

Um estudo comparativo do recente Modelo A&F com as metodologias termoeconômicas convencionais no tratamento de resíduos em um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa

Rodrigo Guedes dos Santos^{1,2}, Atilio Barbosa Lourenço², Pedro Rosseto de Faria^{2,3}, Igor Chaves Belisário¹, Marcelo Aiolfi Barone², José Joaquim C. S. Santos²

¹Instituto Federal do Espírito Santos (IFES), Vitória, Brasil. E-mail: rodrigo.guedes@ifes.edu.br, igor.belisario@ifes.edu.br

²Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Brasil. E-mail: atilio.lourenco@ufes.br, mabacz@gmail.com, jose.j.santos@ufes.br

³Instituto Federal do Espírito Santos (IFES), Cariacica, Brasil. E-mail: pedro.faria@ifes.edu.br

Resumo

A Termoeconomia é uma ciência que concilia conceitos termodinâmicos com econômicos e pode ser dividida em três campos de atuação: alocação de custo, diagnóstico e otimização. Na literatura pode-se encontrar várias metodologias termoeconômicas que são utilizadas atualmente. Apesar da larga utilização e seus respectivos campos de atuação, todos os modelos apresentam limitações no tratamento de equipamentos dissipativos ou aumento de complexidade na modelagem termoeconômica. Com objetivo de preencher uma parte dessa lacuna científica em termoeconomia uma recente metodologia, Modelo A&F, vem sendo proposta. Essa nova abordagem, desagrega a exergia física em apenas dois termos, a saber, energia de Helmholtz e trabalho de fluxo. Este estudo tem como objetivos apresentar pela primeira vez a utilização dessa nova abordagem, através de uma alocação de custos, em um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa e compara-la as metodologias termoeconômicas convencionais destacando o tratamento de resíduos utilizado por cada Modelo.

Palavras chave: modelagem termoeconômica, alocação do custo de resíduos, complexidade na modelagem, desagregação da exergia física.

Abstract

Thermoeconomics is a science that reconciles thermodynamic and economic concepts. It can be divided into three fields of action: cost allocation, diagnosis and optimization. In the literature one can find several thermoeconomic methodologies that are currently used. Despite the wide use and their respective fields of action, all models have limitations in the treatment of dissipative equipment or increase in complexity in thermoeconomic modeling. In order to fill part of this scientific gap in thermoeconomics, a recent methodology, the A&F Model, has been proposed. This new approach disaggregates physical exergy into just two terms, namely Helmholtz energy and flow work. This study aims to present for the first time the use of this new approach, through a cost allocation, in a cogeneration system with regenerative gas turbine and compare it with conventional thermoeconomic methodologies, highlighting the waste treatment used by each Model.

Keywords: thermoeconomic modeling, waste cost allocation, modeling complexity, physical exergy disaggregation.

1. Introdução

A Termoeconomia é uma ciência que concilia conceitos termodinâmicos com econômicos e pode ser dividida em três campos de atuação: alocação de custo, diagnóstico e otimização. As metodologias propostas foram sedimentadas através dos cálculos dos custos unitários exergéticos e monetários (originalmente) de produtos internos e finais em sistemas térmicos.

A forma como a estrutura produtiva é definida (insumo e produto) é um ponto chave da modelagem termoeconômica [1], e a magnitude termodinâmica mais adequada para ser associada ao custo é a exergia [2], desde que essa análise contém informações referentes a primeira e a segunda lei da termodinâmica. Dependendo do tipo de análise, torna-se necessário diferentes níveis de precisão dos resultados, o que significa que cada análise termoeconômica requer um nível específico de desagregação dos componentes e fluxos [3].

De acordo com [1], quanto mais profunda e detalhada for a desagregação, mais clara será a interpretação dos custos obtidos e mais ampla será a possibilidade de aplicações em problemas teóricos e práticos. Ao desagregar a exergia física, é possível obter uma melhor precisão dos resultados na análise termoeconômica [4]. No entanto, há um consequente aumento na complexidade da modelagem termoeconômica [5].

Historicamente, apesar da indicação da existência de estudos e abordagens termoeconômicas desde o início do século XX, foi somente a partir da década de 1980, quando surgiram novas metodologias com novos conceitos, definições e aplicações [6], que suas aplicações metodológicas e funcionais na análise, projeto e otimização de sistemas térmicos começaram a ser realizadas de forma mais abrangente. Diante desse florescimento destaca-se o trabalho denominado de Problema CGAM [6]. A intenção inicial dos autores era comparar e unificar as metodologias termoeconômicas desenvolvidas, entretanto isso não ocorreu principalmente pelas diferentes formas de alocação do custo dos resíduos para os produtos finais. Avançando aos dias mais atuais, alguns modelos ainda continuam a serem estudados e outros surgiram, principalmente baseando na ideia de desagregação da exergia física. Neste trabalho cinco Modelos termoeconômicos são estudados, Modelo E, Modelo E^T&E^M, Modelo H&S, Modelo UFS e o recente Modelo A&F. A planta escolhida para a análise permite a abordagem de um tema muito latente em termoeconomia que é a alocação do custo de resíduos. Porém, pode-se dizer que um dos maiores motivadores do desenvolvimento de novas abordagens é o tratamento e isolamento de equipamentos dissipativos. Nesse contexto, ao utilizar o Modelo E é preciso juntar esses equipamentos dissipativos com algum outro equipamento em que juntos sejam capazes de definir

um fluxo como produto. Essa escolha é arbitrária, uma vez que fica a cargo da decisão do termoeconomicista. [7] apresentou uma elegante solução (neguentropia) para isolar o condensador em ciclos a vapor. No entanto, a neguentropia é um fluxo fictício [8]. Embora esta proposta permitisse definir o insumo e o produto dos condensadores, já foi demonstrado que esta solução apresenta valores incomuns de custos exergéticos unitários, ou seja, inferiores à unidade [9,10]. Vale ressaltar que essa solução não permite definir o produto e insumo para válvulas e consequentemente essa não pode ser isolada na estrutura produtiva. A desagregação da exergia física em suas parcelas térmicas e mecânicas [11,12] é um modelo termoeconômico de desagregação de exergia física muito utilizado por vários pesquisadores, porém só é aconselhável, sem arbitrariedades, para fluidos modelados como gás ideal (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006).

Com o objetivo de alcançar valores consistentes para os custos exergéticos unitários, [10,13] abordaram o conceito e a magnitude da neguentropia em uma perspectiva diferente. Agora não mais com um fluxo fictício e sim junto com a parcela entálpica da exergia. Ou seja, o Modelo H&S desagrega a exergia física em suas parcelas entálpicas e entrópicas, ambas consideradas como termos da exergia física [14]. Esse modelo apresentou um grande avanço sobre a temática de tratamentos de equipamentos dissipativos, uma vez que foi capaz de tratar trocadores de calor e condensadores sem os incomuns resultados apresentados pelas metodologias anteriores. Apesar de ser considerado um modelo consistente, apresenta uma limitação em relação à capacidade de definir um propósito produtivo para válvulas.

O Modelo UFS [15] foi proposto, como uma extensão do Modelo H&S, para resolver essa limitação em relação a válvula, desagregando a exergia física em três termos: energia interna, trabalho de fluxo e o termo entrópico. Lourenço et. al [16] mostraram que a energia interna, o trabalho de fluxo e a entropia podem ser interpretados como termos da exergia física. A aplicação do Modelo UFS é justificada quando o sistema térmico em questão apresenta uma válvula, pois ao comparar com o Modelo H&S, há mais um termo de exergia para cada equipamento no diagrama produtivo para definir produto e insumo. Isto acarreta no aumento dos esforços computacionais necessários e da complexidade da modelagem. Apesar do grande avanço em relação ao tratamento dos equipamentos dissipativos, o desenvolvimento dos modelos termoeconômicos, como o UFS, traz como consequências um aumento na complexidade na modelagem termoeconômica

Com o objetivo de preencher uma parte dessa lacuna científica em termoeconomia, uma recente metodologia, Modelo A&F, vem sendo proposta. Essa nova abordagem, desagrega a exergia física em apenas dois termos, a saber, energia de Helmholtz e trabalho

de fluxo. Vale ressaltar que toda a metodologia termoeconômica deve deixar clara em sua concepção à maneira na qual os resíduos dos sistemas térmicos são tratados. E este trabalho escolheu a planta utilizada no Problema CGAM, exatamente para poder exemplificar como essa nova metodologia trata os resíduos de um sistema térmico.

Em relação ao tratamento de resíduos, os Modelos E e E^T&E^M utilizam a internalização dos custos dos resíduos através dos insumos da turbina a gás e da caldeira de recuperação, diferentemente dos Modelos H&S e UFS, que usam o conceito de definir o ambiente como um dispositivo através do qual os resíduos, emissões e encargos ambientais são internalizados. O Modelo A&F também utiliza o dispositivo ambiente para essa finalidade, porém destoa das outras metodologias à medida que a internalização é realizada através da parcela de energia de Helmholtz e não pela parcela entrópica. Tendo isso em mente, este estudo tem como objetivos apresentar pela primeira vez a utilização dessa nova abordagem, através de uma alocação de custos, em um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa e compara-la as metodologias termoeconômicas convencionais destacando o tratamento de resíduos utilizado por cada Modelo. Os resultados mostram que em termos de complexidade o Modelo A&F se aproxima dos Modelos E^T&E^M e H&S e especificamente em relação ao Modelo UFS mostra uma redução na quantidade de fluxos, junções-bifurcações e equações de custo, salientando assim uma menor complexidade. Também é apresentado que para o Modelo A&F o ambiente atua como um dispositivo consistente nas análises termoeconômicas em sistemas de cogeração, permitindo a internalização adequada dos resíduos do ciclo.

2. Modelagem Termoeconômica

A modelagem termoeconômica é feita através de um conjunto de equações que descreve matematicamente o processo de formação de custo dos produtos finais do sistema e geralmente é utilizada para determinar custos exergéticos e/ou monetários na alocação de recursos externos aos produtos finais e, consequentemente, para avaliar custos unitários exergético e monetário dos fluxos internos e produtos finais, respectivamente.

Levando-se em conta a estrutura física (Figura 1) sob análise, é conveniente escolher um modelo termoeconômico baseado em diagrama que mostra a finalidade produtiva dos subsistemas (produtos e insumos) e a interação entre eles.

As metodologias termoeconômicas concordam que é preciso definir a finalidade produtiva dos subsistemas, bem como a distribuição dos recursos externos em todo o sistema, que podem ser representados por meio de um diagrama.

Independentemente do tipo de diagrama termoeconômico utilizado (físico, produtivo ou

abrangente), para calcular o custo unitário de cada fluxo interno e dos produtos finais, o modelo matemático para alocação de custos (que é um conjunto de equações de custos obtido a partir do equilíbrio termoeconômico em cada subsistema do diagrama) segue a Equação (1). A solução deste conjunto de equações são os custos unitários monetários de cada fluxo interno e de cada produto final. O custo unitário monetário de um fluxo é a quantidade de unidade monetária externa necessária para obter uma unidade desse fluxo e é uma medida da eficiência econômica do processo de produção ao produzir esse fluxo [3]. Para formular o equilíbrio da equação de custo em cada unidade produtiva ou subsistema, os fluxos de entrada assumem valor negativo e os fluxos de saída assumem valor positivo.

$$\sum(c_s Y_s) - \sum(c_e Y_e) = Z + c_c \cdot E_c \quad (1)$$

Na Equação 1, c_s e c_e são variáveis desconhecidas que representam o custo unitário monetário dos fluxos internos na saída e entrada de cada subsistema (em \$/kWh), respectivamente; Y_s e Y_e representam os fluxos internos genéricos (em kW) na saída e na entrada de cada subsistema, respectivamente, que podem ser avaliados usando qualquer magnitude termodinâmica, como potência (P), exergia total (E), parcela térmica (E^T), parcela mecânica (E^M), etc.; Z representa o custo externo por hora do subsistema devido à custo de capital, de operação e manutenção de cada subsistema (em \$/h); c_c é o custo unitário da exergia do combustível (em \$/kWh) e E_c é o consumo externo exergético da planta (em kW).

Modificando a Equação 1 para formular as equações de custo unitário exergético (k_s e k_e) de cada fluxo interno e dos produtos finais do diagrama, chega-se a Equação (2).

$$\sum(k_s Y_s) - \sum(k_e Y_e) = k_c \cdot E_c \quad (2)$$

O custo unitário exergético de um fluxo (em kW/kW) é a quantidade de exergia necessária para obter uma unidade exergética desse fluxo. Esse custo é uma medida da eficiência termodinâmica do processo de produção que gera esse fluxo [3]. Neste caso, Equação 2, o custo horário do subsistema devido ao custo de capital, operação e manutenção é nulo ($Z = 0$) e o custo unitário monetário da exergia externa de combustível é substituído pelo custo unitário exergético do combustível, que é igual a 1 kW/kW, pois não há destruição exergética antes do processo ser realizado [3].

Normalmente o número de fluxos internos é maior que o número de subsistemas, por isso são necessárias equações auxiliares para completar o modelo matemático. Os modelos termoeconômicos baseados em diagrama produtivo consideram que todos os fluxos produtivos internos que saem do mesmo subsistema devem ter o mesmo custo unitário, uma vez que foram

produzidos sob os mesmos recursos e irreversibilidade. Para os modelos termoeconômicos baseados em diagrama físico, os critérios para definir as equações auxiliares são os Princípios do Insumo e do Produto [4].

3. Estrutura Física

A Figura 1 representa o sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa do Problema CGAM [6]. Este sistema é composto pelos seguintes equipamentos: compressor de ar (CA), regenerador (R), câmara de combustão (CC), turbina a gás (TG) e caldeira de recuperação (CR).

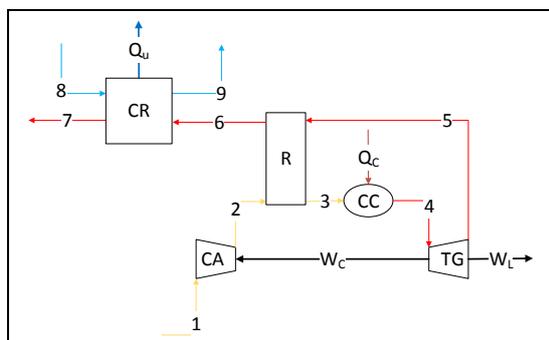


Figura 1. Sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa.

Os parâmetros operacionais da planta podem ser consultados no trabalho de proposição do CGAM [6]. Os produtos finais da planta são: 30MW de potência mecânica líquida (W_L) e 12,740 MW de calor útil (Q_U), em base exergética considerando a diferença entre a exergia do vapor saturado (fluxo 9) e a exergia da água de alimentação (fluxo 8). Dos 59692,5 kW que são produzidos na turbina a gás, 29692,5 kW são consumidos (W_C) no compressor a ar.

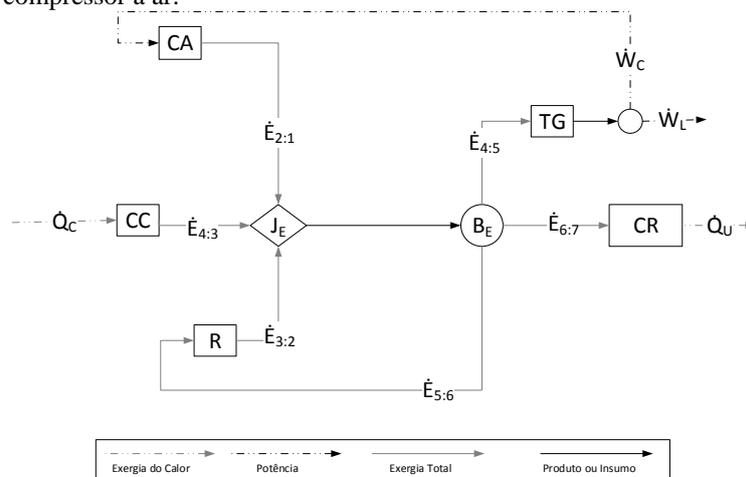


Figura 2. Diagrama produtivo para o sistema de cogeração utilizando o Modelo E.

Nos diagramas produtivos utilizados neste presente trabalho, os retângulos são as unidades reais (ou

4. Metodologias Termoeconômicas

Neste trabalho são aplicadas cinco metodologias termoeconômicas. Quatro das quais podem ser consideradas como metodologias convencionais, e uma recém-abordagem intitulada Modelo A&F que é apresentada neste trabalho para o estudo de caso em questão. Para todas essas metodologias são calculados os custos exergéticos e monetários unitários.

4.1. Metodologias Convencionais

As metodologias convencionais abordadas neste trabalho são: Modelo E, Modelo E^T&E^M, Modelo H&S, Modelo UFS.

4.1.1. Modelo E

Sabe-se que a exergia de um fluxo pode ser calculada conforme a Equação (3), como as somas das parcelas física (Equação (4)) e química (Equação (5)). O Modelo E utiliza a exergia total (Equação (3)) para definir todos os fluxos (internos e finais) apresentados no diagrama produtivo da Figura 2. Ou seja, a variação da exergia total entre dois estados físicos é usado para definir os fluxos.

$$E = E^{Fis} + E^{Qui} \quad (3)$$

$$E^{Fis} = \dot{m} \cdot C_p (T - T_0) - \dot{m} \cdot T_0 \cdot C_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} + \dot{m} \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

$$E^{Qui} = \dot{m} \cdot \sum y_n \cdot R_{Gas} \cdot T_0 \cdot \ln \frac{y_n}{y_{n,0}} \quad (5)$$

subistemas) que representam os equipamentos reais do sistema. O losango e o círculo são unidades fictícias

cuja finalidade é unir e/ou bifurcar os fluxos produtivos. Cada subsistema, nos diagramas produtivos, possuem setas de entrada que simbolizam seu combustível (ou recurso) e setas de saída que simbolizam seus produtos. A definição de fluxos produtivos é obtida a partir da variação dos termos de exergia (ou da exergia total) entre a entrada e a saída. Por exemplo, é classificado como produto, quando esta variação é positiva, e o contrário (variação negativa) como combustível. A exceção é a parcela entrópica, pois tem uma contribuição negativa, ou seja, é classificado como produto, quando esta variação é negativa, e o contrário (variação positiva) como combustível.

Multiproduto é o método utilizado para formular a equação auxiliar em cada bifurcação. Este método assume que todos os fluxos produtivos que saem do mesmo subsistema ou unidade têm o mesmo custo unitário, pois estão saindo do mesmo subsistema com os mesmos recursos e irreversibilidades.

É importante destacar que o sistema de cogeração escolhido para ser estudo nesse trabalho apresenta o fluxo 7 como resíduo. Sendo assim, destaca-se para cada modelo termoeconômico como é realizado a alocação desse resíduo para os produtos finais da planta. Especificamente para o Modelo E, esse resíduo é internalizado para os produtos finais proporcionalmente aos insumos exergeticos da turbina

a gás e caldeira de recuperação, respectivaente E_{4:5} e E_{6:7}.

4.1.2. Modelo E^T&E^M

O Modelo E^T&E^M foi o primeiro modelo termoeconômico a trabalhar com a desagregação da exergia física. É importante salientar que o processo de desagregação da exergia física nas análises termoeconômicas melhora a precisão dos resultados. A desagregação da exergia física para esse modelo é realizada através das parcelas mecânica (Equação (6)) e térmica (Equação (7)).

$$E^M = \dot{m} \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0} \quad (6)$$

$$E^T = \dot{m} \cdot C_p (T - T_0) - \dot{m} \cdot T_0 \cdot C_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} \quad (7)$$

A Figura 3 representa o diagrama produtivo para o sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa utilizando o Modelo E^T&E^M. Em relação aos resíduos, a internalização também acontece proporcionalmente aos insumos da turbina a gás e da caldeira de recuperação. Porém, os insumos agora são parcelas da exergia térmica e mecânica.

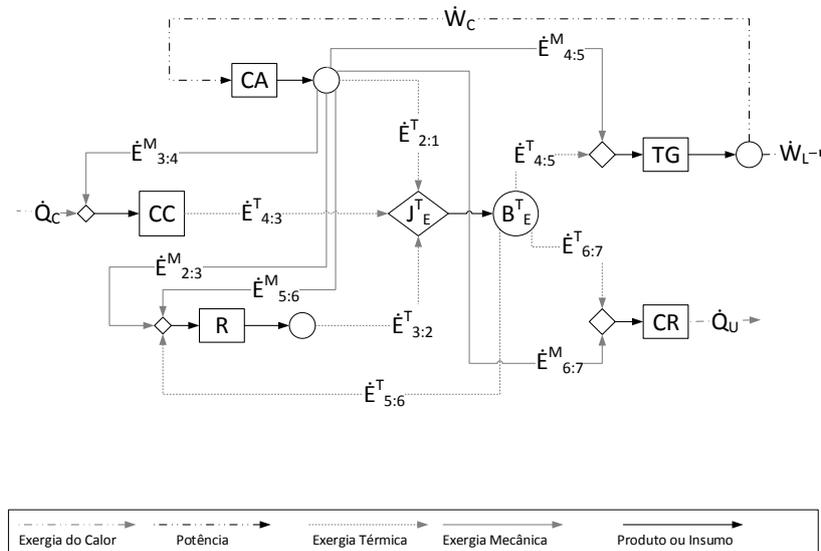


Figura 3. Diagrama produtivo para o sistema de cogeração utilizando o Modelo E^T&E^M.

4.1.3. Modelo H&S

O Modelo H&S [10] utiliza a exergia química e a exergia física desagregada em suas parcelas entálpicas (E^H) e entrópicas (E^S), respectivamente Equações (8) – (9) para definir seus fluxos.

$$E^H = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T - T_0) \quad (8)$$

$$E^S = -\dot{m} \cdot T_0 \cdot C_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} + \dot{m} \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0} \quad (9)$$

A Figura 4 ilustra o diagrama produtivo para o sistema de cogeração utilizando o Modelo H&S. Pela primeira vez neste trabalho, pode-se observar um dispositivo que representa o ambiente no diagrama produtivo nomeado pela letra “A”. Esse dispositivo pode ser associado a varias questões ambientais, especificamente para essa planta ao tratamento dos

resíduos. Esse dispositivo também tem a característica de fechar o ciclo, fazendo com que a internalização dos custos dos resíduos comece pela parcela entrópica $E^{S_{7:1}}$, produto desse subsistema. Por consequência e seguindo a definição da estrutura produtiva para esse

modelo, os custos são repartidos para os fluxos internos e produtos finais. Vale destacar que a exergia química está presente neste modelo, como produto da câmara de combustão e insumo do ambiente.

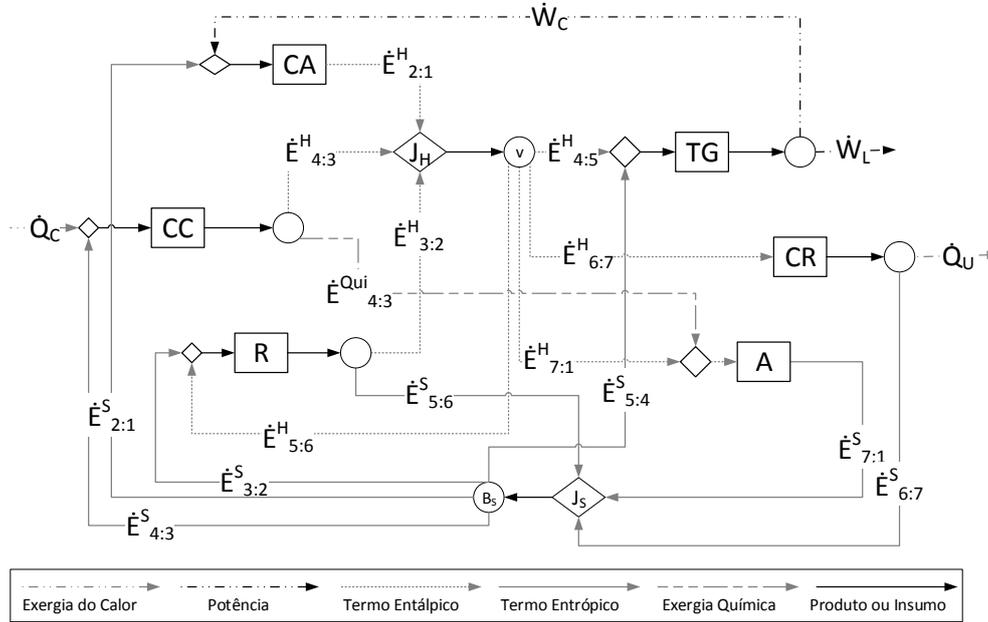


Figura 4. Diagrama produtivo para o sistema de cogeração utilizando o Modelo H&S.

4.1.4. Modelo UFS

$$E^F = \dot{m} \cdot R \cdot (T - T_0) \tag{11}$$

A desagregação da exergia física, em suas parcelas de energia interna (E^U), Equação (10), trabalho de fluxo (E^F), Equação (11), e entrópica (E^S), é uma característica do Modelo UFS [15] que aliada a exergia química são utilizadas para definir os insumos e produtos dos subsistemas.

A Figura 5 representa o diagrama produtivo do sistema de cogeração utilizando o Modelo UFS. Esse modelo que é considerado uma extensão do Modelo H&S, também apresenta o dispositivo intitulado Ambiente e também inicia a internalização do custo dos resíduos pela parcela entrópica. Vale ressaltar que a continuação dessa repartição segue a definição de produto e insumos baseados nas parcelas da exergia física e exergia química características desse modelo.

$$E^U = \dot{m} \cdot C_v \cdot (T - T_0) \tag{10}$$

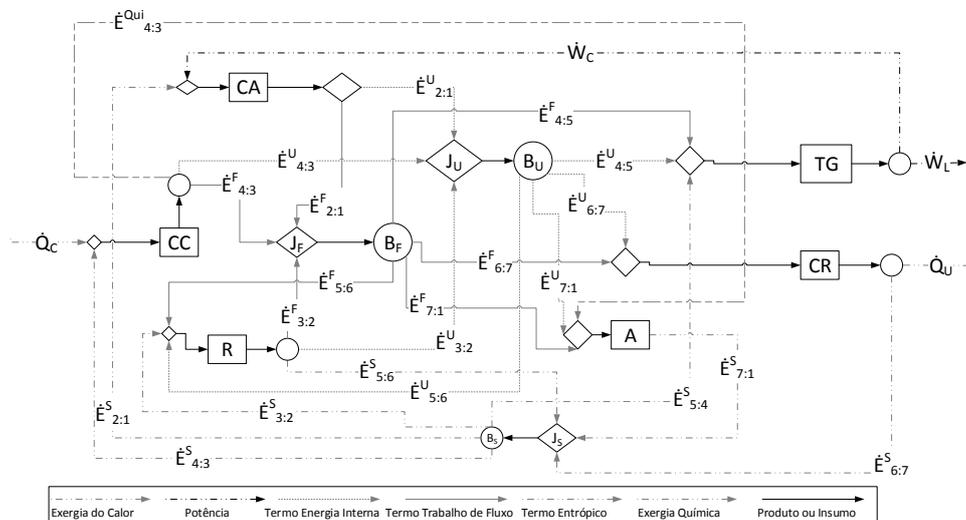


Figura 5. Diagrama produtivo para o sistema de cogeração utilizando o Modelo UFS.

4.2. Modelo A&F

O Modelo A&F [17,18] é uma abordagem termoeconômica recente, foi desenvolvido com a premissa de reduzir a complexidade e os efeitos computacionais comparadas a outras metodologias que são capazes de tratar (definir insumo e produto) equipamentos dissipativos, como por exemplo, uma válvula. Esse modelo também trabalha com a desagregação da exergia física, a definição de suas parcelas são: energia de Helmholtz E^A e trabalho de Fluxo E^F . Podem ser estimadas, especificamente pelas Equações (12) – (11), que aliada a exergia química é utilizada para definir os fluxos produtivos para esse modelo.

$$E^A = E^U + E^S \quad (12)$$

É importante destacar que o termo da energia de Helmholtz matematicamente pode ser interpretado como uma combinação da parcela da energia interna (E^U) com a parcela entrópica (E^S). Porém, vale a ressalva que essa combinação não é simples e puramente um algebrismo matemático, apresenta um firme conceito termodinâmico, caracterizado pela energia de Helmholtz.

A Figura 6 ilustra o Diagrama produtivo para o sistema de cogeração utilizando o Modelo A&F. No que tange o tratamento de resíduos, essa metodologia também utiliza o dispositivo ambiente em sua modelagem. Contudo, a internalização dos custos dos resíduos é inicialmente através da energia de Helmholtz ($E^A_{1:7}$). Por fim, fica evidente que o Modelo A&F tem o mesmo grau de complexidade dos modelos que utilizam apenas a desagregação da exergia em duas parcelas, acarretando para esses modelos um menor esforço computacional em sua modelagem.

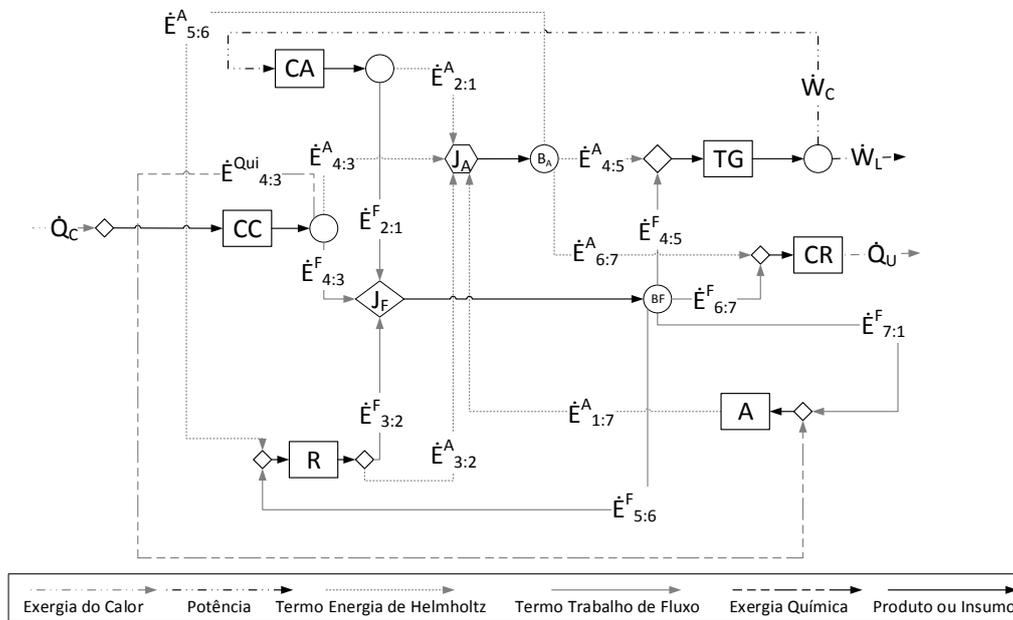


Figura 6. Diagrama produtivo para o sistema de cogeração utilizando o Modelo A&F.

5. Resultados

Os modelos de alocação de custos apresentados neste trabalho foram empregados com o objetivo de determinar os custos monetários e exergéticos unitário da potência líquida e do calor útil. Independentemente do método de alocação, os resultados são um par ordenado de custo monetário ou exergético unitário para ambos os produtos finais ao longo de uma mesma reta solução. Assim, para cada modelo, quanto maior o custo exergético unitário do calor útil, menor o custo exergético unitário da potência líquida. Vale ressaltar que para os estudos onde a relação calor útil/potência líquida e a eficiência exergética global forem iguais, independente do tipo de sistema de cogeração, a reta solução será a mesma.

As Figuras 7 – 8 apresentam os custos monetários e exergéticos unitários para os 5 Modelos termoeconômicos aplicados ao sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa.

Pode-se observar que os resultados apresentam uma tendência linear (estão em uma única reta solução) o que implica em resultados coerentes do ponto de vista termoeconômico.

Ao analisar os resultados, tem-se que os custos para os Modelos UFS e H&S são iguais, o que já era esperado, uma vez que a principal diferença entre esses modelos encontra-se no tratamento de equipamentos dissipativos, como a válvula.

Especificamente em relação ao Modelo A&F, nota-se que os seus respectivos resultados apresentam um alto grau de similaridade com o Modelo E. O que é um resultado interessante, visto que para sistemas térmicos

onde não apresentam equipamentos dissipativos, o Modelo E é amplamente utilizado e aceito do ponto de vista científico.

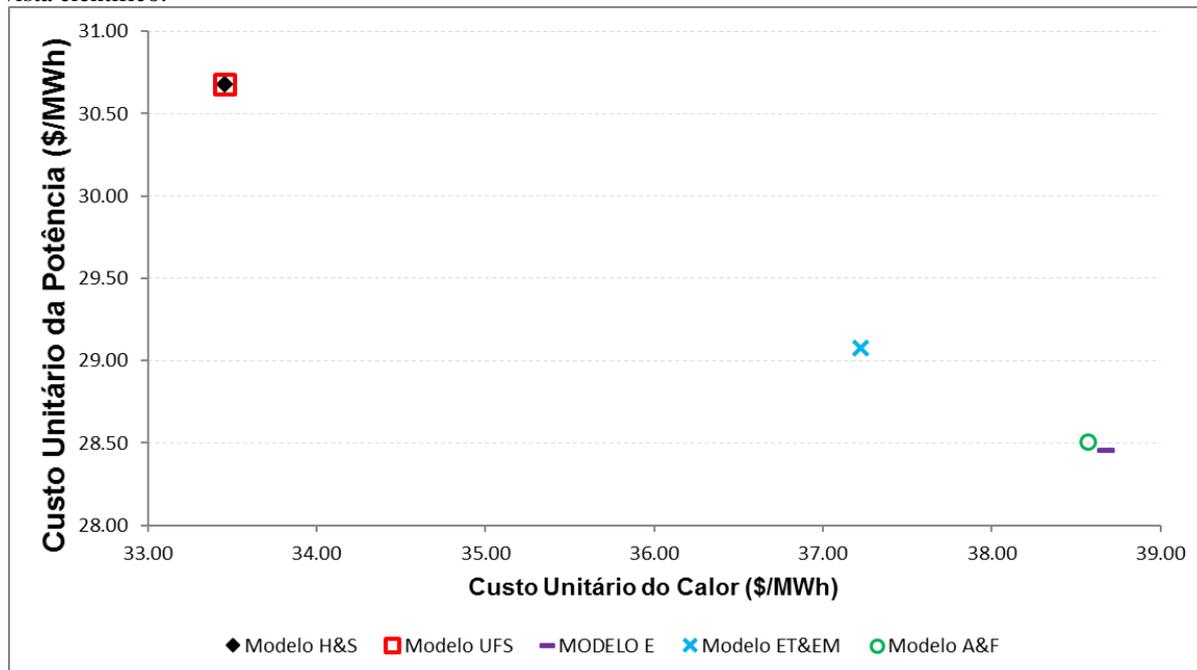


Figura 7. Custos monetários unitários dos produtos finais obtidos pelos modelos termoeconômicos.

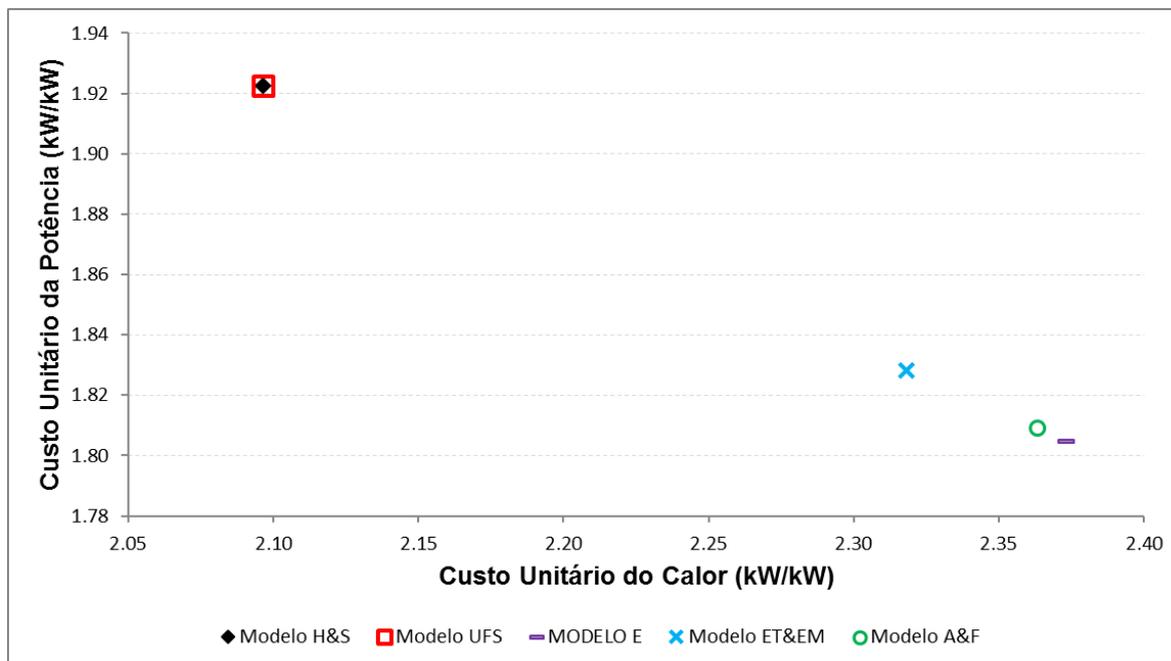


Figura 8. Custos exeréticos unitários dos produtos finais obtidos pelos modelos termoeconômicos.

Apesar de algumas diferenças, fazendo uma média entre os extremos chega-se a um valor de 29,58 (\$/MWh) para o custo unitário monetário da potência e 36,05 (\$/MWh) para o custo unitário monetário do calor. Esses valores estão próximos dos obtidos pelo Modelo A&F, respectivamente 28,51 (\$/MWh) para o

custo unitário monetário da potência e 38,57 (\$/MWh) para o custo unitário monetário do calor.

Analogamente chega-se a um valor médio de 1,86 (kW/kW) para o custo unitário exerético da potência e 2,23 (kW/kW) para o custo unitário exerético do calor, que são também próximos dos resultados do Modelo A&F respectivamente, 1,81 (kW/kW) para o

custo unitário exergetico da potência e 2,36 (kW/kW) para o custo unitário exergetico do calor.

Porém relativamente à média, os resultados de todas as metodologias estariam incluídos dentro de um desvio de $\pm 3,77\%$ e $\pm 7,28\%$ para o custo unitário monetário da potência e do calor respectivamente. Enquanto o desvio para o custo unitário exergetico da potência e do calor seriam respectivamente de $\pm 3,16\%$ e $\pm 6,24\%$.

6. Conclusão

Este trabalho apresentou a utilização de uma recente abordagem de desagregação de exergia em um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa, denominada Modelo A&F, que é uma alternativa consistente para desagregação total de sistemas na modelagem termoeconômica, principalmente quando há componentes dissipativos no sistema em análise. Porém, vale ressaltar que neste trabalho o foco foi direcionado para o tratamento de resíduos. Os dois termos de exergia física deste modelo têm um significado termodinâmico: energia de Helmholtz e trabalho de fluxo.

A título de comparação, cinco modelos termoeconômicos foram utilizados, resultando assim, em cinco pares ordenados de custo monetário e exergetico unitário de calor e da potência respectivamente. Vale ressaltar que todos os pontos estão presentes em uma reta solução, o que leva a concluir uma coerência do ponto de vista termoeconômico dos modelos apresentados.

Todos os modelos apresentam abordagens para o tratamento de resíduos, o Modelo E, e E^T & E^M internalizam os custos dos resíduos proporcionais aos insumos da caldeira e da turbina a gás. Já os modelos H&S e UFS utilizam o dispositivo ambiente para fechar o ciclo e a internalização começa por esse dispositivo, mais especificamente pelo seu produto, a parcela entrópica. Já o recém-criado Modelo A&F também utiliza o dispositivo ambiente, através do seu respectivo produto, porém a sua internalização inicia-se pela parcela da energia de Helmholtz.

Os resultados dos custos apresentaram uma pequena variação em relação a um valor médio de custos, para ambos os custos unitários, o que leva a uma interpretação de melhoria na precisão dos resultados ao invés de uma grande diferença entre as metodologias no que tange o tratamento de resíduos para essa planta. É importante ressaltar que o Modelo A&F apresenta valores próximos ao Modelo E, o que intensifica a sua validação termoeconômica como um modelo coerente do ponto de vista termodinâmico e econômico.

Por fim, além de ter aplicado o Modelo A&F ao sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa e comparado os seus resultados com as metodologias convencionais, este trabalho apresentou essa recente abordagem para desagregação de exergia física como uma alternativa coerente e consistente para resolver um difícil problema em termoeconomia relacionado ao

tratamento de resíduos dos sistemas térmicos, além de apresentar pequena complexidade na modelagem termoeconômica, uma vez que a desagregação de exergia física é realizada em dois termos.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES), a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), o Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil) e à Usina Termelétrica Viana S.A. - TEVISA pelo apoio financeiro.

8. Referência

- [1] Lozano MA, Valero A. Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems. ASME, NEW YORK, NY, (USA) 1993;30:311–20.
- [2] Valero A. Exergy accounting: Capabilities and drawbacks. Energy 2006;31:164–80. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.054>.
- [3] Valero A, Serra L, Uche J. Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoeconomics. Part I: Theory. J Energy Resour Technol 2006;128:1–8. <https://doi.org/10.1115/1.2134732>.
- [4] 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>.
- [5] Arena AP, Borchiellini R. Application of different productive structures for thermoeconomic diagnosis of a combined cycle power plant. International Journal of Thermal Sciences 1999;38:601–12. [https://doi.org/10.1016/S0035-3159\(99\)80040-3](https://doi.org/10.1016/S0035-3159(99)80040-3).
- [6] Valero A, Lozano MA, Serra L, Tsatsaronis G, Pisa J, Frangopoulos CA, et al. CGAM problem: Definition and conventional solution. Energy 1994;19:279–86. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90112-0).
- [7] Frangopoulos CA. Thermo-economic functional analysis and optimization. Energy 1987;12:563–71. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(87\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0360-5442(87)90097-1).
- [8] Torres C productive structure and thermoeconomic theories of system optimization, Serra L, Valero A, Lozano MA. The productive structure and thermoeconomic theories of system optimization. ME'96: International Mechanical Engineering

- Congress & Exposition (ASME WAN'96), 1996, p. 429–36.
- [9] Agudelo A, Valero A, Torres C. Allocation of waste cost in thermoeconomic analysis. *Energy* 2012;45:634–43. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.034>.
- [10] 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.
- [11] Morosuk T, Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy* 2008;33:890–907. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.012>.
- [12] Morosuk T, Tsatsaronis G. Splitting physical exergy: Theory and application. *Energy* 2019:698–707.
- [13] Santos JJCS, Nascimento MAR, Lora EES. On The Thermoeconomic Modeling for Cost Allocation in a Dual-Purpose Power and Desalination Plant. *ECOS 2006 proceedings of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Creta: 2006*, p. 441–8.
- [14] 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.
- [15] Lourenço AB, Santos JJCS, Donatelli JLM. Thermoeconomic Modeling of a Simple Heat Pump Cycle: An Alternative Approach for Valve Isolation. In: Mitrović D, Laković M, editors. *SimTerm 2011 Proceedings of the 15th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia: 2011*, p. 453–446.
- [16] Lourenço AB, Nebra SA, Santos JJCS, Donatelli JLM. Application of an alternative thermoeconomic approach to a two-stage vapour compression refrigeration cascade cycle. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2015;37:903–13. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0210-7>.
- [17] Santos RG, Lourenço A, Faria PR, Belisário IC, Barone MA, Santos JJ. Um Estudo Comparativo entre o Recente Modelo A&F e as Metodologias Termoeconômicas Convencionais em um Sistema de Cogeração com Turbina a Vapor de Contrapressão e Válvula de By-Pass. *CONEM 2022 - Anais do XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2022. <https://doi.org/10.26678/ABCM.CONEM2022.CON22-0633>.
- [18] 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*, p. 1057–68.