Forum* [em linha]. Zurich: Trans Tech. 2019. p. 32–45. [Acesso em 6 julho 2020]. ISBN 9783035712803. Disponível em: [MSF.959.32](https://doi.org/10.1007/978-3-03-571280-3_32)
- ROSEN, Marc A., 2008. A concise review of exergy-based economic methods. Em: *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS international conference on Energy & environment*. Cambridge, UK: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). 23 fevereiro 2008. p. 136–144. EE'08. ISBN 978-960-6766-43-5.
- SANTOS, Rodrigo G. dos, FARIA, Pedro R. de, SANTOS, José J. C. S., SILVA, Julio A. M. da e FLÓREZ-ORREGO, Daniel, 2016. Thermo-economic modeling for CO<sub>2</sub> allocation in steam and gas turbine cogeneration systems. *Energy* [em linha]. 15 dezembro 2016. vol. 117, p. 590–603. [Acesso em 6 julho 2020]. DOI [10.1016/j.energy.2016.04.019](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.019)
- SANTOS, José, MARCO, Nascimento, LORA, Electo e REYES, Arnaldo, 2009. On the Negentropy Application in Thermo-economics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? *International Journal of Thermodynamics*. 1 dezembro 2009. vol. 12. DOI [10.5541/ijot.254](https://doi.org/10.5541/ijot.254).
- SCHRIJVERS, Dieuwertje L., LOUBET, Philippe e SONNEMANN, Guido, 2016. Critical review of guidelines against a systematic framework with regard to consistency on allocation procedures for recycling in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [em linha]. 1 julho 2016. vol. 21, no. 7, p. 994–1008. [Acesso em 6 julho 2020]. DOI [10.1007/s11367-016-1069-x](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1069-x). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1069-x>
- SILVA, Julio Augusto Mendes da, SANTOS, José Joaquim Conceição Soares, CARVALHO, Monica e OLIVEIRA, Silvio de, 2017. On the thermo-economic and LCA methods for waste and fuel allocation in multiproduct systems. *Energy* [em linha]. 15 maio 2017. vol. 127, p. 775–785. [Acesso em 6 julho 2020]. DOI [10.1016/j.energy.2017.03.147](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.147). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217305406>
- TERESHCHENKO, Tymofii e NORD, Natasa, 2015. Uncertainty of the allocation factors of heat and electricity production of combined cycle power plant. *Applied Thermal Engineering* [em linha]. 5 fevereiro 2015. vol. 76, p. 410–422. [Acesso em 6 julho 2020]. DOI [10.1016/j.applthermaleng.2014.11.019](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.019). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114010175>
- TIMONEN, Karettä, SINKKO, Taija, LUOSTARINEN, Sari, TAMPIO, Elina e JOENSUU, Katri, 2019. LCA of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate. *Journal of Cleaner Production* [em linha]. 20 outubro 2019. vol. 235, p. 1567–1579. [Acesso em 6 julho 2020]. DOI [10.1016/j.jclepro.2019.06.085](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.085). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619320402>
- VALERO, A., SERRA, L. e UCHE, J., 2006. Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermo-economics. Part I: Theory. *Journal of Energy Resources Technology* [em linha]. 1 março 2006. vol. 128, no. 1, p. 1–8. [Acesso em 6 julho 2020]. DOI [10.1115/1.2134732](https://doi.org/10.1115/1.2134732)

## APÊNDICE A – LISTA DE VARIÁVEIS

Símbolo	Nome	Unidade
$ad$	Vazão volumétrica de água dessalinizada produzida	m <sup>3</sup> /dia
$B$	Exergia	kW
$c$	Custo monetário unitário	\$/kWh; \$/m <sup>3</sup>
$c_F$	Custo de mercado para a exergia do recurso externo	\$/kWh
$E$	Emissões	kW
$f$	Fração correspondente às emissões de recursos	-
$F$	Recurso externo do sistema	kW
$gn$	Exergia do gás natural	kW
$k$	Custo exergético unitário	kJ/kJ
$m$	Vazão mássica	kg/s
$M_{CO_2}$	Emissão total de CO <sub>2</sub>	kg/h
$P$	Potência	kW
$p$	Pressão	bar
$pb$	Potência da bomba	kW
$pg$	Potência elétrica bruta	kW
$pgv$	Demanda de potência - ventiladores do gerador de vapor	kW
$pl$	Potência elétrica líquida produzida	kW
$P_{NP}$	Potência líquida	kW
$pud$	Demanda de potência - bombas e outros auxiliares da unidade de dessalinização	kW
$Q_{ad}$	Vazão volumétrica de água dessalinizada	m <sup>3</sup> /h
$Q_F$	Consumo da exergia do recurso externo do sistema	kW
$Q_U$	Calor útil ou aproveitado	kW
$R$	Recurso energético	kW
$T$	Temperatura	°C
$Y$	Fluxo produtivo genérico	kW
$Z$	Custo externo por unidade de tempo para o sub-sistema	\$/ano
$\eta$	Eficiência	-
$\lambda$	Emissão específica	kg/kWh; kg/m <sup>3</sup>

## APÊNDICE B – SUBÍNDICES

<i>ad</i>	Água dessalinizada
<i>caldeira</i>	Referente à caldeira
<i>F</i>	Referente ao recurso externo do sistema
<i>ge</i>	Gases de exaustão
<i>gn</i>	Gás natural
<i>out</i>	Saída
<i>pgv</i>	Ventiladores do gerador de vapor
<i>pl</i>	Potência líquida
<i>pm</i>	Motor da bomba
<i>PNP</i>	Referente à potência líquida
<i>PP</i>	Para produzir produtos
<i>pud</i>	Auxiliares da unidade de dessalinização
<i>QU</i>	Referente ao calor útil
<i>redeelétrica</i>	Referente à rede elétrica
<i>u</i>	Útil



**APÊNDICE C – ABREVIATURAS**

aa	Água de Alimentação
ab	Água bruta do mar
ac	Ar de combustão
B	Bomba
BM	Bomba e Motor
DF	Diagrama físico
DP	Diagrama produtivo
En	Base energética
Ex	Base exergética
G	Gerador elétrico
ge	Gases de exaustão
GV	Gerador de vapor
M	Motor
N1, N2 e N3	Níveis de desagregação
s	Salmoura rejeitada ao mar
T	Turbina de vapor
TG	Turbina e Gerador
UC	Unidade de Cogeração
UD	Unidade de dessalinização