

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.

Rodrigo Guedes dos Santos, rodrigo.guedes@ifes.edu.br^{1,2}

Atilio Barbosa Lourenço, atilio.lourenco@ufes.br²

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

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

Marcelo Aiolfi Barone, mabacz@gmail.com²

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

¹Instituto Federal do Espírito Santos (IFES), Vitória/ES – Brasil

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

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

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

Resumo: A termoeconomia é uma ciência que concilia conceitos termodinâmicos com econômicos. 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 exergeticos e monetários (originalmente) de produtos internos e finais em sistemas térmicos. Com o avanço dos estudos dessa ciência, que é mais aprofundada que uma análise exergetica de um sistema térmico, questões sobre o isolamento de equipamentos dissipativos e alocação de resíduos surgiram e permanecem abertas a discussões até os dias atuais. A fim de estudar sobre possíveis soluções, algumas metodologias termoeconômicas com base na desagregação da exergia física surgiram para isolar os dissipativos. Além disso, isso pode aumentar a precisão dos resultados, porém eleva a complexidade do modelo. Cada subsistema de um sistema térmico de uma planta deve ser tratado de maneira isolado, ou seja, ter produto e insumo definidos mediante a metodologia proposta balizada por conceitos termodinâmicos. Em termos gerais, caso não ocorra nenhum consumo ou produção de potência, é necessário ao menos duas parcelas da exergia capazes de definir fluxos produtivos considerados insumos e produtos. Uma metodologia abrangente aliada a um menor grau de complexidade associado é sempre um ponto de interesse e de estudo. Trabalhos anteriores já apresentaram uma melhora na precisão de resultados, porém aliados a aumento da complexidade na modelagem. Tendo isso em mente, este estudo tem como objetivo apresentar uma nova abordagem termoeconômica baseada na desagregação exergetica, capaz de isolar componentes dissipativos com menor complexidade de modelagem. Essa abordagem, chamada de Modelo A&F, desagrega a exergia física em apenas dois termos, a saber, energia de Helmholtz e trabalho de fluxo. Esses termos são avaliados do ponto de vista termoeconômico, através de uma alocação de custos em um sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass. Também é aplicado e comparado com outras metodologias termoeconômicas. Ao comparar os modelos, especificamente ao Modelo UFS, o Modelo A&F mostra uma redução na quantidade de fluxos de 25%, 27% em junções-bifurcações e de 12% em equações de custo, salientando assim uma menor complexidade.

Palavras-chave: modelo termoeconômico; alocação de custo; desagregação da exergia física; equipamento dissipativo; complexidade na modelagem.

1. INTRODUÇÃO

A termoeconomia é uma ciência que concilia conceitos termodinâmicos com econômicos. 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 exergeticos 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 (Lozano & Valero 1993), e a magnitude termodinâmica mais adequada para ser associada ao custo é a exergia, (Valero 2006), 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 (Valero et al. 2006).

De acordo com Lozano & Valero (1993), quanto mais profunda e detalhada for à 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. No entanto, há um consequente aumento na complexidade da modelagem termoeconômica (Arena & Borchiellini 1999).

Ao estudar termoeconômica percebe-se que alguns campos de atuações ainda encontram-se aberto para possíveis discussões científicas e o tratamento de equipamentos dissipativos é um desses tópicos. Uma vez que algumas metodologias termoeconômicas não são capazes de definir um propósito produtivo para equipamentos dissipativos como, válvulas, condensadores, intercooler, entre outros. Sendo assim, modelos termoeconômicos como o Modelo E precisam 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.

Frangopoulos (1983) apresentou uma elegante solução (neguentropia) para isolar o condensador em ciclos a vapor. No entanto, a neguentropia é um fluxo fictício (Torres et al. 1996). Embora esta proposta permitisse definir o insumo e o produto dos condensadores, já foi demonstrado que esta solução apresenta valores incomuns de custos exergeticos unitário, ou seja, inferiores à unidade (Agudelo et al. 2012; Santos et al. 2009a). Vale ressaltar que essa solução não permite definir o produto e insumo para válvulas e consequentemente não pode ser isolada no diagrama produtivo. A desagregação da exergia física em suas parcelas térmicas e mecânicas (Morosuk & Tsatsaronis 2008, 2019) é um modelo termoeconômico de desagregação de exergia física é muito utilizado por vários pesquisados, 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 exergeticos unitários, Santos et al. (2006, 2009b) abordaram o conceito e a magnitude da neguentropia em uma perspectiva diferente. Agora não mais com um fluxo fictícios e sim junto com a parcela entálpica da exergia. Ou seja, o Modelo H&S desagrega a exergia física em suas parcelas entálpicas ($H - H_0$) e entrópicas ($T_0S - T_0S_0$), ambas consideradas como termos da exergia física (Lourenço et al. 2014). 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 (Lourenço et al. 2011) 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 ($U - U_0$), trabalho de fluxo ($pV - p_0V_0$) e o termo entrópico ($T_0S - T_0S_0$). Lourenço et al. (2015) mostraram que a energia interna, o trabalho de fluxo e a entropia podem ser interpretados como termos de 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 de modelagem.

Em termos gerais, caso não ocorra nenhum consumo ou produção de potência, é necessário ao menos duas parcelas da exergia capazes de definir fluxos produtivos considerados insumos e produtos. Uma metodologia abrangente aliada a um menor grau de complexidade associado é sempre um ponto de interesse e de estudo. Trabalhos anteriores já apresentaram uma melhora na precisão de resultados, porém aliados a aumento da complexidade na modelagem. Tendo isso em mente, este estudo tem como objetivo apresentar uma nova abordagem termoeconômica baseada na desagregação exergetica, capaz de isolar componentes dissipativos com menor complexidade de modelagem. Essa abordagem, chamada de Modelo A&F, desagrega a exergia física em apenas dois termos, a saber, energia de Helmholtz e trabalho de fluxo. Esses termos são avaliados do ponto de vista termoeconômico, através de uma alocação de custos em um sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass. Também é aplicado e comparado com outras metodologias termoeconômicas. Ao comparar os modelos, o modelo A&F mostra uma redução na quantidade de fluxos, junções-bifurcações e de equações de custo em relação ao outros modelos, salientando assim uma menor complexidade ao comparar com outros modelos.

2. Desagregação da Exergia Física

A termoeconomia usa a desagregação da exergia física, proposta por Tsatsaronis, desde 1990 (Torres et al. 1996). De acordo com Lazzaretto & Tsatsaronis (2006), os diferentes tipos de desagregação da exergia aumentam a precisão dos resultados. Desconsiderando as energias cinética, potencial e outras formas de energia, a exergia física (E^{FIS}) é representada pela Eq. (1), onde não há qualquer arbitrariedade no seu equacionamento. O mesmo ocorre quando a exergia física é desagregada em seus termos energia de Helmholtz (Eq. (5)) e trabalho de fluxo (Eq. (6)) quando aplicado o Modelo A&F. Da Eq. (1), o termo entálpico e o termo entrópico do Modelo H&S são obtidos diretamente, sem arbitrariedades, de acordo com a exergia física.

$$\dot{E}_i^{FIS} = \dot{E}_i^H - \dot{E}_i^S = \dot{m}_i \cdot [(h_i - h_0) - T_0 \cdot (s_i - s_0)] \quad (1)$$

Aplicando a definição de entalpia específica, $h = u + Pv$, a Eq. (2) é escrita.

$$\dot{E}_i^{FIS} = \dot{m}_i \cdot \left\{ \left[(u_i + P_i \cdot v_i) - (u_0 + P_0 \cdot v_0) \right] - T_0 \cdot (s_i - s_0) \right\} \quad (2)$$

Rearranjando a Eq. (2), os três termos do Modelo UFS são obtidos e dados pela Eq. (3).

$$\dot{E}_i^{FIS} = \dot{E}_i^U + \dot{E}_i^F - \dot{E}_i^S = \dot{m}_i \cdot \left[(u_i - u_0) + (P_i \cdot v_i - P_0 \cdot v_0) - T_0 \cdot (s_i - s_0) \right] \quad (3)$$

O primeiro e o terceiro termos da Eq. (3) são combinados para escrever a Eq. (4).

$$\dot{E}_i^{FIS} = \dot{m}_i \cdot \left\{ \left[(u_i - T_0 \cdot s_i) - (u_0 - T_0 \cdot s_0) \right] + (P_i \cdot v_i - P_0 \cdot v_0) \right\} \quad (4)$$

A energia específica de Helmholtz de um sistema fechado sobre uma fonte de calor (reservatório a T_0) é dada por $a = u - T_0 s$. Isto pode ser aplicado para um estado “i” qualquer e o estado morto. As Eqs. (5) e (6) mostram o termo de energia de Helmholtz e o termo de trabalho de fluxo, respectivamente. Deste modo, a exergia física pode ser escrita na forma da Eq. (7), que representa o recente modelo de desagregação da exergia, chamado Modelo A&F.

$$\dot{E}_i^A = \dot{m}_i \cdot (a_i - a_0) = \dot{m}_i \cdot \left[(u_i - T_0 \cdot s_i) - (u_0 - T_0 \cdot s_0) \right] \quad (5)$$

$$\dot{E}_i^F = \dot{m}_i \cdot (P_i \cdot v_i - P_0 \cdot v_0) \quad (6)$$

$$\dot{E}_i^{FIS} = \dot{E}_i^A + \dot{E}_i^F \quad (7)$$

A exergia física desagregada em componentes térmicos e mecânicos, Modelo E^T & E^M , também é avaliada neste estudo. Baseado em (Morosuk & Tsatsaronis 2005, 2008, 2019; Tsatsaronis 1993), a Eq. (8) do termo de exergia térmica é definida ao longo de uma linha isobárica em P , do estado $[T, P]$ para o estado $[T_0, P]$. Por outro lado, na Eq. (9) o termo de exergia mecânica é definida ao longo de uma linha isotérmica em T_0 (temperatura no estado “0”), do estado $[T_0, P]$ para o estado $[T_0, P_0]$. Portanto, a entalpia específica auxiliar, h_m , e a entropia específica auxiliar, s_m , são definidas para o estado $[T_0, P]$.

$$E^T = \dot{m} \left[(h - h_m) - T_0 \cdot (s - s_m) \right] \quad (8)$$

$$E^M = \dot{m} \left[(h_m - h_0) - T_0 \cdot (s_m - s_0) \right] \quad (9)$$

3. MODELO TERMoeCONOMICO

A estrutura produtiva mostra a função produtiva dos subsistemas, pois indica claramente seus insumos e produtos, em termos de fluxos físicos ou produtivos. Convencionalmente, as metodologias termoeconômicas utilizam fluxos físicos ou produtivos para mostrar graficamente a conexão entre os subsistemas. Os diagramas produtivos são aplicados neste estudo, utilizando apenas fluxos produtivos. Unidades fictícias (junções e bifurcações) são utilizadas para auxiliar na elaboração dos diagramas produtivos. Após a definição da estrutura produtiva, cada subsistema é representado por meio de um balanço de equação de custos relacionando uma grandeza termodinâmica e o custo unitário dos fluxos internos e produtos finais. O modelo matemático utiliza um conjunto de equações de custo em cada subsistema para calcular os custos unitários. Um modelo termoeconômico deve ser utilizado usando a Eq. (10).

$$\sum (k_{out} \cdot Y_{out}) - \sum (k_{in} \cdot Y_{in}) = k_F \cdot E_F \quad (10)$$

Na Eq. (10), E_F é o consumo de exergia dos recursos externos (em kW); e Y_{out} e Y_{in} significam a magnitude termodinâmica genérica dos fluxos internos na entrada e saída de cada subsistema. A solução do conjunto de equações resulta nos custos exergéticos unitários de cada fluxo interno e de cada produto final. Neste trabalho, Y assume as magnitudes termodinâmicas, como potência (W), calor útil (Q), exergia total (E), termo de energia de Helmholtz (E^A), termo de trabalho de fluxo (E^F), termo de energia interna (E^U) e termo entrópico (E^S).

As incógnitas k_{out} e o k_{in} representam o custo exergético unitário dos fluxos internos na saída e na entrada de cada subsistema; o custo horário do subsistema, referente ao custo de capital, operação e manutenção, deve ser zero ($Z = 0$). O custo exergético unitário de um fluxo é a quantidade de unidade exergética externa necessária para obter uma unidade desse fluxo, significando que o custo exergético unitário de um fluxo é uma medida da eficiência termodinâmica do processo de produção ao produzir esse fluxo (Valero et al. 2006).

Cada subsistema fornece uma única equação de custo, portanto, são necessárias equações auxiliares. Modelos termoeconômicos baseados nos diagramas produtivos consideram o critério de multiproduto (Frangopoulos 1987, 1994;

Wang & Lior 2007), onde os fluxos produtivos que saem da mesma unidade produtiva devem ter o mesmo custo unitário.

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso escolhido para ser estudado nessa pesquisa é o sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass, apresentado na Fig. 1. A estrutura física é composta por um gerador de vapor (GV), uma válvula (equipamento dissipativo), uma turbina a vapor (TV) e seu gerador elétrico (GE), uma bomba (B) e o Processo industrial (Proc).

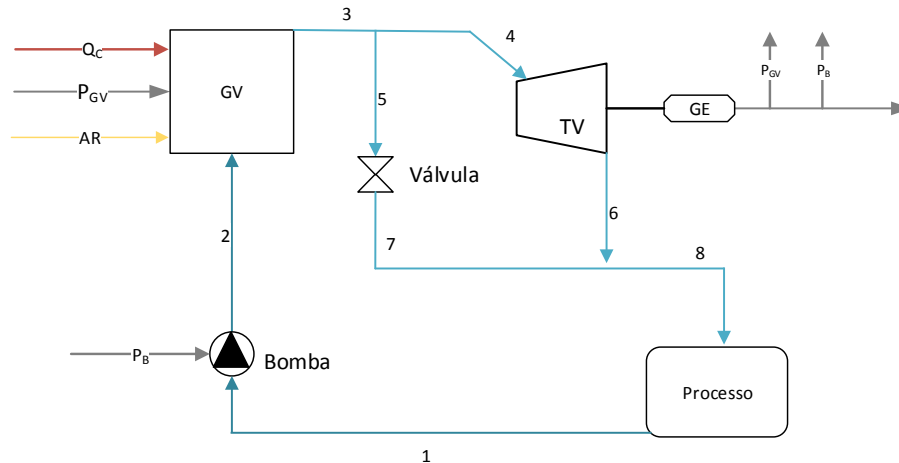


Figura 1. Estrutura Física do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass.

A Tab. 1 apresenta os principais parâmetros dos fluxos físicos sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass. O processo produz 4120,93 kW de calor útil (Q_U) em base exergética e o consumo de combustível (Q_C), em base exergética, é de 20321,19 kW.

Tabela 1. Principais parâmetros dos fluxos físicos do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass.

FLUXOS	m [kg/s]	p [bar]	T [°C]	v [m ³ /kg]	e [kJ/kg]	e^U [kJ/kg]	e^H [kJ/kg]	e^S [kJ/kgK]	e^A [kJ/kg]	e^F [kJ/kg]	e^T [kJ/kg]	e^M [kJ/kg]
1	6.39	1.01	60.20	0.00	8.13	147.17	147.17	0.47	8.13	0.00	8.13	0.00
2	6.39	26.01	60.70	0.00	10.85	148.81	151.35	0.47	8.31	2.54	8.34	2.51
3	6.39	25.00	330.00	0.11	1068.73	2712.15	2975.87	6.40	805.01	263.71	1066.32	2.40
4	3.19	25.00	330.00	0.11	1068.73	2712.15	2975.87	6.40	805.01	263.71	1066.32	2.40
5	3.19	25.00	330.00	0.11	1068.73	2712.15	2975.87	6.40	805.01	263.71	1066.32	2.40
6	3.19	2.00	136.00	0.93	595.59	2450.06	2635.02	6.84	410.62	184.96	595.49	0.10
7	3.19	2.00	304.30	1.33	728.35	2710.71	2975.87	7.54	463.19	265.16	728.25	0.10
8	6.39	2.00	220.00	0.89	653.24	2628.82	2806.02	7.22	476.04	177.20	653.14	0.10

Nas Figs. 2-8 pode-se observar os diagramas produtivos para as metodologias termoeconômicas avaliadas nesse trabalho. Como já dito, algumas metodologias termoeconômicas não conseguem tratar alguns equipamentos dissipativos, sendo que a planta escolhida para ser analisada possui a válvula de expansão. Assim para as metodologias E, E^T & E^M e H&S é necessário que o termoeconomicista decida em qual equipamento a válvula deverá ser agrupada, com a finalidade de decidir um produto para esse subsistema. Apesar de ser uma decisão arbitrária, em nível de comparação com a nova metodologia, esse presente trabalho optou por juntar a válvula com o processo industrial (Proc-VLV) ou com a turbina (TV-VLV), o que gerou dois resultados para essas metodologias (E, E^T & E^M e H&S). Figura. 2 mostra o diagrama produtivo do sistema de cogeração em questão, utilizando o Modelo E. Esse modelo de exergia total utiliza a exergia física total para avaliar os fluxos no diagrama produtivo. Em relação às figuras, a Fig. 2a) tem um subsistema denominado TV-VLV que é exatamente a união da Válvula com a Turbina a vapor, enquanto na Fig. 2b) a válvula está junto com o processo.

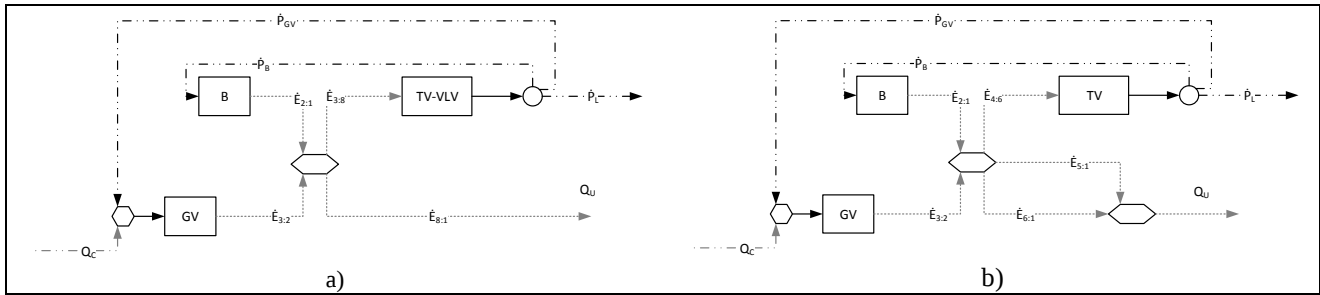


Figura 2. Diagramas produtivos do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo E: a) TV-VLV b) válvula junto com o processo.

A Fig. 3 apresenta o diagrama produtivo para o Modelo Termoeconômico $E^T \& E^M$, com a válvula junta à turbina a vapor (TV-VLV). Observa-se que agora os insumos e produtos de cada equipamento são avaliados através das parcelas da exergia. Para esse modelo a exergia física total foi desagregada nas suas parcelas de exergia térmica (E^T) e exergia mecânica (E^M). Porém, através dessa desagregação não é possível definir um produto para o equipamento dissipativo em questão (Válvula). Sendo assim, para esse modelo, foi seguida a mesma lógica do modelo anterior. Em um primeiro momento foi decidido por juntar a válvula à turbina (TV-VLV) e posteriormente ao processo.

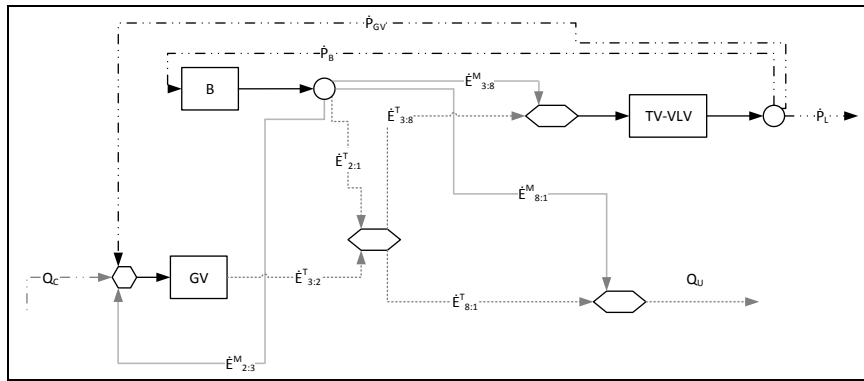


Figura 3. Diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo $E^T \& E^M$ (TV-VLV).

A Fig. 4 também apresenta o diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo $E^T \& E^M$, porém agora a válvula está agrupada ao processo industrial (Proc - VLV). É importante destacar mais uma vez que a decisão de agrupar a válvula é uma escolha pessoal do pesquisador e que poderia ser feita com qualquer outro equipamento da planta.

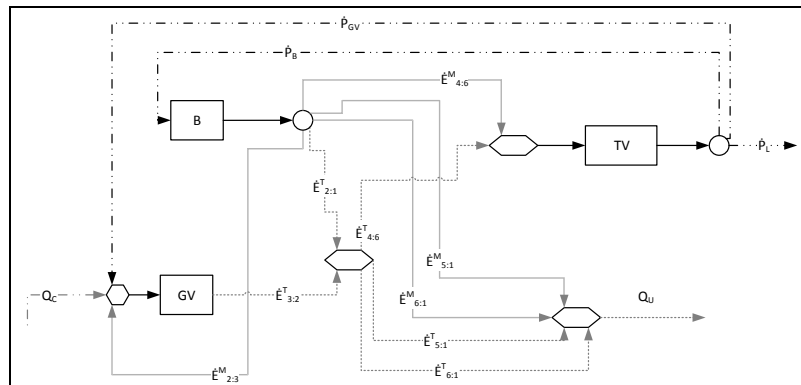


Figura 4. Diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo $E^T \& E^M$ (Proc-VLV).

O Modelo H&S desagrega a exergia física em sua parcela entálpica (E^H) e entrópica (E^S). Diferentes dos outros modelos apresentados até o presente momento nesse trabalho o Modelo H&S consegue tratar vários equipamentos dissipativos como trocadores de calor e condensadores. Porém, não é capaz de definir um produto para nenhum tipo de válvula. Sendo assim, essa metodologia foi estudada seguindo as mesmas arbitrariedades impostas aos outros modelos. A Fig. 5 apresenta o diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo H&S, onde a válvula está junto à turbina a vapor (TV-VLV).

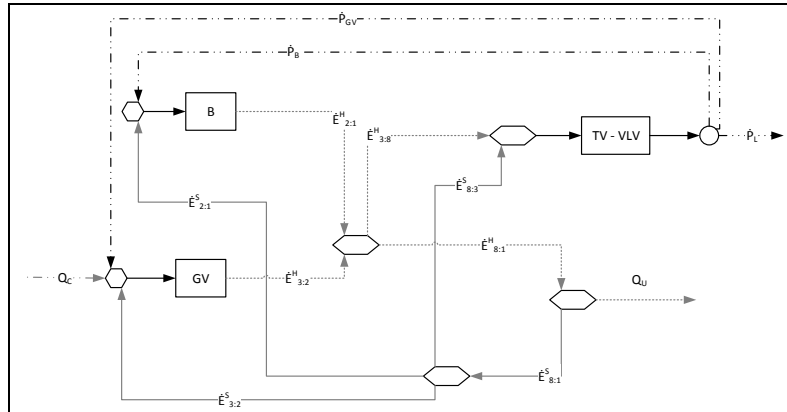


Figura 5. Diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo H&S (TV-VLV).

Figura 6. apresenta o diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo H&S, sendo a válvula unida ao processo (Proc-VLV).

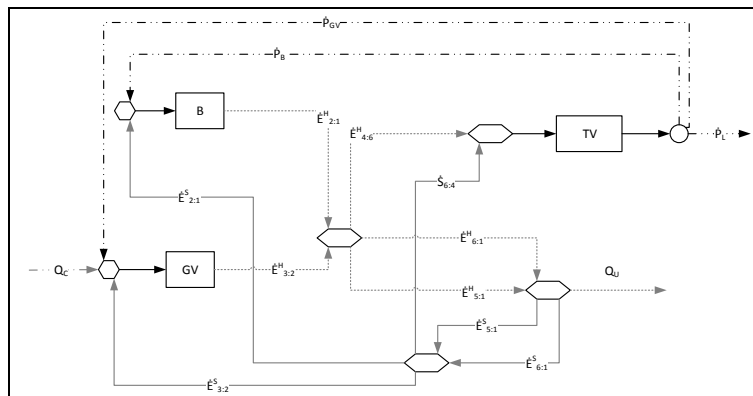


Figura 6. Diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo H&S (Proc-VLV).

A Fig. 7 representa o diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo UFS. Como já explicado, este modelo utiliza a exergia física desagregada no termo de energia interna (E^U), termo de trabalho de fluxo (E^F) e termo entrópico (E^S). Nota-se que diferente dos outros modelos apresentados até o momento, a válvula está isolada no diagrama produtivo. O Modelo UFS é capaz, através da desagregação de exergia proposta nesse modelo, definir um insumo e produto para todos os equipamentos do sistema de cogeração estudado. O que é uma grande vantagem, principalmente se levarmos em consideração problemas de diagnóstico e/ou otimização. Sendo assim, a sua utilização é justificada apesar do aumento do esforço computacional exigido e da complexidade de modelagem quando comparado com o Modelo H&S. O que ocorre, para ser mais específico, é que existe mais um termo de exergia para cada equipamento nos diagramas produtivos para definir insumo e produto, quando comparado ao Modelo H&S.

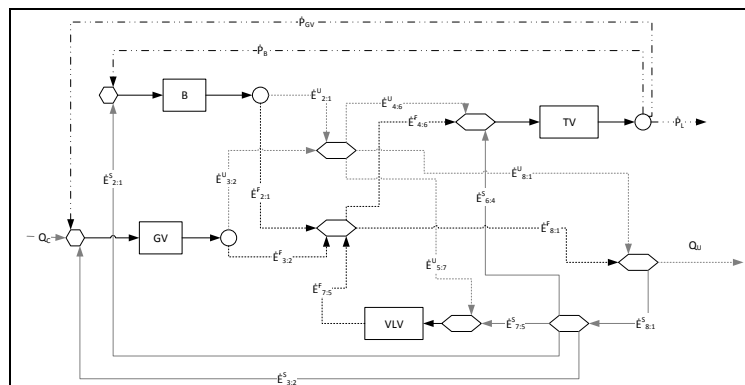


Figura 7. Diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo UFS.

Figura 8 representa o diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo A&F. Este pode isolar a válvula e definir seu insumo e produto através dos termos de energia de Helmholtz (E^A) e de trabalho de fluxo (E^F). Assim, é capaz de lidar adequadamente com componentes dissipativos sem arbitrariedades e com o mesmo grau de complexidade do Modelo H&S, reservando todas as características dessas abordagens. O Modelo A&F tem vantagens sobre os Modelos E, E^T & E^M e H&S devido à sua capacidade de isolar válvulas em qualquer sistema. Quando comparado ao UFS, ambos podem isolar todos os componentes dissipativos, mas o Modelo A&F realiza isso por meio de uma desagregação de exergia mais simples em apenas dois termos, enquanto o UFS usa três termos de desagregação de exergia física. Consequentemente, a vantagem do Modelo A&F é a sua menor complexidade aliado a sua capacidade de tratar equipamentos dissipativos.

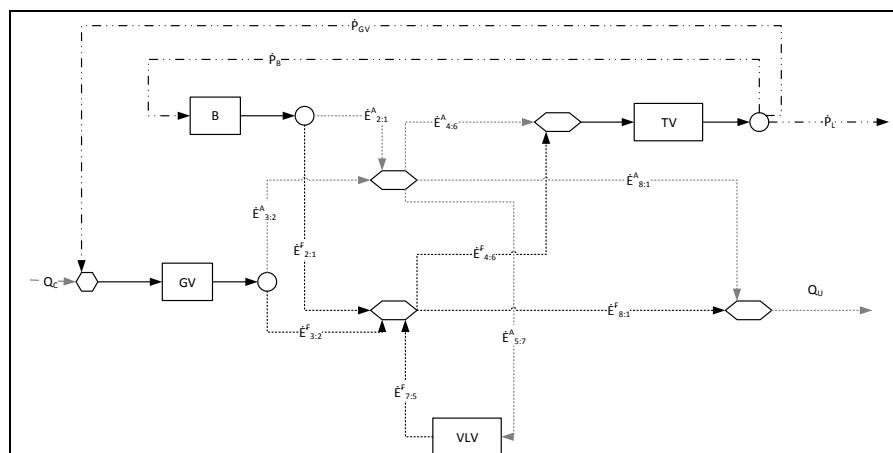


Figura 8. Diagrama produtivo do sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass usando o Modelo A&F.

Ao comparar os diagramas produtivos, o Modelo A&F reduziu em 25% o número de fluxos, em 27% a quantidade de junções-bifurcações e em 12 % as equações de custo em relação ao Modelo UFS. Assim, a complexidade e os esforços computacionais no A&F são significativamente menores do que no Modelo UFS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos de alocação de custos foram empregados com o objetivo de determinar o custo exergético unitário da potência líquida e do calor útil. Independentemente do método de alocação, os resultados são um par ordenado de custo 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.

A Fig. 9 mostra a reta solução com os resultados obtidos pelos oito modelos para o sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pas apresentado neste trabalho. Vale ressaltar que os oito pontos da Fig. 9 são os pares ordenados, de custo exergético unitário de calor útil e potência líquida, estimados pelas metodologias. Nota-se que estão em uma única reta solução o que implica em resultados coerentes do ponto de vista termoeconômico. Para os casos que foram necessários a tomada de decisão do termoeconômico pode-se observar tendências, para os casos TV-VLV o custo da potência ficou sobrecarregado em relação ao calor, já para os casos Proc-VLV sobrecarregou o custo do calor em detrimento da potência. Isso pode ser interpretado pelo fato de que ao alocar a válvula juntamente com a turbina (onde produz potência) seus custos vão para a potência, e quando a válvula é alocada junta ao processo (onde produz calor útil), seus custos vão para o calor. Em relação aos resultados do Modelo A&F, constata-se que os seus valores de custos estão em um intervalo intermediário aos valores extremos.

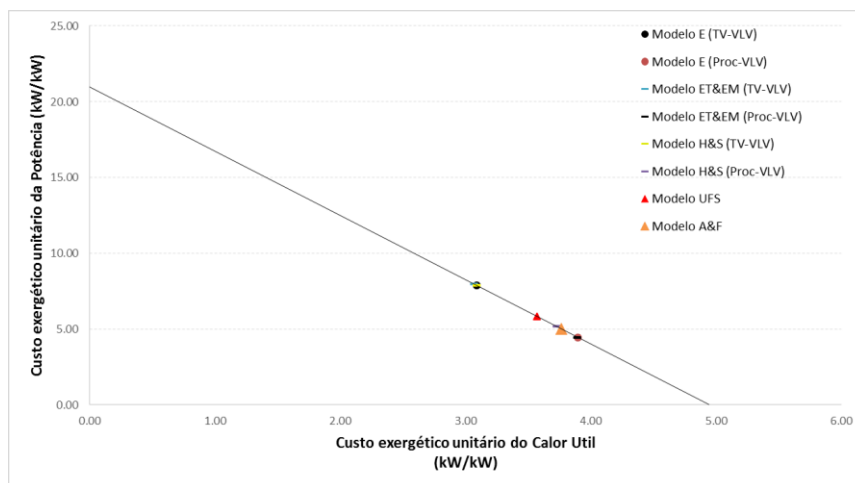


Figura 9. Custos exergéticos unitários dos produtos finais obtidos pelos oito modelos.

A Tab. 2 apresenta de forma detalha a diferença percentual do Modelo A&F para todas as outras sete metodologias. Ao analisar diretamente em relação ao Modelo UFS, que é o único junto ao A&F, que consegue tratar o equipamento dissipativo tem-se que o custo exergético unitário do calor útil é 14,23% maior e que o custo exergético unitário da potência líquida é 5,45% menor. Ambos os modelos encontra-se próximo da parte central da reta solução. Vale lembrar que o Modelo A&F é menos complexo do que o Modelo UFS.

Tabela 2. A diferença (%) entre os modelos e o modelo A&F

Modelo comparado com A&F	DIFERENÇA (%)	
	Custo Exergético Unitário da Potência	Custo Exergético Unitário do Calor
Modelo E (TV-VLV)	36,62	21,84
Modelo E (Proc-VLV)	12,78	3,36
Modelo E ^T &E ^M (TV-VLV)	37,33	22,66
Modelo E ^T &E ^M (Proc-VLV)	12,35	3,26
Modelo H&S (TV-VLV)	36,62	21,84
Modelo H&S (Proc-VLV)	3,01	1,01
Modelo UFS	14,23	5,45

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a utilização de uma recente abordagem de desagregação de exergia em um sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass, 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. 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 com três diferentes níveis de desagregação de exergia física e para alguns desses, duas opções de análise da válvula. Resultando assim, em oito pares ordenados de custo exergético unitário de Calor e da Potência. Vale ressaltar que todos os pontos estão presentes na reta solução, o que leva a concluir uma coerência do ponto de vista termoeconômico dos modelos apresentados. Contudo, apenas os Modelos UFS e A&F são capazes de tratar a válvula de forma isolada, revelando desta maneira uma larga vantagem na escolha desses modelos, quando a planta apresentar válvulas, uma vez que esses modelos são capazes de definir insumo e produto para esse equipamento. No entanto, a complexidade e os esforços computacionais no Modelo A&F podem ser considerados muito menores que no Modelo UFS, devido à diminuição do número de parcelas da exergia utilizadas e consequentemente um menor número de fluxos produtivos e junções/bifurcações englobadas na análise.

Este trabalho apresenta o recente Modelo A&F, como uma alternativa de desagregação de exergia física (mantendo a grande maioria das características do Modelo UFS) e salienta que pode ser utilizado para plantas a vapor que tenham equipamentos dissipativos. É fundamental dizer que o modelo A&F não foi proposto para competir entre todas as abordagens da termoeconomia; reconhecemos que cada metodologia possui o seus campos de aplicações, para os quais possuem comprovadas e eficientes soluções. Por fim, além de ter aplicado o Modelo A&F ao sistema de cogeração com turbina a vapor de contrapressão e válvula de by-pass 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 e

isolamento de equipamentos dissipativos, e reduzir a complexidade na modelagem termoeconômica, uma vez que a desagregação de exergia física será realizada em dois termos.

7. AGRADECIMENTOS

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

8. REFERÊNCIAS

- Agudelo, A., Valero, A., & Torres, C. (2012). Allocation of waste cost in thermoeconomic analysis. *Energy*, **45**(1), 634–643.
- Arena, A. P., & Borchellini, R. (1999). Application of different productive structures for thermoeconomic diagnosis of a combined cycle power plant. *International Journal of Thermal Sciences*, **38**(7), 601–612.
- Bhering Trindade, A., Luiza Grillo Renó, M., José Rúa Orozco, D., Martín Martinez Reyes, A., Aparecido Vitoriano Julio, A., & Carlos Escobar Palacio, J. (2021). Comparative analysis of different cost allocation methodologies in LCA for cogeneration systems. *Energy Conversion and Management*, **241**, 114230.
- d'Accadia, M. D., & Rossi, F. de. (1998). Thermoeconomic optimization of a refrigeration plant. *International Journal of Refrigeration*, **21**(1), 42–54.
- Evans, R. B. (1980). Thermoeconomic isolation and essergy analysis. *Energy*, **5**(8–9), 804–821.
- Fortes, A. F. C., Carvalho, M., & da Silva, J. A. M. (2018). Environmental impact and cost allocations for a dual product heat pump. *Energy Conversion and Management*, **173**, 763–772.
- Frangopoulos, C. A. (1983). *Thermoeconomic functional analysis: A method for Optimal Design or improvement of Complex Thermal Systems*, Georgia Institute of Technology.
- Frangopoulos, C. A. (1987). Thermo-economic functional analysis and optimization. *Energy*, **12**(7), 563–571.
- Frangopoulos, C. A. (1994). Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*, **19**(3), 323–342.
- Lazzaretto, A., & Tsatsaronis, G. (2006). SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, **31**(8–9), 1257–1289.
- Lorenzoni, R. A., Conceição Soares Santos, J. J., Barbosa Lourenço, A., & Marcon Donatelli, J. L. (2020). On the accuracy improvement of thermoeconomic diagnosis through exergy disaggregation and dissipative equipment isolation. *Energy*, **194**, 116834.
- Lourenço, A. B., Nebra, S. A., & Santos, J. J. C. S. (2014). Another Perspective on the Physical Exergy of a Flow. In *ECOS 2014 proceedings of the 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Vol. 1, Turku, Finland, pp. 1–11.
- Lourenço, A. B., Nebra, S. A., Santos, J. J. C. S., & Donatelli, J. L. M. (2015). 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*, **37**(3), 903–913.
- Lourenço, A. B., Santos, J. J. C. S., & Donatelli, J. L. M. (2011). Thermoeconomic Modeling of a Simple Heat Pump Cycle: An Alternative Approach for Valve Isolation. In D. Mitrović & M. Laković, eds., *SimTerm 2011 Proceedings of the 15th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia*, Sokobanja, Serbia, pp. 453–446.
- Lozano, M. A., & Valero, A. (1993). Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems. *ASME, NEW YORK, NY,(USA)*, **30**, 311–320.
- Mendes, T., Venturini, O. J., da Silva, J. A. M., Orozco, D. J. R., & Pirani, M. J. (2020). Disaggregation models for the thermoeconomic diagnosis of a vapor compression refrigeration system. *Energy*, **193**, 116731.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2011). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 7th edn, John Wiley and Sons.
- Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2005). Graphical models for splitting physical exergy. In G. Tsatsaronis, J. E. Hustad, T. Gundersen, A. Rosjorde, & S. Kjelstrup, eds., *ECOS 2005 proceedings of the 18th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems*, Trondheim, Norway: Tapir Academic Press, pp. 377–384.
- Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2008). A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy*, **33**(6), 890–907.
- Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2019). Splitting physical exergy: Theory and application. *Energy*, 698–707.
- Santos, J. J. C. S., Nascimento, M. A. R. do, Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., & Silva, J. A. M. da. (2009a). On the treatment of dissipative components and residues in thermoeconomic modeling. In *ECOS 2009 proceedings of the 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Vol. 1, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, pp. 63–72.
- Santos, J. J. C. S., Nascimento, M. A. R., & Lora, E. E. S. (2006). On The Thermoeconomic Modeling for Cost Allocation in a Dual-Purpose Power and Desalination Plant. In *ECOS 2006 proceedings of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Creta,

pp. 441–448.

- Santos, J. J. C. S., Nascimento, M. A. R., Lora, E. E. S., & Martínez-Reyes, A. M. (2009b). On the Negentropy Application in Thermoeconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? *International Journal of Thermodynamics*, **12**(4), 163–176.
- Santos, R. G., Faria, P. R., Barone, M. A., Lorenzoni, R. A., Orozco, D. J. R., & Santos, J. J. C. S. (2021). On the Thermoeconomic Diagnosis through the Localized Physical Exergy Disaggregation for Dissipative Component Isolation. In *Proceedings of Ecos 2021 - The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Vol. 1, Taormina - Italy, pp. 1–12.
- Santos, R. G., Faria, P. R., Belisario, I. C., Barrone, M. A., & Santos, J. J. C. (2020). On the Localized Physical Exergy Disaggregation for Dissipative Component Isolation in Thermoeconomics. *Revista de Engenharia Térmica*, **19**(2), 63–69.
- Torres, C. productive structure and thermoeconomic theories of system optimization, Serra, L., Valero, A., & Lozano, M. A. (1996). The productive structure and thermoeconomic theories of system optimization. In *ME'96: International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME WAM'96)*, pp. 429–436.
- Tsatsaronis, G. (1993). Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, **19**(3), 227–257.
- Valero, A. (2006). Exergy accounting: Capabilities and drawbacks. *Energy*, **31**(1), 164–180.
- Valero, A., Serra, L., & Uche, J. (2006). Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoeconomics. Part I: Theory. *Journal of Energy Resources Technology*, **128**(1), 1–8.
- Wang, Y., & Lior, N. (2007). Fuel allocation in a combined steam-injected gas turbine and thermal seawater desalination system. *Desalination*, **214**(1–3), 306–326.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A COMPARATIVE STUDY BETWEEN THE RECENT A&F MODEL AND THE CONVENTIONAL THERMOECONOMIC METHODOLOGIES IN A COGENERATION SYSTEM WITH A BACKPRESSURE STEAM TURBINE AND BY-PASS VALVE.

Rodrigo Guedes dos Santos, rodrigo.guedes@ifes.edu.br^{1,2}

Atilio Barbosa Lourenço, atilio.lourenco@ufes.br²

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

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

Marcelo Aiolfi Barone, mabacz@gmail.com²

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

¹Federal Institute of Espírito Santo (IFES), Vitória/ES – Brasil

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

³Federal University of Espírito Santo (UFES), Cariacica/ES - Brasil

⁴Federal Institute of Espírito Santo (IFES), São Mateus/ES - Brasil

Resumo: Thermoeconomic is a science that combines thermodynamic and economic concepts. It can be divided into three fields of application: cost allocation, diagnosis, and optimization. The proposed methodologies were sedimented through the calculations of exergetic and monetary unit costs (originally) of internal and final products in thermal systems. With the consolidation of this science, which is more in-depth than an exergetic analysis of a thermal system, questions about dissipative equipment and waste allocation have arisen and remain open to discussions to this day. In order to study possible solutions, some thermoeconomic methodologies based on physical exergy disaggregation emerged to isolate the dissipative equipment. In addition, this can increase the accuracy of the results, but it increases the complexity of the model. Each subsystem of a plant's thermal system must be treated in isolation, that is, have product and fuel defined by means of the proposed methodology based on thermodynamic concepts. In general, terms, if there is no consumption or production of power, it is necessary for at least two exergy parts capable of defining productive flows considered fuels and products. What would come close to being optimal in terms of results would be a methodology that was as comprehensive as possible, but with a lower degree of associated complexity. Previous works have already shown an improvement in the accuracy of results but allied to an increase in modeling complexity. With this in mind, this study aims to present a new thermoeconomic approach based on exergetic disaggregation, capable of isolating dissipative components with less modeling complexity. This approach, called the A&F Model, disaggregated physical exergy into just two terms, called Helmholtz energy and flow work. These terms are evaluated from a thermoeconomic point of view, through an allocation of costs in a cogeneration system with a backpressure steam turbine and a by-pass valve. It is also applied and compared with other thermoeconomic methodologies. When comparing the models, the A&F model shows a reduction in the number of flows, junctions-bifurcations, and cost equations in relation to the other models, thus highlighting a lower complexity when compared to other models.

Palavras-chave: Thermoeconomic model; cost allocation; physical exergy disaggregation; dissipative components; modeling complexity