

MODELAGEM TERMoeCONOMICA

Conceito

A modelagem termoeconômica tem como finalidade obter um sistema de equações de custos que representa matematicamente o processo de formação de custos na planta. Para isso se usam os conceitos da Termoeconomia. Existem várias metodologias termoeconômicas. O ponto chave da modelagem termoeconômica está na maneira com que se define a estrutura produtiva. O objetivo primordial é definir a estrutura produtiva que descreve o processo de formação de custos.

Definições

A Termoeconomia, termo proposto em 1962 por Tribus e Evans, combina a economia e a termodinâmica, aplicando os conceitos de ambas, de modo a fornecer aos analistas, projetistas e operadores informações não disponíveis na análise energética e econômica convencional, mas cruciais na análise, projeto e operação de sistemas. Combina matematicamente a segunda lei da termodinâmica com a economia, mas considerações como a poluição, podem ser incorporadas.

A maioria dos analistas concorda que a exergia é a propriedade termodinâmica mais adequada para associar ao custo porque contém informações da segunda lei da termodinâmica e leva em conta a qualidade da energia, localizando e quantificando as irreversibilidades. São inúmeros os motivos apresentados por diversos autores para justificar o uso da exergia em termoeconomia, entre os quais: a exergia é a parte nobre da energia (sua capacidade de produzir trabalho), é a exergia que é usada num processo e não a energia, a equivalência entre fluxos de naturezas distintas deve estabelecer-se em função das suas exergias e que a obtenção de um fluxo a partir de outro, usando dispositivos reversíveis trocando somente massa e energia com o ambiente de referência, só é possível se ambos têm a mesma exergia. Por definição, a exergia de um fluxo é o trabalho máximo que se pode gerar se o mesmo passar por um processo reversível desde o estado que se encontra até o estado de equilíbrio com o meio ambiente.

O custo de um determinado fluxo numa planta representa a quantidade de recursos externos que precisa ser suprida à planta para produzir este fluxo. Estes recursos externos podem ser quantificados em unidades monetárias ou exergéticas, etc., dependendo se o objetivo da análise é obter o custo monetário ou o custo exergético, etc. deste fluxo. O custo monetário de um determinado fluxo é a quantidade de recursos monetários externos que são necessários para produzir este fluxo. Numa planta térmica, os recursos monetários incluem o custo dos fluxos externos, como o combustível e a água de reposição, e também os custos de investimento, operação e manutenção da planta. O custo monetário unitário de um fluxo é a quantidade de recursos monetários externos que são gastos para produzir uma unidade deste fluxo. De forma análoga ao custo monetário unitário, a termoeconomia define também o custo exergético unitário de um fluxo interno como a quantidade de exergia externa (geralmente exergia do combustível) que precisa ser suprida à planta térmica para produzir uma unidade deste fluxo.

A estrutura produtiva é um passo importante para a modelagem termoeconômica quando acontece, usando tabelas ou diagramas, a definição da função de cada equipamento o que implica em quantificar o produto e o insumo do mesmo, usando magnitudes termodinâmicas. Neste processo são levados em conta conceitos importantes da termoeconomia como: processo de formação de custo dos produtos, subprodutos e resíduos, insumo ou recurso, produto ou propósito, causa e efeito, eficiência, etc.

História

A Termoeconomia é um termo proposto em 1962 por Tribus e Evans. Porém, a origem da termoeconomia é atribuída aos anos 50 com os trabalhos pioneiros de Tribus, Evans, El-Sayed, Gaggioli, Reistad e Obert (von Spakovsky, 1994), embora parte destes trabalhos aponta Keenan como o pioneiro neste campo em 1932 ao usar a exergia na alocação de custos na cogeração.

O florescimento da Termoeconomia aconteceu nos anos 80, quando surgiram novas metodologias com novos conceitos, nomenclaturas, definições e aplicações. Foi durante este período que surgiu o termo Exergoeconomia, proposto por Tsatsaronis em 1985, para designar a técnica que combina o conceito de exergia com o conceito de custo (economia). A exergia e a neguentropia eram as magnitudes mais usadas em Termoeconomia. Neste caso, a Exergoeconomia pode ser considerada como uma vertente da Termoeconomia, uma vez que neguentropia não faz parte da exergia.

Além do florescimento de técnicas que combinam a termodinâmica e a economia (a Termoeconomia), os anos 80 marcam o início do ECOS (Eficiência, Custo, Otimização e Simulação), uma série de congressos anuais, um espaço anual onde desde 1987 vem se discutindo e apresentando os modernos aspectos focados para a aplicação da segunda lei da termodinâmica.

Percebendo que haviam surgido novas metodologias termoeconômicas, um grupo de especialistas interessados na disciplina (C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero e M. von Sakovsky) decidiram em 1990 comparar as suas metodologias resolvendo um problema de otimização predefinido: o problema CGAM, que foi nomeado com as iniciais dos primeiros nomes destes especialistas. Em 1994, a revista Internacional Energy teve um número integralmente dedicado a Termoeconomia, onde foram publicados os 5 artigos sobre o problema CGAM: a proposição do problema e as respectivas quatro metodologias aplicadas na solução do mesmo. O objetivo principal do problema CGAM era mostrar como as metodologias seriam aplicadas, quais conceitos seriam usados e que valores seriam obtidos num simples problema de otimização de um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa. Numa análise final, o objetivo era a unificação das metodologias. Foi deixado claro que não se tratava de uma competição, mas sim de uma comparação das metodologias e que cada metodologia teria o seu próprio campo de aplicação.

Para os interessados em termoeconomia, a leitura dos artigos do problema CGAM revela-se um tanto ao quanto frustrante ao constatar que se trata de um problema meramente matemático, ou seja, a função objetivo e as restrições termodinâmicas e termoeconômicas já foram previamente definidas e convencionadas. Apesar disso os autores fizeram questão de escrever um pouco sobre as respectivas metodologias, mas por não serem requisitos para a solução do problema específico, algumas questões importantes e que definem uma metodologia termoeconômica (estrutura

produtiva, equações auxiliares para a atribuição de custos, alocação dos resíduos, etc.) não foram usadas, deixadas em aberto, ou nem foram devidamente apresentadas para algumas metodologias.

Neste aspecto, uma tese de doutorado desenvolvida na Universidade de Campinas por Cerqueira, em 1999, foi muito feliz ao comparar as principais metodologias de análise termoeconômica através da sua aplicação para calcular os custos dos fluxos internos e produtos num sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa. Os principais resultados desta tese, mostraram que há diferença nos resultados obtidos pelas diferentes metodologias, mas os resultados podem ser iguais quando são assumidas as mesmas funções para cada equipamento do sistema aliado ao mesmo tratamento para as irreversibilidades externas. Recentemente, outros especialistas afirmaram o mesmo. Isto mostra que as metodologias termoeconômicas não são tão diferentes quanto parecem e que a principal divergência está no tratamento dado às irreversibilidades externas (também chamados de resíduos) e aos chamados equipamentos dissipativos, como os gases de exaustão das caldeiras de recuperação e os condensadores dos ciclos a vapor.

A neguentropia vinha sendo muito usada em ciclos térmicos que tem na sua composição um condensador (equipamento dissipativo) e/ou uma caldeira de recuperação (exaustão de resíduos). A maioria dos autores aponta a tese de doutorado de Frangopoulos em 1983 como o primeiro trabalho a usar a neguentropia na modelagem termoeconômica de sistemas. Mas segundo o próprio Frangopoulos, Smith em 1981 já havia usado este conceito que foi na realidade introduzido desde 1962 por Brillouin. Alguns autores dizem que a neguentropia é um fluxo fictício, porque durante muitos anos ela era usada juntamente com a exergia. Este procedimento tem a vantagem de poder isolar os equipamentos dissipativos na definição da estrutura produtiva, além permitir explicitamente dar um tratamento aos resíduos. Porém, alguns subsistemas ficam com o produto maior do que o insumo, o que pode ser interpretado como uma inconsistência.

Percebendo estas falhas, Santos em 2009, propôs um novo procedimento para aplicação da neguentropia na modelagem termoeconômica, ou seja, o objetivo principal desta tese foi propor uma metodologia termoeconômica que tira proveito das vantagens que a neguentropia oferece, porém evitando as incoerências acima descritas. Isto foi atingido unificando a vertente de desagregação da exergia com a de aplicação da neguentropia, ao tratar a neguentropia como a parcela entrópica da exergia juntamente com a entropia.

Embora uma solução consistente seja apresentada por Santos em 2009 para o tratamento de componentes dissipativos como condensadores, caldeiras de recuperação e resfriadores, a abordagem é limitada quando do tratamento de dispositivos de expansão isentálpicos, como os encontrados em sistemas de refrigeração, a saber, válvula de expansão e tubo capilar. Lourenço 2012 propôs uma abordagem, desagregando o termo entálpico em seus termos de energia interna e trabalho de fluxo, além do termo entrópico, este último como o próprio Santos propôs. Assim, foi mostrado como tratar os componentes dissipativos presentes nos sistemas de refrigeração.

Porém, uma limitação do modelo de Lourenço é evidenciada na análise do dispositivo de expansão, geralmente representado por uma válvula, classificado como componente dissipativo, quando o fluido que se expande através dele se comporta como um gás ideal. O processo de expansão de um gás através de uma válvula é isentálpico, além de internamente irreversível. Portanto, como a entalpia é função somente da temperatura, o processo também é isotérmico e, assim, a energia

interna e o trabalho de fluxo (produto $P \cdot v$) do gás são iguais a montante e a jusante do dispositivo. Deste modo, para superar este problema, Lourenço (em 2016) propôs um novo nível de desagregação da exergia em quatro parcelas, pela desagregação do trabalho de fluxo em duas parcelas, trabalho de volume e trabalho de pressão, além na energia interna e termo entrópico.

Assim como o CGAM, outro problema relevante em termoeconomia foi o Projeto TADEUS em 2004. Seus principais objetivos eram aplicar metodologias termoeconômicas oriundas de diferentes grupos de pesquisa para o diagnóstico de anomalias e ineficiências de sistemas de energia, estabelecendo conceitos comuns e nomenclatura, comparando resultados e evidenciando as principais características de cada abordagem na aplicação ao diagnóstico.

Aplicações

O cenário de demandas que está na origem do surgimento, no século passado, desta nova disciplina chamada de Termoeconomia pode se dividir em três grandes campos de aplicação, a saber: otimização, diagnóstico e alocação de custos. A otimização pode ainda ser aplicado a projeto (estrutural e/ou paramétrica) ou operação. Este cenário de demanda apareceu em meio a um mundo com recursos naturais cada vez mais limitados, o aumento incessante da demanda energética para o desenvolvimento dos países e a preocupação com a preservação do meio ambiente que vêm fazendo com que sejam imprescindíveis sistemas energéticos cada vez mais eficientes.

Buscando o aumento da eficiência, o projeto de um sistema térmico esbarra em aspectos econômicos antes de alcançar os limites termodinâmicos, já que os sistemas mais eficientes tendem a demandar maiores investimentos iniciais, fazendo necessário um ponto de equilíbrio entre eficiência e custo. Esta busca do ponto de equilíbrio se chama otimização do projeto.

Em sistemas já existentes é importante definir estratégias operacionais mais eficientes de forma a atender a demanda energética com o menor custo possível. A definição da melhor estratégia operacional é conseguida através da otimização operacional.

Ainda em sistemas já existentes é importante também localizar identificar e quantificar as ineficiências devido à degradação dos equipamentos para planejar a manutenção. A identificação, localização e quantificação destas ineficiências é chamada de diagnóstico.

Na cogeração, que é umas das formas de aumentar a eficiência de sistemas térmicos, são necessárias técnicas de partição dos custos para o calor e para a potência, independentemente de ser custo monetários, exergético, ambiental, etc. Esta partição é chamada de alocação de custos.

Gargalos e Desafios

A motivação para o avanços conseguidos por Santos e Lourenço tem a ver com a redução das arbitrariedades que persistem em termoeconomia. Tal redução pode passar pela desagregação total do sistema, isolando inclusive qualquer equipamento dissipativos e tratando os resíduos. Esse conceito de desagregação total da planta tem implicações nas três grandes áreas da termoeconomia, a saber, alocação de custos, otimização e diagnóstico.

No caso da alocação de custos, a desagregação total do sistema permite o detalhamento do processo interno de formação de custos, aumentando a precisão e o refinamento dos resultados.

Em relação à otimização, a desagregação total permite que a otimização local dos componentes do sistema seja procedida, por meio de conceitos como decomposição e isolamento.

Para o diagnóstico, a desagregação total pode auxiliar na identificação e localização adequada e precisa das anomalias geradas pelos respectivos componentes do sistema, evitando ter grupos de componentes e sim componentes devidamente isolados, dependendo da metodologia utilizada.

Os desafios da pesquisa em termoeconomia podem ser divididos em dois conjuntos, a saber, trabalhos de desenvolvimento e trabalhos de aplicação. Ambos os conjuntos são relevantes no mesmo peso. Os resultados dos trabalhos de desenvolvimento permitem que aplicações do mundo real possam ser feitas e os resultados dos trabalhos de aplicação mostrem a robustez e a consistência dos modelos desenvolvidos. Em outras palavras, há um sistema de retroalimentação positiva, cuja meta final está em desenvolver um modelo que possa ser aplicado em quaisquer situações-problema do mundo real, ou seja, unificação das metodologias.

Em relação aos trabalhos de aplicação, é possível proceder a análises termoeconômicas desde os sistemas tradicionais de potência e de refrigeração até os sistemas modernos, como os ciclos Rankine orgânicos, ciclo Kalina, ciclos de refrigeração com ejetores, dentre vários outros, inclusive quando tais sistemas estão energeticamente integrados com plantas de cogeração e trigerção bem como energia solar, geotérmica e outras fontes renováveis. Dentro do conjunto dessas análises termoeconômicas, encontram-se abordagens para análise comparativa de custos entre dois ou mais sistemas, alocação de custos em sistemas multiproduto, otimização e diagnóstico exergeticos, exergoeconômicos e de emissão de CO₂ equivalente em base exergetica.

Em relação aos trabalhos de desenvolvimento faz-se necessária uma sistematização livre de flexibilidades do desenho do diagrama funcional e da definição da estrutura produtiva, a fim de eliminar ambiguidades e arbitrariedades. Portanto, é sugerida a investigação sobre a possibilidade de tal sistematização e, caso possível, uma proposta de construção do diagrama produtivo baseada em regras explícitas, ou seja, as próprias física e termodinâmica envolvidas no sistema guiariam o desenho do diagrama, não mais considerações particulares introduzidas pelo analista. Este desenvolvimento e sistematização generalizada é o que criaria as condições para o possível desenvolvimento de softwares de análise termoeconômica de sistemas térmicos.

Um outro aspecto que vai mais além da desagregação dos equipamentos do sistema é a separação das ineficiências intrínsecas das induzidas na aplicação ao diagnóstico termoeconômico.