

Modelagem Termoeconômica como Ferramenta para Internalização de Créditos de Carbono nas Análises de Sistemas Térmicos

Pedro Rosseto de Faria^{1,2}, Rodrigo Guedes dos Santos^{2,3}, Igor Chaves Belisário³, Marcelo Aiolfi Barone²,
José Joaquim C. S. Santos², Francisco Mello Fonseca²

¹Instituto Federal do Espírito Santos (IFES), Cariacica, Brasil. Email: pedro.faria@ifes.edu.br

²Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Brasil. Email: mabacz@gmail.com, jose.j.santos@ufes.br,
franciscomello@msn.com

³Instituto Federal do Espírito Santos (IFES), Vitória, Brasil. Email: rodrigo.guedes@ifes.edu.br, igor.belisario@ifes.edu.br

Resumo

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) vem aumentando desde 1990. A geração de eletricidade e calor, juntamente com transporte, foram responsáveis por mais de dois terços das emissões em 2018. Como o CO₂ representa o maior percentual dos GEE, o termo carbono passou a ser adotado como sinônimo desses gases nos debates sobre clima. Visando controlar as emissões, o mercado de carbono auxilia países que não conseguem cumprir metas de redução de emissões a comprarem créditos daqueles que reduziram as suas a níveis abaixo do estipulado. A termoeconomia tem papel fundamental nas análises de sistemas térmicos e esse trabalho visa detalhar como a modelagem termoeconômica pode ser utilizada como ferramenta para incluir despesas ou receitas relativas ao mercado de carbono. Além disso, destacar que essa modelagem pode ser utilizada na internalização de outros custos como de dispositivos de controle ambiental, licenças e permissões ambientais.

Palavras chave: modelagem termoeconômica; crédito de carbono; mercado de carbono; custo ambiental.

Abstract

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), greenhouse gas (GHG) emissions have been increasing since 1990. Electricity and heat generation, along with transport, were responsible for more than two-thirds of emissions in 2018. As CO₂ represents the higher percentage of GHGs emissions, the term carbon came to be adopted as a synonym for these gases in climate change debates. In order to control emissions, the carbon market helps industries that fail to meet emission reduction targets to buy credits from those who have reduced theirs below the stipulated levels. Thermoeconomics plays a key role in the analysis of energy conversion systems and this work aims to detail how thermoeconomic modelling can be used as a tool to include expenses or revenues associated with the carbon market. In addition, it highlights how this modelling can be used to internalize other costs such as environmental control devices, licenses and environmental permits.

Keywords: thermoeconomic modelling; carbon credits; carbon prices; environmental costs, carbon market.

1. Introdução

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [1], conhecido pela sigla inglesa IPCC, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) vem aumentando desde a década de 1990. A geração combinada de eletricidade e calor (cogeração), juntamente com o transporte, foram responsáveis por mais de dois terços das emissões em 2018 [2]. Como o CO₂ representa o maior percentual dos GEE, que pode provocar o aquecimento global, o termo carbono passou a ser adotado como um sinônimo desses gases nos debates sobre clima.

Visando controlar as emissões, o mercado de carbono proporciona as indústrias/setores que não conseguem cumprir metas de redução de emissões a possibilidade de comprarem créditos daqueles que reduziram as suas emissões a níveis abaixo do estipulado. Por convenção, um crédito de carbono corresponde a uma tonelada de dióxido de carbono que pode ser considerado como um ativo (financeiro e ambiental) representativo de redução ou remoção de uma tonelada CO₂ equivalente, que tenha sido reconhecido e emitido como crédito no mercado de carbono, seja ele voluntário ou regulado [3].

Este mercado já se encontra regulamentado em alguns países, como na União Europeia que já tem os valores dos créditos bem definidos [4]. Porém, em muitos outros como o Brasil, esse mercado ainda é voluntário. Recentemente, o governo brasileiro publicou um decreto [3] para regulamentar esse mercado e instituir o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SINARE), porém ainda sem prazos definidos para implementação. Segundo relatório do Banco Mundial de 2022 [5], o mercado de carbono está se expandindo em todo o mundo, porém ainda a níveis abaixo do necessário para mitigar problemas ambientais e atender a agenda ambiental assinada no Acordo de Paris contra as ameaças das mudanças climáticas.

A termoeconomia combina conceitos termodinâmicos e econômicos para prover informações indisponíveis em análises energética e econômica convencionais, mas que são fundamentais no projeto e operação de sistemas térmicos [6]. O objetivo original era combinar matematicamente a 2ª Lei da Termodinâmica com a economia. Entretanto, questões ambientais também devem ser incorporadas nessas análises [7]. Em termoeconomia, a exergia, e não a energia, é a magnitude termodinâmica mais adequada a ser utilizada, pois leva em conta aspectos da Segunda Lei da Termodinâmica considerando a qualidade da energia, localizando e quantificando as irreversibilidades do processo [6]. A exergia também é a conexão mais apropriada entre a segunda lei e o impacto ambiental, porque mede o desvio do estado de um sistema em relação ao ambiente [8].

Análises de sistemas térmicos multiprodutos, como é o caso da cogeração em que dois produtos (calor útil e

potência) são gerados de maneira combinada a partir de um único combustível, requerem critérios racionais de distribuição de custo do combustível para os diversos produtos finais. Neste cenário, a Termoeconomia permite uma alocação racional, através da utilização de critérios físicos, de custos monetários, exergéticos e ambientais para os produtos finais. Dessa forma, é possível comparar custos exergéticos [9–11] e/ou ambientais [12,13] de cada um dos produtos com o custo da produção de cada um em sistemas separados. Metodologias termoeconômicas já foram usadas para inclusão de aspectos ambientais, como emissões específicas de CO₂. Entretanto, não foram utilizadas na internalização de custos monetários associados a questões ambientais, como os créditos de carbono, o que vem ao encontro da novidade proposta neste trabalho que é exemplificar a maneira de realizar termoeconomicamente essa internalização.

Diante disso, nota-se que a termoeconomia tem um papel fundamental nas análises de sistemas de conversão de energia, e esse trabalho tem como objetivo principal detalhar como a modelagem termoeconômica pode ser utilizada como ferramenta para incluir as despesas ou receitas relativas ao mercado de carbono em análises de sistemas térmicos e aloca-los aos produtos internos e finais do sistema. A modelagem convencional usada para calcular os custos monetários dos fluxos internos e dos produtos finais pode ser adaptada para levar em conta esses custos ambientais. Essa adaptação é detalhada, em notação matricial, através de um exemplo teórico com um sistema de cogeração com turbina a gás. Mostra-se ainda como essa inclusão pode influenciar nos custos monetários dos produtos finais do sistema. Além disso, destaca-se que essa modelagem pode ser utilizada também para a internalização de outros custos como os de dispositivos de controle ambiental, licenças e permissões ambientais.

Importante ressaltar que a metodologia utilizada para exemplificar e detalhar essa internalização de custos ambientais, caso dos créditos de carbono, define um dispositivo para representar o ambiente nos diagramas termoeconômicos e assim aloca custos ambientais exatamente no dispositivo ambiental. Neste trabalho, o método utilizado é o Modelo H&S, porém qualquer outra metodologia termoeconômica, baseada em exergia, que defina esse dispositivo de forma coerente para representar ambiente pode ser utilizada para conduzir a análise de maneira similar.

2. Modelagem termoeconômica

Além da modelagem convencional utilizada para determinar os custos monetários e exergéticos unitários dos fluxos internos e produtos finais do sistema, essa seção mostra como a modelagem é geralmente adaptada para alocar as emissões específicas de poluentes e detalha ainda como os créditos de carbono podem ser incluídos na modelagem termoeconômica.

2.1. Modelagem convencional

As Equações (1) e (2) são utilizadas para determinar os custos unitários monetário (c) e exergético (k^*), respectivamente, dos fluxos internos e produtos finais do sistema. Através da Equação (3), pode-se realizar a alocação de emissões específicas (λ) de poluentes, como CO₂, NO_x e SO_x. Nessas equações, os subscritos “sai” e “ent” são associados as saídas e entradas dos fluxos, respectivamente. Y representa uma magnitude termodinâmica genérica que pode ser avaliada pela potência, calor, fluxos de exergia ou de suas parcelas. E_C é a exergia do combustível externo e c_C e k_C^* representam seu custo monetário e exergético unitário, respectivamente. λ_C é a quantidade de emissão gerada devido à combustão de uma unidade de exergia do combustível externo. Z , convencionalmente, é o custo horário externo do subsistema devido ao capital operação e manutenção do equipamento.

$$\sum(c_{sai} \cdot Y_{sai}) - \sum(c_{ent} \cdot Y_{ent}) = Z + c_C \cdot E_C \quad (1)$$

$$\sum(k_{sai}^* \cdot Y_{sai}) - \sum(k_{ent}^* \cdot Y_{ent}) = k_C^* \cdot E_C \quad (2)$$

$$\sum(\lambda_{sai} \cdot Y_{sai}) - \sum(\lambda_{ent} \cdot Y_{ent}) = \lambda_C \cdot E_C \quad (3)$$

A Equação (2) é obtida através da Equação (1). Neste caso, o termo Z deve ser zero e o custo unitário exergético da exergia do combustível externo (k_C^*) é geralmente considerado igual à sua exergia, ou seja, custo exergético unitário igual a 1 kW/kW [6].

Os custos unitários monetário e exergético podem ser interpretados como uma medida da eficiência econômica e termodinâmica do processo de produção de um fluxo, respectivamente [6]. Já o balanço representado pela Equação (3) pode ser interpretado como uma medida da eficiência ambiental do processo de produção desse fluxo [13].

Em todos os casos, Equações (1) – (3), geralmente são necessárias equações auxiliares para completar o sistema de equações da modelagem. Essas equações são definidas de acordo com o tipo de diagrama termoeconômico aplicado. No caso dos diagramas produtivos, o critério da igualdade [14] é utilizado. Segundo esse critério, todos os produtos de um subsistema tem o mesmo custo unitário pois foram gerados no mesmo processo produtivo sob as mesmas irreversibilidades. No caso dos diagramas físico ou abrangente [11], utiliza-se as regras do insumo e do produto [15]. A primeira considera que um componente utiliza uma parte da exergia do fluxo de entrada para produzir um dado produto e que a parte restante da exergia do fluxo de entrada tem o mesmo custo unitário do fluxo de entrada. A regra do produto é similar ao critério da igualdade.

2.2. Inclusão de custos monetários de encargos ambientais

A Equação (3) é utilizada para fazer a alocação de emissões específicas para os fluxos internos e produtos finais de sistemas térmicos, ou seja, é uma análise que leva em conta aspectos ambientais na modelagem termoeconômica. Porém, não leva em conta custos monetários associados a questões ambientais, como os créditos de carbono e de aquisição de equipamentos de tratamento/controlado ambiental.

O termo Z (Equação 1) é um ponto chave na alocação de custos ambientais. Em uma avaliação de custo monetário convencional, ele representa o custo horário externo dos subsistemas devido ao capital, operação e manutenção. No entanto, também pode ser usado para alocação de custos ambientais por meio de um dispositivo que represente o ambiente nos diagramas termoeconômicos. Um sistema de conversão de energia pode ser definido como um conjunto de componentes que interagem entre si e com o meio ambiente através de um conjunto de fluxos de matéria, trabalho ou calor [16], ou seja, o ambiente é parte desse sistema. Dessa forma, pode ser representado por um dispositivo ambiental em diagramas termoeconômicos de acordo com alguns modelos.

A Equação (4) mostra como um modelo termoeconômico convencional de custo unitário monetário (Equação 1) pode ser adaptado para decompor o termo (Z) em custos horários devido à encargos ambientais (Z_{amb}) e custos de capital, operação e manutenção (O&M).

$$Z = Z_{cap} + Z_{O\&M} + Z_{amb} \quad (4)$$

O dispositivo ambiental não tem custo de aquisição, mas é através dele que encargos ambientais podem ser internalizados e redistribuídos aos demais equipamentos e aos produtos finais. Por exemplo, ao instalar dispositivos de controle de resíduos em uma planta, como um precipitador eletrostático para eliminação de cinzas em gases de combustão ou um filtro de mangas para controle de poluição do ar, pode-se atribuir os custos associados ao seu capital, O&M ao dispositivo ambiental, uma vez que esses equipamentos tendem a mitigar os impactos ambientais visto que diminuem a quantidade de GEE emitidos na atmosfera.

O mesmo pode ser feito para dispositivos usados na captura e armazenamento de carbono, licenças ambientais, custos de licenciamento, multas por emissão de poluentes e qualquer outro custo de abatimento (custo dos recursos empregados no tratamento ou no descarte adequado de resíduos). Desta forma, aloca-se os encargos ambientais exatamente no dispositivo do diagrama definido para representar o ambiente. Já que o termo Z é sempre associado a algum equipamento, nada melhor que os custos ambientais sejam associados ao dispositivo ambiente.

2.2.1 Inclusão dos créditos de carbono

Além dos custos monetários citados na seção anterior, este trabalho sugere que por meio do dispositivo ambiental também é possível levar em conta a precificação do carbono e fazer a internalização das despesas ou receitas geradas pelos créditos de carbono. Neste caso, o termo Z_{amb} pode ser positivo ou negativo. Negativo em caso de uma receita gerada devido à redução ou remoção das emissões (que pode gerar um crédito a ser vendido) e positivo em caso de um custo adicional da compra de créditos de carbono por parte de uma planta que não conseguiu cumprir metas de redução de emissões e teve que comprar créditos daquelas que reduziram as suas a níveis abaixo do estipulado.

Todo o detalhamento da modelagem termoeconômica para levar em conta esse mercado de carbono está apresentada na seção 3.

3. Exemplo - Sistema de cogeração com turbina a gás

O sistema térmico escolhido para exemplificar como a modelagem termoeconômica pode ser utilizada como ferramenta para internalização dos créditos de carbono é um sistema de cogeração com turbina a gás simples conforme Figura 1 que é composto por compressor de ar (CA), câmara de combustão (CC), turbina a gás (TG) e caldeira de recuperação (CR). Parte da potência gerada pela turbina é utilizada no acionamento do compressor (PC). A partir de um combustível (E_C) são gerados dois produtos finais, potência líquida (P_L) e calor útil (Q_U).

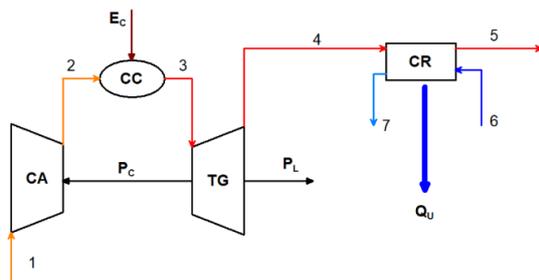


Figura 1. Estrutura física do sistema de cogeração.

A modelagem termoeconômica pode ser realizada através de diferentes tipos de diagrama: físico, produtivo e abrangente. Como a modelagem com o diagrama físico não é suficiente para identificar o processo de formação dos resíduos [17], a maioria das metodologias utilizam o diagrama produtivo.

A descrição do processo de formação de custo dos sistemas térmicos baseados em fluxos produtivos é uma característica original das metodologias funcionais: Análise Funcional Termoeconômica (AFT) [14] e Análise Funcional de Engenharia (EFA) [7]. No entanto, outras metodologias termoeconômicas, como

o Modelo H&S [17] utilizado neste trabalho, também adotaram essa característica.

3.1 Modelo H&S

O Modelo H&S [17] descreve o comportamento dos ciclos termodinâmicos no plano h-s considerando a variação de entalpia e entropia do fluido de trabalho, conforme sugerido por [18]. Trata-se de um modelo de desagregação da exergia física em suas parcelas entálpica (E^H) e entrópica (E^S), conforme Equação (5) [19]. A exergia total (E^{TOTAL}) pode ser definida pela Equação (6) como a soma das parcelas física (E^{FIS}) e química (E^{QUI}), desprezando efeitos nucleares, magnéticos, elétricos, de tensão superficial, cinético e potencial [20].

$$E^{FIS} = E^H - E^S \quad (5)$$

$$E^{TOTAL} = E^H - E^S + E^{QUI} \quad (6)$$

O Modelo H&S define o dispositivo ambiental (A) no diagrama produtivo que interage com os demais subsistemas da planta. Esse dispositivo tem papel fundamental nas análises dos sistemas térmicos, principalmente no tratamento dos resíduos e na internalização de custos ambientais. Tanto a parcela física (representado por $E_{5:1}^H$) quanto a química ($E_{3:2}^{QUI}$) dos resíduos são dissipadas no (A), ver Figura 3, e é de onde o sistema recebe ar na entrada do compressor. A parcela química é gerada na CC devido à reação de combustão em que a mistura ar e combustível se transforma em gases de combustão.

Além disso, o dispositivo ambiental também é responsável por fechar o ciclo (Figura 2) e assim redistribuir os custos dos resíduos para os demais componentes da planta e consequentemente para os produtos finais.

A Figura 2 representa o ciclo de cogeração no diagrama h-s e a numeração desse diagrama representa os processos realizados pelos seguintes componentes:

- 1-2: compressor (1-2s seria compressão isentrópica);
- 2-3: câmara de combustão;
- 3-4: turbina a gás (3-4s seria a expansão isentrópica);
- 4-5: caldeira de recuperação.

Na saída da caldeira de recuperação (ponto 5), os gases de exaustão possuem exergia (portanto são resíduos). Apesar desse equipamento (CR) reduzir um pouco a entropia do fluido de trabalho, o ciclo não está totalmente fechado. No caso de um ciclo Rankine, por exemplo, o condensador fecha totalmente o ciclo ao reduzir a entropia do vapor de saída da turbina até a do líquido saturado na entrada da bomba.

O dispositivo que representa o ambiente nos diagramas (A) realiza o processo 5-1 e fecha totalmente o ciclo.

Nesse dispositivo o fluxo 5 representa os gases de exaustão e o fluxo 1 é o ar aspirado pelo compressor.

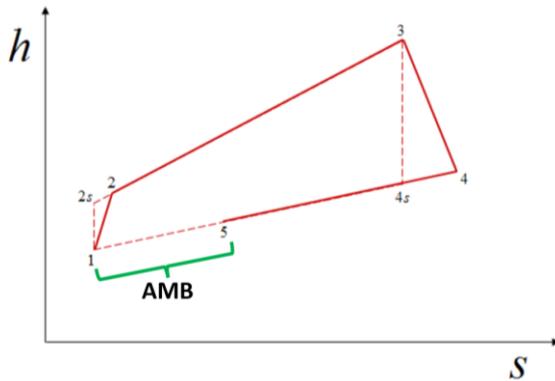


Figura 2. O dispositivo ambiente em ciclos abertos.

3.1.1 Diagrama produtivo

A Figura 3 representa o diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a gás de acordo com o Modelo H&S. Os fluxos produtivos representam variações das parcelas entálpica, entrópica e química da exergia entre dois estados físicos (i e j) conforme Equações (7) - (9), respectivamente.

$$E_{i,j}^H = E_i^H - E_j^H \quad (7)$$

$$E_{i,j}^S = E_i^S - E_j^S \quad (8)$$

$$E_{i,j}^{QUI} = E_i^{QUI} - E_j^{QUI} \quad (9)$$

Na Figura 3 os componentes do sistema são representados por retângulos que são unidades reais (ou subsistemas), os losangos e círculos são unidades fictícias chamadas junções (J) e bifurcações (B), respectivamente, que são utilizadas para interconectar os subsistemas.

Em relação às definições de insumo e produto, para as parcelas entálpica e de exergia química (ambas positivas, conforme Equação 6), se a variação da parcela específica através do equipamento for positiva, ela é classificada como produto, caso contrário, como insumo. Para a parcela entrópica, o comportamento é o oposto já que essa parcela tem uma contribuição negativa na definição da exergia (Equação 6). Assim se a entropia específica do fluido de trabalho aumentar, essa variação será insumo, caso contrário, produto [15]. Neste caso, o Modelo H&S define como insumo do ambiente os fluxos produtivos das parcelas entálpica ($E_{5,1}^H$) e química ($E_{3,2}^{QUI}$) e como produto a parcela entrópica ($E_{5,1}^S$), veja Figura 3.

3.1.2 Balanço de custo monetário

A Figura 4 mostra o balanço de custo monetário, expandido em forma matricial, que é obtido ao aplicar

o balanço de custo da Equação (1) em cada um dos 5 subsistemas (CA, CC, TG, CR e A) e nas junções-bifurcações entálpica (J_H - B_H) e entrópica (J_S - B_S) do diagrama produtivo (Figura 3).

Observa-se que a matriz de valorização interna é composta por fluxos das parcelas da exergia, potência e calor útil. Ela representa o processo de distribuição dos recursos externos até a formação do custo dos produtos finais. A matriz (ou vetor) de custo é a incógnita da modelagem e é composta pelo custo monetário unitário dos fluxos gerados em cada um dos subsistemas. Por exemplo, c_{CA} é o custo monetário unitário do produto do compressor (CA), ou seja, do fluxo $E_{2,1}^H$.

Devido a utilização do critério da igualdade, alguns fluxos possuem o mesmo custo unitário. Dentre eles: $E_{3,2}^H$ e $E_{3,2}^{QUI}$; $E_{4,5}^S$ e Q_U ; P_C e P_L . Além desses, todos os fluxos de parcela entálpica que saem da J_H - B_H tem o mesmo custo unitário assim como todos os fluxos da parcela entrópica que saem da J_S - B_S .

A matriz de valorização externa contém a exergia do combustível e seu respectivo custo unitário, além do custo horário externo de cada subsistema devido ao capital, O&M do equipamento (Z). Por se tratarem de componentes fictícios, as junções-bifurcações tem custo Z nulo, conforme mostrado na matriz de valorização externa da Figura 4.

O termo Z juntamente com o dispositivo que representa o ambiente nos diagramas são peças chaves na internalização dos custos ambientais em termoeconomia. A Figura 5 detalha esse dispositivo e seus fluxos de entrada e saída que fazem parte do balanço de custo monetário. O dispositivo ambiente em si não tem custo de aquisição, operação e manutenção por ser uma representação do próprio ambiente atmosférico. Porém, no caso da instalação de algum componente de tratamento ambiental (filtro, precipitador eletrostático, dentre outros) que geralmente não é representado no diagrama físico do sistema térmico, o custo desse componente pode ser internalizado no dispositivo ambiental, através dos dois primeiros termos do lado direito da Equação (4), e assim ser redistribuído para todo o sistema.

Já o custo de multa, licenças e permissões ambientais devem ser internalizados pelo Z_{amb} , assim como os valores da precificação do carbono. Porém este último depende de se tratar de receita ou despesa no mercado de carbono.

No caso de uma receita, que pode ocorrer devido à redução nas emissões abaixo do estipulado que gera um crédito que pode ser vendido, o termo Z_{amb} entra negativo no balanço. Como o dispositivo ambiente fecha o ciclo e redistribui os custos para os demais equipamentos e produtos finais da planta, esse crédito reduz os demais custos monetários e pode influenciar nas decisões de produção da planta.

Por outro lado, uma despesa relativa a crédito de carbono, como a necessidade de comprar créditos já que não foi capaz de reduzir as emissões conforme

estipulado, faz com que o termo Z_{amb} seja positivo e de maneira análoga acaba aumentando os custos dos demais fluxos internos e produtos finais da planta. Em resumo, a equação mostrada na Figura 5 é destacada no texto como Equação (10) e sua análise pode ser feita da seguinte forma:

- O dispositivo ambiente (A) não tem custo horário devido à capital e O&M, mas no caso de utilização de equipamentos de tratamento ambiental (que geralmente não são representados na estrutura física do sistema), esses termos podem ser considerados dentro do Z_A ;
- Os custos ambientais de licenças e permissões são internalizados através do termo Z_{amb} do dispositivo ambiente;

- Os custos associados ao mercado de carbono também são internalizados através do termo Z_{amb} . Em caso de receita esse termo é negativo e em caso de despesa, positivo.

Em todos os três casos, como o dispositivo (A) fecha o ciclo (Figura 2), os custos são sistematicamente e automaticamente redistribuídos aos demais subsistemas e conseqüentemente aos produtos finais da planta (Figura 3).

$$Z_A = Z_{cap} + Z_{O\&M} + Z_{amb} \tag{10}$$

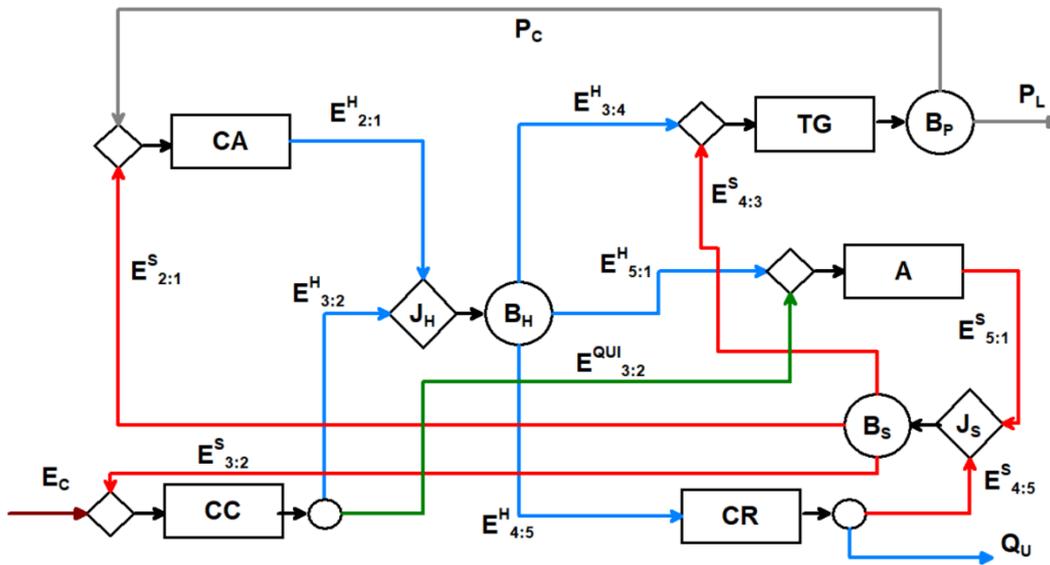


Figura 3. Diagrama produtivo - Modelo H&S.

$$\begin{bmatrix}
 E_{2:1}^H & 0 & -P_C & 0 & 0 & 0 & -E_{2:1}^S \\
 0 & E_{3:2}^H + E_{3:2}^{QUI} & 0 & 0 & 0 & 0 & -E_{3:2}^S \\
 0 & 0 & P_C + P_L & 0 & 0 & -E_{3:4}^H & -E_{4:3}^S \\
 0 & 0 & 0 & E_{4:5}^S + Q_U & 0 & -E_{4:5}^H & 0 \\
 0 & -E_{3:2}^{QUI} & 0 & 0 & E_{5:1}^S & -E_{5:1}^H & 0 \\
 -E_{2:1}^H & -E_{3:2}^H & 0 & 0 & 0 & E_{3:4}^H + E_{4:5}^H + E_{5:1}^H & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -E_{4:5}^S & -E_{5:1}^S & 0 & E_{2:1}^S + E_{3:2}^S + E_{4:3}^S
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 c_{CA} \\
 c_{CC} \\
 c_{TG} \\
 c_{CR} \\
 c_{AMB} \\
 c_{JB-H} \\
 c_{JB-S}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 Z_{CA} \\
 c_C \cdot Q_C + Z_{CC} \\
 Z_{TG} \\
 Z_{CR} \\
 Z_A \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

Valorização interna
Custo
Valorização externa

Figura 4. Balanço de custo monetário em forma matricial.

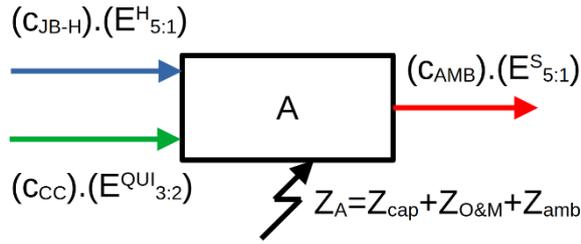


Figura 5. Balanço de custo no dispositivo ambiental.

3.1.3 Resultados

A Figura 6 representa um sistema de cogeração genérico em que a partir de um combustível (E_C) são gerados dois produtos (P_L e Q_U), assim como é o caso do sistema com turbina a gás da Figura 1. Ao aplicar o balanço de custo da Equação (1) nesse sistema genérico, obtém-se a Equação (11), em que c_{P_L} e c_{Q_U} são os custos unitários monetários dos produtos finais.

$$c_{P_L} = -\frac{Q_U}{P_L} c_{Q_U} + \frac{c_C \cdot E_C + Z}{P_L} \quad (11)$$

Observa-se que a Equação (11) é a equação de uma reta do tipo $y = A \cdot x + B$, e pode ser escrita conforme Equação (12).

$$c_{P_L} = -A \cdot c_{Q_U} + B \quad (12)$$

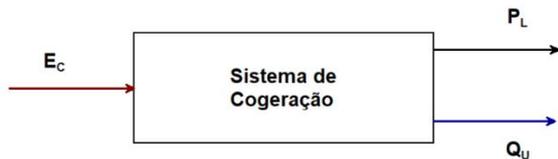


Figura 6. Fluxos contábeis na cogeração.

Independente da metodologia termoeconômica aplicada, a solução da Equação (12) será um par ordenado de custo monetário unitário da potência líquida (c_{P_L}) e do calor útil (c_{Q_U}). Alguns trabalhos [9,21,22] já compararam diversas metodologias em problemas desse tipo e confirmaram que esses pares ordenados pertencem a mesma reta solução quando o sistema tem suas condições operacionais definidas, como a relação potência líquida/calor útil e a eficiência exergética global.

A Figura 7 representa possibilidades para essa reta solução, de maneira genérica. Em todas, quanto maior o custo unitário da potência, menor o custo unitário do calor, e vice-versa.

Considerando a reta central (linha contínua em azul) como a condição específica para um sistema de cogeração, alterações no modelo termodinâmico deslocam a reta para novas posições paralelas a inicial [21,23], como mostrado pelas retas tracejadas na Figura 7.

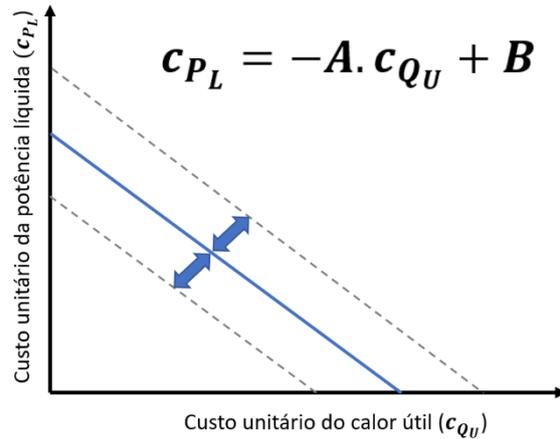


Figura 7. Reta solução de custo monetário unitário.

Analisando a inclusão de custos ambientais, como os da precificação do carbono, observa-se na Equação (11) que o termo Z , e consequentemente o Z_{amb} , alteram o coeficiente B da equação da reta (Equação 12), e por isso também deslocaria a reta inicial para retas paralelas em comparação com a condição inicial. Em caso de receita ($Z_{amb} < 0$), a reta se aproxima da origem ao diminuir os custos dos produtos uma vez que foi gerado receita com a venda de créditos de carbono. Para despesas ($Z_{amb} > 0$) a reta se afasta da origem já que é necessário comprar créditos de carbono, ou seja, há aumento nos custos de produção. Vale a pena ressaltar que a reta deslocaria para posições distintas, porém paralelas. De qualquer forma, como o coeficiente A não é alterado, a inclinação se mantém a mesma. Além disso, definido as condições do sistema e incluído o custo ambiental, diferentes metodologias termoeconômicas que considerem o dispositivo ambiente definiriam pares ordenados de custo da potência e do calor pertencentes a mesma reta solução.

4. Conclusões

Através de um exemplo teórico de um sistema de cogeração com turbina a gás, esse trabalho descreveu e detalhou uma metodologia termoeconômica para internalizar custos monetários ambientais em análises de sistemas térmicos.

O foco nos custos nesse trabalho são os da precificação das emissões de carbono. Entretanto, a internalização de outros custos ambientais, como os de licença, permissões e de aquisição de equipamentos de tratamento/controlado ambiental também foram considerados.

Um sistema de cogeração foi escolhido por ser um dos principais emissores de gases de efeito estufa segundo dados da Agência Internacional de Energia, IEA da sigla inglesa.

O Modelo H&S foi utilizado por se tratar de uma metodologia termoeconômica que define o dispositivo para representar o ambiente nos diagramas. Esse dispositivo é responsável por dissipar os resíduos do

ciclo e tem papel chave na internalização dos custos ambientais e na redistribuição sistematizada dos custos para os demais componentes e produtos finais do sistema. Apesar disso, qualquer outra metodologia termoeconômica, baseada na exergia, e que defina esse dispositivo ambiental de forma coerente poderia ser utilizada seguindo a mesma metodologia. Além do mais, esse modelo foi proposto para levar em conta o tratamento dos resíduos (gases de exaustão no caso desse trabalho) e seus custos o que está diretamente associado as emissões de poluentes e conseqüentemente ao mercado de carbono.

Sabendo que os sistemas de conversão de energia geram danos ambientais, suas análises completas devem levar em conta aspectos técnicos, econômicos e ambientais para atender a agenda ambiental assinada no Acordo de Paris.

Esse trabalho apresentou uma metodologia termoeconômica como ferramenta viável para alcançar esse propósito, detalhando como o mercado de carbono pode ser levado em conta e a precificação do carbono e outros custos ambientais internalizados à análise. Além de detalhar a metodologia de cálculo, também mostrou o comportamento dos resultados dos custos monetários dos produtos finais do sistema de cogeração. Essa incorporação de custos associados as mudanças climáticas na tomada de decisões econômicas através da precificação do carbono pode ajudar a incentivar mudanças nos padrões de produção, consumo e investimento, auxiliando no processo de transição energética voltada para a descarbonização do planeta.

Em um próximo trabalho sobre o tema, espera-se aplicar a metodologia aqui descrita em uma análise com dados recentes do mercado de carbono para analisar as variações dos custos nos casos de receitas e despesas associadas ao crédito de carbono.

Esse trabalho tem como conclusão final que a metodologia proposta é coerente do ponto de vista teórico da termodinâmica e da termoeconomia e pode ser usada para a alocação dos créditos de carbono aos produtos internos e finais de sistemas térmicos.

5. Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer o suporte de IFES, UFES, FAPES, CAPES, TEVISA S.A. e CNPq.

6. Referencias

- [1] IPCC. Mitigation of Climate Change [https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGII_I_FinalDraft_FullReport.pdf], (accessed May 5, 2022). 2022.
- [2] IEA. CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview-International Energy Agency [https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2020/08/IEA-CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_Overview_2020_edition.pdf],(accessed March 21, 2022). Paris: 2020.
- [3] BRASIL. DECRETO Nº 11.075: Estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa e altera o Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. 2022.
- [4] Sendeco2. Precio Emisiones de CO2. [https://www.sendeco2.com/es/], (accessed May 5, 2022) n.d.
- [5] The World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2022. Washington, DC: 2022.
- [6] Valero A, Serra L, Uche J. Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoeconomics. Part I: Theory. Journal of Energy Resources Technology 2006;128:1–8. https://doi.org/10.1115/1.2134732.
- [7] von Spakovsky MR. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. Energy 1994;19:343–64. https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90115-5.
- [8] Dincer İ, Rosen MA. Exergy: Energy, Environment, and Sustainable Development. 1st ed. Elsevier Science; 2007.
- [9] Faria PR, Santos JJCS, Donatelli JLM, Oliveira JR S, Santos RG. Disaggregation of the Physical Exergy to Improve the Accuracy of the Results in Thermoeconomics. COBEM 2015 - 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro: 2015.
- [10] Faria PR, dos Santos RG, Santos JJ, Barone MA, Miotto BM. On the Allocation of Residues Cost using Conventional and Comprehensive Thermoeconomic Diagrams. International Journal of Thermodynamics 2021;24:134–49. https://doi.org/10.5541/ijot.878173.
- [11] Barone MA, Santos RG dos, Faria PR de, Lorenzoni RA, Lourenço AB, Santos JJCS. On the Arbitrariness and Complexity in Thermoeconomics due to Waste Cost and Supplementary Firing Treatment. Engineered Science 2022;17:328–42. https://doi.org/10.30919/es8e624.
- [12] Santos RG, Faria PR, Santos JJCS, da Silva JAM. 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, Pau - France: 2015.

[13] Santos RG, Faria PR, Santos JJCS, Silva JAM, Flórez-Orrego D. Thermoeconomic modeling for CO₂ allocation in steam and gas turbine cogeneration systems. *Energy* 2016;117:590–603. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.019>.

[14] Frangopoulos CA. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy* 1994;19:323–42. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90114-7).

[15] Lazzaretto A, Tsatsaronis G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy* 2006;31:1257–89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>.

[16] Torres C, Valero A, Rangel V, Zaleta A. On the cost formation process of the residues. *Energy* 2008;33:144–52. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.06.007>.

[17] Santos JJCS, Nascimento MAR, Lora EES, Martínez-Reyes AM. On the Negentropy Application in Thermoeconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? *International Journal of Thermodynamics* 2009;12:163–76.

[18] Valero A, Royo J, Lozano MA. The Characteristic Equation and Second Law Efficiency of Thermal Energy Systems. *International Conference Second Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21st Century*, E. Sciubba, M.J. Moran. Roma “La Sapienza”; 1995, p. 99–112.

[19] Lourenço AB, Nebra SA, Santos JJCS. 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*, vol. 1, Turku, Finland: 2014, p. 1–11.

[20] de Oliveira Junior S. *Exergy: Production, Cost and Renewability*. London: Springer London; 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4165-5>.

[21] dos Santos RG, de Faria PR, Santos JJCS, da Silva JAM, Donatelli JLM. The Effect of the Thermodynamic Models on the Thermoeconomic Results for Cost Allocation in a Gas Turbine Cogeneration System. *Revista de Engenharia Térmica* 2015;14:47. <https://doi.org/10.5380/reterm.v14i2.62133>.

[22] Santos RG, Lourenço A, Faria PR, Barone MA, Santos JJ. A Comparative Study of a New Exergy Disaggregation Approach with Conventional Thermoeconomic Methodologies for Cost Allocation in an Organic Rankine Cycle Powered Vapor Compression Refrigeration System. *ECOS 2022 - Proceedings of the 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Copenhagen (DK): 2022.

[23] Araújo LR de, Morawski AP, Barone MA, Donatelli JLM, Santos JJCS. On the effects of

thermodynamic assumptions and thermoeconomic approaches for optimization and cost allocation in a gas turbine cogeneration system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2020;42:323–41. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02402-6>.