

Eixo Temático ET-06-016 - Energia

ASCENDANCY E TERMOECONOMIA PARA ALCANÇAR A SUSTENTABILIDADE

Daniel Fernandes Queiroga Leite^{1,*}, Monica Carvalho²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba. Campus I. João Pessoa-PB (CEP 58051-970). E-mail: daniel.fernandes@ct.ufpb.br.

²Departamento de Engenharia de Energias Renováveis. Universidade Federal da Paraíba. Campus I. João Pessoa-PB (CEP 58051-970). E-mail: monica@cear.ufpb.br.

RESUMO

O crescimento e desenvolvimento dos ecossistemas está sujeito a restrições e além da exergia, outras propriedades, como por exemplo *Ascendancy*, podem ser descritas como uma função-objetivo que indica a saúde (estado) de ecossistemas, sintetizando informações sobre os fluxos de energia e matéria em relação a um estado teórico ideal. Por outro lado, a preocupação crescente pela economia de energia tem incentivado o desenvolvimento de técnicas de avaliação e diagnóstico de sistemas, com base na Segunda Lei da Termodinâmica e no conceito de exergia. Nesse contexto surgiu o conjunto de metodologias denominado Termoeconomia, cujo objetivo é alocar os custos e otimizar de forma econômica os sistemas térmicos, baseada em conceitos termodinâmicos da operação do sistema. A Termoeconomia se utiliza da propriedade exergia, que pode ser definida como a capacidade de se produzir um efeito útil. A formulação do *Ascendancy* foi adaptada para plantas industriais, e a aplicação dessa abordagem a sistemas termodinâmicos proporciona informações complementares a análise termoeconômica.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Ascendancy; Termodinâmica; Exergia, Termoeconomia.

INTRODUÇÃO

Todos os seres vivos crescem se desenvolvem e morrem. Isso é verdadeiro para organismos e órgãos tomados em macro-escala como estruturas sociais: empresas, movimentos culturais, comunidades econômicas e ecossistemas. Esses órgãos são abstrações criadas para descrever os diversos fenômenos e, se elaboradas de forma quantitativa, permitem o cálculo das taxas e a previsão do comportamento do sistema, auxiliando na solução de problemas.

Para os ecossistemas, Odum (1969) descreveu 24 atributos (Tabela 1) conectados a fluxos internos, ao controle da retro-alimentação (“feedback”) e ao crescimento da diversidade. Essa evolução termodinâmica permite medir o grau de maturidade dos ecossistemas, além de verificar o desempenho de cada componente, melhorando a gestão de populações naturais.

Uma propriedade emergente é consequência dos processos auto-reguladores sendo, portanto, dependente das inter-relações dos sistemas. Se a frase “o todo é maior que a soma das partes” é correta, então a “emergência” se constitui no “maior” (MÜLLER, 1997). Isso é a essência da filosofia holística e se o ecossistema somente pode ser entendido como um “todo” será caracterizado por propriedades macroscópicas.

Os sistemas ecológicos podem ser analisados por gráficos e redes tróficas e, então, são tratados com técnicas como as de Odum. Complementar a isso, os ecossistemas são vistos como estruturas dissipativas que se constroem através de fluxos que, por sua vez, são consequências da função termodinâmica do sistema e vice-versa (NIELSEN; ULANOWICZ, 2000).

Tabela 1. Atributos da sucessão ecológica: tendências esperadas no desenvolvimento de ecossistemas.

Atributos dos ecossistemas	Em desenvolvimento	Maduro
Energia da comunidade		
1 – Produção 1ª Total / Respiração	< 1 >	= 1
2 – Produção 1ª Total / Biomassa	Alta	Baixa
3 – Biomassa / Total de Fluxos	Baixa	Alta
4 – Produção Líquida /Rendimento	Alta	Baixa
5 – Cadeia Trófica	Linear (“grazing”)	Teia de Aranha(detritos)
Estrutura da comunidade		
6 – Materia Orgânica Total	Pequena	Grande
7 – Nutrientes Inorgânicos	Extra-biótico	Intra-biótico
8 – Diversidade (riqueza)	Baixa	Alta
9 – Diversidade (equitabilidade)	Baixa	Alta
10 – Diversidade Bioquímica	Baixa	Alta
11 – Estratificação	Pouco organizada	Muito e organizada
Historia de Vida		
12 – Especialização de Nicho	Ampla	Pouca
13 – Tamanho do Individuo	Pequeno	Grande
14 – Ciclos de Vida	Curto, simple	Largo, completo
Ciclo de Nutrientes		
15 – Ciclos de Minerais	Aberto	Fechado
16 – Troca de Nutrientes	Rápido	Lento
17 – Regeneração de Nutrientes	Sem importância	Importante
Pressão de Seleção		
18 – Forma de Crescimento	“r” – rápido	“k”
19 – Produção	Quantidade	Qualidade
Homeostasis Total		
20 – Simbiose Interna	Pouco desenvolvida	Desenvolvida
21 – Conservação de Nutrientes	Pobre	Boa
22 – Estabilidade (resist a perturbação externa)	Pobre	Boa
23 – Entropia	Alta	Baixa
24 – Informação	Baixa	Alta

Fonte: Odum, 1969.

Para simular o ecossistema como um todo é necessário conhecer um conjunto de parâmetros, representando o “pool gênico” do sistema, e ter um algoritmo operando sobre esses parâmetros, para assim encontrar os que melhor se ajustam com a *meta* do sistema. Esse algoritmo é também chamado de *goalfunction* – aqui traduzido para função-meta.

As funções-meta atuam como indicadores de qualidade de um ecossistema, consistindo nas propriedades emergentes resultantes dos processos de auto-organização e determinando a direção do desenvolvimento. Muitas funções-meta são usadas para avaliar ecossistemas, destacando-se o *Ascendancy* (ULANOWICZ, 1999a), a Exergia (JØRGENSEN, 1999) e a Emergia (BROWN; MCCLANAHAN, 1996).

OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo verificar, por meio de um detalhamento da exergia e do *Ascendancy*, que as informações fornecidas por essa análise são complementares.

MATERIAIS E MÉTODOS

Formulação matemática do *Ascendancy*

Segundo Nielsen & Ulanowicz (2000) K. R. Popper introduziu uma nova forma de ver o mundo, visto como um mundo de propensões, e não em termos de forças determinísticas. Brevemente, uma propensão é a tendência em que ocorre certo evento em um contexto particular. Fenômenos observados são considerados resultados de eventos coincidentes que possuem distribuição não-equiprovável. Ou seja, o mundo não se comporta como um jogo de dados ou como um jogo de moeda, onde todos os resultados têm a mesma probabilidade de 1/6 ou 1/2, respectivamente. Em vez disso se comporta como um jogo em que as moedas e os dados estão adulterados. Além disso, as probabilidades mudam com interações mutuas entre elas, i. e., as probabilidades não são estacionárias. Toda probabilidade torna-se condicional quando rodeada de eventos.

Considerando o exemplo de Ulanowicz (1999b), na Tabela 2, que mostra o número de vezes que cada causa (a_1, a_2, a_3 ou a_4) é seguido por cinco resultados possíveis (b_1, b_2, b_3, b_4 ou b_5).

Tabela 2. Tabela de conseqüências hipotéticas para um número de ocorrências conjuntas entre quatro causas (a_n) e cinco resultados (b_n).

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	Soma
a_1	40	193	16	11	9	269
a_2	18	7	0	27	175	227
a_3	104	0	38	118	3	263
a_4	4	5	161	20	50	241
Soma	166	206	215	176	237	1000

Fonte: Ulanowicz, 1999b.

Dos 1000 eventos da Tabela 2, percebe-se que a probabilidade conjunta, por exemplo, a_3 e b_5 ocorrem juntos e $p(a_3, b_5) = 3/1000$. No entanto, a probabilidade conjunta não é o mesmo que a probabilidade condicional. Para calcular é necessário normalizar a probabilidade conjunta pela probabilidade $p(a_3)$ (indicando que a_3 ocorre em qualquer circunstância): $p(b_5|a_3) = p(a_3, b_5) / p(a_3)$. Pela coluna da direita (soma), $p(a_3) = 263/1000$. Assim, a probabilidade condicional $p(b_5|a_3) = 3/263$.

Observando a Tabela 2, percebe-se que quando a_1 ocorre, existe uma alta probabilidade de que b_2 seguirá. De modo parecido, b_5 é provável que ocorra quando a_2 tenha acontecido e b_3 quando se tem a_4 . A situação não é tão clara de se seguir a partir de a_3 , mas b_1 e b_4 são mais prováveis. Presumivelmente, se fosse possível isolar os fenômenos, então cada vez que a_1 ocorresse estaria seguido por b_2 . Os resultados do isolamento hipotético estão na Tabela 3.

De modo interessante, b_4 nunca ocorre em condições isoladas. Surge puramente como resultado de interferências entre as propensões. Conclui-se que, segundo Ulanowicz (1999b), sempre que as propensões ocorrem em proximidade, apareceram interferências e novas propensões.

Restrições devem ser agregadas de maneira a “organizar” a configuração indeterminada da Tabela 2, obtendo assim a Tabela 3. Ou seja, a transição da configuração “solta” para sua homólogo rígido é um exemplo de “organização” (SKYRMS, 1980 *apud* ULANOWICZ, 1999b).

Tabela 3. Tabela de frequências, igual à Tabela 2, mas isolando as causas.

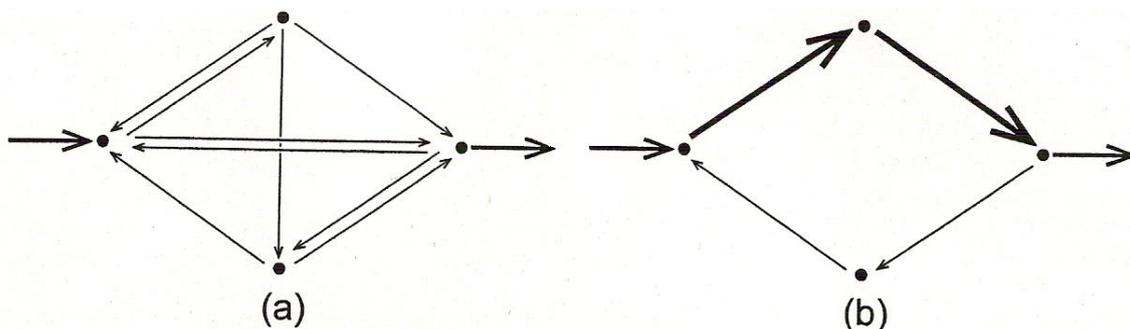
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	Soma
a ₁	0	269	0	0	0	269
a ₂	0	0	0	0	227	227
a ₃	263	0	0	0	0	263
a ₄	0	0	241	0	0	241
Soma	263	269	241	0	227	1000

Fonte: Ulanowicz, 1999b.

Autocatálise

O feedback positivo (Mutualismo) entre dois processos é responsável em grande parte da organização e estrutura que percebe-se nos ecossistemas vivos. A Autocatálise é uma forma de Mutualismo. Ela consiste em um encadeamento cíclico de processos onde cada membro tem o propósito de acelerar a atividade do evento seguinte. É importante destacar dois pontos sobre os ciclos autocatalíticos: i) os membros nem sempre estão conectados de forma rígida, ou seja, a ação de um não tem que necessariamente aumentar o outro, em qualquer instante, apenas a maior parte do tempo; ii) os membros dos ciclos são capazes de variar.

A Figura 1 mostra um exemplo do crescimento e desenvolvimento de um sistema com Autocatálise. A partir da influência da autocatálise algumas articulações tornam-se menos importantes ou até mesmo desaparecem. Um maior nível de atividade é canalizada entre as formas mais eficazes.

**Figura 1.** Representação esquemática dos efeitos da autocatálise em um sistema. Fonte: Ulanowicz (1999b).**Crescimento, desenvolvimento e Ascendancy.**

Os conceitos de crescimento e desenvolvimento são diferentes, pois enfatizam aspectos diferentes de um processo. Crescimento destaca o aumento do tamanho ou atividades de um sistema, por outro lado, desenvolvimento realça a crescente organização do sistema.

A natureza extensiva do crescimento é facilmente quantificável. A medida da atividade total do sistema é a soma de todos os intercâmbios, T . Assim:

$$T = \sum_i \sum_j T_{ij} \quad (1)$$

T_{ij} representa a magnitude de quantificar transferência de material ou energia entre um doador (presa) i e um receptor (predador) j .

Para quantificar o desenvolvimento tem que quantificar a transição do estado (a) ao (b) da Figura 1 (começando por um sistema “solto” altamente indeterminado, para outro em que os fluxos estão restringidos aos caminhos mais efetivos). Citando Boltzmann (1872 *apud* ULANOWICZ, 1999b), se quantifica a incerteza, h_j , de uma categoria j , como:

$$h_j = -k \log[p(B_j)] \quad (2)$$

$p(B_j)$ é a probabilidade de que B_j ocorra e k é uma constante escalar.

As restrições eliminam as incertezas, e assim as incertezas de um sistema com restrições será menor que a de um sistema “solto”. Supondo que um evento A_i exerça uma restrição sobre a ocorrência de B_j . A probabilidade de que B_j ocorra é por definição a probabilidade condicional $p(B_j|A_i)$, de modo que a incerteza de B_j sob influência de A_i é:

$$h_j^* = -k \log [p(B_j|A_i)] \quad (3)$$

A medida da intensidade da restrição que A_i exerce sobre B_j pode ser calculada como:

$$h_j - h_j^* = -k \log [p(B_j|A_i) / p(B_j)] \quad (4)$$

Esta medida de restrição entre qualquer par arbitrário A_i e B_j pode ser utilizada para calcular a quantidade de restrição inerente ao sistema como um todo, ponderando a restrição mutua entre cada par de eventos mediante a probabilidade conjunta associada e estes elementos, e somando sobre todos os pares possíveis. Assim se produz o resultado de que:

$$h_j - h_j^* = k \sum_i \sum_j p(A_i, B_j) \log \left(\frac{p(A_i, B_j)}{p(A_i)p(B_j)} \right) \quad (5)$$

Para poder aplicar $h_j - h_j^*$ na avaliação do nível de restrição de um ecossistema tem que estimar $p(A_i, B_j)$. Considerando que T_{ij} é o fluxo que sai de i e entra em j ; nesse aspecto se pode considerar T_{ij} como dados de uma matriz quadrada de eventos. As probabilidades conjuntas podem ser estimada por T_{ij}/T e as probabilidades simples serão as somas normalizadas das linhas e colunas:

$$p(A_i) \approx \frac{\sum_j T_{ij}}{T} \quad (6)$$

$$p(B_j) \approx \frac{\sum_i T_{ij}}{T} \quad (7)$$

Assim a restrição mutua média do sistema se expressa como:

$$h_j - h_j^* = k \sum_i \sum_j \frac{T_{ij}}{T} \log \left(\frac{T_{ij} \cdot T}{\sum_j T_{ij} \cdot \sum_i T_{ij}} \right) \quad (8)$$

O objetivo é capturar tanto as consequências extensivas como as intensivas da autocatálise em uma única medida, assim segundo Tribus e McIrvine (1971 *apud* ODUM, 1969) se considera $k = T$ e as dimensões de $h_j - h_j^*$ contêm as unidades usadas para medir os intercâmbios. Como a escala de medida agora (depois de substituir $k = T$) é qualitativamente diferente, Ulanowicz (1980 *apud* ULANOWICZ, 1999b) propõe o nome de *Ascendancy*. Assim,

Ascendancy mede o tamanho e o estado de organização de uma rede de intercâmbios que ocorrem em um ecossistema. Segundo Ulanowicz (2004), em ausência de grandes perturbações externas, os sistemas vivos tendem a se organizar, exibindo uma propensão natural para aumentar seu *Ascendancy* (aumentar a ordem), que então se caracteriza como uma função-meta capaz de unificar quase todos os 24 atributos de Odum (1969).

A Teoria do *Ascendancy* pode também ser usada em outros campos. Em redes neurais, por exemplo, o *Ascendancy* mede a habilidade da rede para interpretar padrões e estímulos (BOSWORTH, 1991).

Termoeconomia

Nas últimas décadas a compreensão de como melhorar a concepção, a operação de sistemas energéticos e os resíduos do ambiente tem sido objeto de grande interesse (VALERO, TORRES, 2006). Esses problemas evidenciam a inter-relação entre a Termodinâmica e a Economia. Em 1962, Evan e Tribus propuseram o termo *Termoeconomia* cujo objetivo é estudar a conexão entre essas duas disciplinas, uma ciência de economia de energia que avalia a eficiência e o custo dos produtos de sistemas (TORRES; VALERO, 2000).

A Termoeconomia tem bases teóricas que se completam por meio da Segunda Lei da Termodinâmica, conectando a física e a economia. Com a análise econômica é possível calcular os custos dos investimentos, da manutenção, dos combustíveis sem fornecer meios para alocar os custos aos respectivos produtos. Já a análise termodinâmica calcula a eficiência do processo, localizando e quantificando as irreversibilidades, porém não avalia a sua significância em termos do processo de produção global (CARVALHO, 2011).

A Teoria do Custo Exergético (TCE) é uma importante ferramenta da Termoeconomia que analisa o processo de formação dos custos, contabilizando sua aquisição, diagnosticando e valorizando o impacto nos recursos de avarias e otimizando componentes individuais e globais de um sistema térmico. A TCE baseia-se no conceito de exergia (Segunda Lei da Termodinâmica - SLT), no conceito de Recurso³-Produto e na formulação matemática de um sistema térmico (VALERO *et al.*, 1986; LOZANO *et al.*, 1989; LOZANO; VALERO, 1993; VALERO *et al.*, 1994; TORRES; VALERO, 2000; VALERO; TORRES, 2006; VALERO *et al.*, 2006).

Segunda Lei da Termodinâmica, Exergia, Eficiência

A SLT formula que não existe processo natural reversível, isto é, todo processo gera perdas de recursos energéticos. Existem dois enunciados clássicos da Segunda Lei (VAN WYLEN *et al.*, 2003): i) o enunciado de Kelvin-Planck menciona que é impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico; e ii) o enunciado de Clausius dita que é impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos, além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.

Segundo Van Wylen *et al.* (2003) a exergia, também chamada de disponibilidade, é o máximo trabalho que pode ser realizado por um sistema ausente da presença de energia transferida na forma de calor. A exergia total de um fluxo de matéria é dada pela soma das componentes física, química, cinética e potencial, porém como as exergias cinética e potencial se convertem totalmente em trabalho elas se coincidem com sua energia (TORRES; VALERO, 2000). Então a exergia total de um fluxo de matéria, componentes física e química, respectivamente, é dada pela Equação 9:

³ O original em inglês é *Fuel*, mas aqui optou-se por usar a denominação "Recurso" para diferenciar da tradução literal "Combustível". As equações, porém, mantém a letra "F" do original em inglês, para facilitar a compreensão e comparação de resultados.

$$B_f = (H - H_0) - T_0(S - S_0) - \sum \mu_i(N_i - N_{i,0}) \quad (9)$$

onde N_i representa o número de moles da componente química do fluxo e μ_i seu potencial químico. O sub-índice -0 representa o valor dessas magnitudes nas condições do estado de referência. A entalpia e entropia são representadas por H, S.

A exergia é responsável pela qualidade da energia, uma propriedade termodinâmica adequada para a alocação dos custos. Uma vez definido o ambiente de referência a equivalência entre diferentes fluxos de energia ou matéria de uma instalação torna-se possível através da exergia (VALERO; TORRES, 2006).

A exergia permite quantificar as irreversibilidades de um sistema associada a uma mudança de estado. Quanto menor for às irreversibilidades melhor o desempenho do sistema, ou seja, menos trabalho será necessário. Assim o uso eficiente dos recursos naturais (reservatórios de disponibilidade) é de suma importância para uma economia de exergia (VAN WYLEN *et al.*, 2003).

Porém somente uma análise exergética não é suficiente para se obter todos os custos de uma instalação. Segundo Torres e Valero (2000) uma análise adicional do processo é necessária para quantificar e identificar a origem das perdas em um processo de produção. A função termodinâmica denominada “custo exergético” quantifica a exergia necessária para produção de um fluxo físico (VALERO *et al.*, 1986; LOZANO *et al.*, 1989; LOZANO; VALERO, 1993; VALERO *et al.*, 1994; TORRES; VALERO, 2000; VALERO; TORRES, 2006; VALERO *et al.*, 2006). As relações funcionais entre os componentes e os fluxos e a eficiência exergética estão estritamente ligados ao custo exergético.

Conforme abordado anteriormente, é possível concluir que a exergia que entra em um sistema que realiza um processo sempre será menor que a resultante (exergia sempre é destruída):

$$(\text{Exergia que entra}) - (\text{Exergia que sai}) = \text{Irreversibilidade} > 0 \quad (10)$$

Em processos sempre ocorrerá a perda de qualidade (destruição de exergia), apesar de que existem processos que não perdem quantidade de energia (conservação da energia):

$$\text{Recursos (F)} - \text{Produtos (P)} = \text{Irreversibilidade (I)} > 0 \quad (11)$$

sendo F e P fluxos físicos avaliados em termos de exergia, assegurando assim sua universalidade e facilitando a determinação da perda de qualidade do processo.

A Equação (10) aplica-se para todos os processos projetados pelo homem, enquanto que a Equação (11) aplica-se para todos os processos, sejam naturais ou artificiais, apresentando informações que não estão presentes na Segunda Lei da Termodinâmica como “quem” é o produto e quais são os recursos (TORRES; VALERO, 2000).

Conforme a Lei de Gouy-Stodola existe uma relação entre a irreversibilidade gerada pelo processo (I) e o conceito de entropia gerada (S_g), definida por (TORRES; VALERO, 2000):

$$I = T_0 S_g \quad (12)$$

onde T_0 representa a temperatura do ambiente de referência.

Segundo Lozano e Valero (1993) o fator primordial para uma teoria de produção é o conceito de eficiência, pois o desejo de se produzir alguma utilidade é externa ao sistema. Sabe-se que não existe nenhuma máquina perfeita, e o grau de perfeição é definido pela eficiência (η), dada por:

$$\text{Eficiência } (\eta) = \frac{\text{Unidades de obtido (P)}}{\text{Recursos utilizados para obtê-lo (F)}} \quad (13)$$

O valor da eficiência estará compreendido entre zero e um para sistemas produtivos.

Processo de formação dos custos

Um processo produtivo ou industrial é composto por um conjunto de equipamentos e produtos funcionais (matéria prima) em que ocorrem procedimentos de fabricação de outros produtos funcionais a partir da utilização de produtos manufaturados. Porém estes processos também produzem resíduos, produtos não desejados que demandam uma atenção especial no ponto de vista da valorização de energia.

Dessa maneira necessita-se de uma ferramenta para a otimização dos processos, a utilização de uma contabilidade sistemática dos recursos utilizados na obtenção de um produto. A combinação das Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica (PLT e SLT, respectivamente) permite descobrir, quantificar e localizar as perdas de um processo e da qualidade da energia: a combinação PLT+SLT é feita por meio da exergia, que mede a distância termodinâmica entre um produto e seu ambiente (TORRES; VALERO, 2000).

Uma primeira etapa na investigação das possíveis economias de energia em um processo será estudar onde aparecem toda e cada uma das irreversibilidades e relacioná-las com o efeito que tem no consumo dos recursos (TORRES; VALERO, 2000).

Dentro deste contexto, a exergia B contida em um produto funcional não é o foco, e sim o seu custo, denotado por B* (TORRES; VALERO, 2000):

$$B^* = B + \sum_{\text{processo}} I \quad (14)$$

onde B* é o custo exergético de um produto funcional expresso em termos de exergia.

Segundo Lozano *et al.* (1989) a eficiência e o custo possuem a mesma base conceitual, então é possível aproximar ambos os conceitos e chegar a conclusão que a inversa da eficiência é o consumo de exergia exigida por uma instalação para gerar a unidade de exergia do produto.

$$\frac{1}{\eta} = k = \frac{F(\text{unidades de exergia})}{P(\text{unidades de exergia})} = k^* \quad (15)$$

onde k representa o custo unitário exergético; isto é, o quociente entre a exergia necessária para fabricar o produto desejado e o custo ou consumo mínimo correspondente ao processo ideal. Logicamente $k \geq 1$, a igualdade corresponde a um processo reversível.

Desse modo o custo exergético por unidade de exergia requerida é dado por:

$$B^* = k^* B \quad (16)$$

Na busca de determinar os custos exergéticos dos fluxos de uma instalação Torres e Valero (2000) formularam um conjunto de regras de aquisição de custos conhecidas como proposições Recurso-Produto. A TCE se define a partir dessas regras, listadas a seguir:

(P1) O custo exergético dos fluxos depende dos custos dos recursos de entrada do sistema. Em ausência de aquisições externas, o custo dos fluxos de entrada do sistema é igual a sua exergia, ou seja, seu custo exergético unitário é um.

(P2) O custo do produto de cada componente é igual a soma do custo exergético dos fluxos que constituem o combustível de cada componente: $F^* = P^*$. Logo, todos os custos gerados no processo produtivo devem ser incluídos no custo final dos produtos. Em ausência de aquisições externas o custo dos fluxos de perdas é nulo.

(P3) Se o produto de um componente é formado por vários fluxos de mesma qualidade termodinâmica todos eles têm o mesmo custo exergético unitário. Essa proposição se baseia no fato de que em equipamentos onde se identificam vários produtos, se supõe que seu processo de formação tenha sido o mesmo, tenham o mesmo custo exergético unitário e por outro lado atribuí-se seu custo exergético proporcional a exergia que os constituem.

Ascendancy aplicado a uma planta industrial

O valor T_{ij} representa agora o fluxo energético que passa do equipamento i ao equipamento j . Ou seja, T_{ij} é a quantidade de exergia do produto de i que passa a formar parte do combustível de j . Na Tabela Recurso – Produto se representa como se distribui o produto de cada equipamento ao longo de uma planta industrial, quanto será fonte de recursos em outros equipamentos e quanto se transforma em produto final. A Tabela, proporcionada pela análise termoeconômica, tem os valores de T_{ij} necessários para calcular o *Ascendancy*, como exemplificado na Tabela 4.

Tabela 4. Tabela recurso-produto para um sistema formado por quatro equipamentos.

Exergia/tempo	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	Soma (linhas)
P ₀						
P ₁						
P ₂						
P ₃						
P ₄						
Soma (colunas)						Soma total

Fonte: Elaborado pelos autores.

O equipamento zero é o ambiente, assim P_0 é o fluxo de entrada ao sistema desde o ambiente (combustível da planta). F_0 é o fluxo que sai do sistema para o ambiente (produto da planta). $F_n, P_n [1,2,3,4]$ são respectivamente o combustível (fluxo de entrada) e o produto (fluxo de saída) de cada equipamento n .

Assim,

$$T = \sum_i \sum_j T_{ij} = \sum_i P_i = \sum_j F_j \tag{17}$$

Agora relacionando os parâmetros com os anteriormente vistos no *Ascendancy*, tem-se que

$$h_j = -k \log p(F_j) \tag{18}$$

ou seja $p(F_j)$ representa o peso energético de F_j em relação ao total de combustíveis.

$$h_j^* = -k \log [p(F_j|P_i)] \tag{19}$$

Onde $p(F_j|P_i)$ é a fração do produto de i que passa a formar parte do combustível de j .

$$p(F_j | P_i) = \frac{p(P_i, F_j)}{p(P_i)} = \frac{T_{ij}}{P_i} \tag{20}$$

Se h_j^* tende a zero, o equipamento j depende muito do equipamento i ; mas quando h_j^* tende ao infinito, tem pouca dependência. Seguindo o mesmo raciocínio utilizado para ecossistemas:

$$h_j - h_j^* = k \log \left(\frac{p(F_j | P_i)}{p(F_j)} \right) \tag{21}$$

$$p(P_i) \approx \frac{\sum_j T_{ij}}{T} \tag{22}$$

$$p(F_j) \approx \frac{\sum_i T_{ij}}{T} \tag{23}$$

$$p(P_i, F_j) = \frac{T_{ij}}{T} \tag{24}$$

Onde a equação (22) é a soma dos valores de cada coluna dividida pela soma total; a equação (23) é a soma de cada linha dividida pela soma total; e a equação (24) é cada elemento dividido pela soma total.

O “Ascendancy” para plantas industriais será então dado pela Equação (25):

$$A = \sum_i \sum_j T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij} \cdot T}{\sum_j T_{ij} \cdot \sum_i T_{ij}} \right) = \sum_i \sum_j T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij} \cdot T}{P_i \cdot F_j} \right) \tag{25}$$

DISCUSSÃO

Considerando o aumento acentuado da demanda de eletricidade no Brasil, juntamente com o progressivo processo de conscientização do uso mais racional e sustentável da energia, é necessário melhorar e otimizar sistemas energéticos. O foco é obter o máximo de eficiência dos equipamentos, menores gastos com manutenção, maior confiabilidade e vida útil de forma a se minimizar os custos com consumo de combustíveis, operação e de produção da eletricidade.

Por um lado, parte-se da Segunda Lei da Termodinâmica, que estabelece o princípio do aumento da entropia, onde os processos que podem ocorrer na Natureza são tais que a entropia do universo sempre aumenta. Relacionando-se o aumento de entropia com a destruição de exergia, existe a tendência de otimizar sistemas termodinâmicos por meio da minimização da exergia destruída. Quanto maior a destruição de exergia associada a um processo, maiores as oportunidades para melhorias e otimização (*i.e.*, evolução e desenvolvimento).

Por outro lado, estabelece-se que os ecossistemas também evoluem e se desenvolvem. O estado evolutivo de um ecossistema pode ser quantificado por meio de propriedades

emergentes, que não podem ser determinadas quando estudamos os compartimentos em separado (só há sentido quando os componentes estão interligados). A quantificação destas propriedades é feita por funções-meta, como por exemplo *Ascendancy* e exergia, que são maneiras de analisar ecossistemas.

O setor industrial busca constantemente um melhor aproveitamento dos recursos energéticos e gerenciamento dos custos. Sistemas energéticos (conjunto de subsistemas ou processos) consomem recursos externos ao interagirem com o ambiente para transformá-los em produtos. Essas transformações têm o intuito proporcionar esse melhor aproveitamento através de um aumento na utilidade econômica.

Este artigo é um dos primeiros passos na combinação de Termoeconomia e *Ascendancy*, que possui o potencial de ajudar a resolver vários problemas importantes, como a identificação de possibilidades de integração e melhoria de eficiência, quantificação dos benefícios obtidos devido a integração ou determinação de custos. Todas as técnicas termoeconômicas desenvolvidas ao longo dos anos para a análise, otimização e diagnóstico de sistemas energéticos possuem potencial de combinação com *Ascendancy*.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise das propriedades, exergia e *Ascendancy*, verifica-se que elas podem se complementar abrindo portas para a unificação de visões termodinâmicas e redes do ecossistema. Essa unificação pode amplificar a investigação dos fluxos de um ecossistema em termos de exergia e organizar o sistema como uma sequência hierárquica ordenada de sistemas, incorporados termodinamicamente uns aos outros.

A exergia mostrou-se ser um parâmetro útil no estudo do estado de um ecossistema podendo ser aplicado no campo da modelagem ecológica e no monitoramento de ecossistemas naturais, por apresentar vantagens como uma boa base teórica em termodinâmica, relação com a teoria da informação e correlações bastante interessantes com outras funções-meta do ecossistema, no caso em estudo, do *Ascendancy* parâmetro determinístico para maturidade de um ecossistema, maturidade esta que decorre do aumento do fluxo de energia e das interações existentes.

Trabalhos futuros dos autores incluem uma aplicação específica da *Ascendancy* em sistemas industriais, começando por um sistema termodinâmico simples, um ciclo Rankine.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade nº303199/2015-6 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- BOLTZMANN, L. Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. **Wiener Berichte**, v. 76, p. 373, 1872.
- BOSWORTH, K. W.; ULANOWICZ, R. E. The Possible Role of *Ascendancy* in Neural Networks. Anais do American Mathematical Society, Southeastern Sectional Meeting, Tampa, p. 122-123, 1991.
- BROWN, M. T.; MCCLANAHAN, T. R. Emery Analysis Perspectives of Thailand and Mekong River Dam Proposals. **Ecol. Model.**, v. 91, p. 105-130, 1996.
- CARVALHO, M. **Análise termoeconômica e ambiental para a síntese de sistemas de poligeração no setor residencial-comercial**. Ph.D. tese, Universidade de Zaragoza, Zaragoza, Espanha, 2011.
- JØRGENSEN, S. E. State-of-the-Art of Ecological Modelling with Emphasis on Development of Structural Dynamic Models. **Ecol. Model.**, v. 120, n. 1, pp. 75-96, 1999.
- LOZANO, M. A.; VALERO, A. Teoria do Custo Exergético. **Energy**, n. 9, v. 18, p. 939-960, 1993.

- LOZANO, M. A.; VALERO, A.; GUALLAR, J. **Teoria do Custo Exergético I**. Conceitos Básicos. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Zaragoza, 1989.
- MÜLLER, F. Estado da arte na teoria dos ecossistemas. **Ecol. Model.** v. 100, n. 1, p. 135-161, 1997.
- NIELSEN, S., N., ULANOWICZ, R., E. On the consistency between thermodynamical and network approaches to ecosystems. *Ecol. Model.*, v. 132, n. 1, pp. 23-31, 2000.
- ODUM, E. P. The Strategy of Ecosystem Development. **Science**, v. 164, n. 3877, p. 596-604, 1969.
- SKYRMS, B. A **Pragmatic Investigation of the Necessity of Laws**. New Haven: Yale University Press, 1980.
- TORRES, C., VALERO, A. **Curso de Doutorado: Termoeconomia**. Zaragoza, Espanha: Universidade de Zaragoza, 2000.
- TRIBUS, M.; MCIRVINE, E. C. Energy and information. **Scientific American**, v. 225, n. 3, p. 179-190, 1971.
- ULANOWICZ, R. E. An hypothesis on the Development of Natural Communnes. **J.theor. Biol.** n. 85, p. 223-245, 1980.
- ULANOWICZ, R. E. **Ecology, the Ascendent Perspective**. Columbia University Press, New York, 1999a.
- ULANOWICZ, R. E. Life alter Newton: an Ecological Metaphysic. **Bio Systems**, n. 50, p. 127-142, 1999b.
- ULANOWICZ, R. E. On the Nature of Ecodynamics. **Ecological Complexity**, n. 4, v. 1, p. 341-354, 2004.
- VALERO, A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. et al. Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem. **Energy**, v. 19, n. 3, p. 365-381, 1994.
- VALERO, A., LOZANO, M., A., MUÑOZ, M. A general theory of exergy saving. I. On the exergetic cost. **Computer-aided engineering and energy systems: second law analysis and modelling**, v. 3, p. 1-8, 1986.
- VALERO, A.; TORRES, C. Thermoeconomic Analysis. In: Frangopoulos, C. (Ed.). **Exergy, energy system analysis and optimization**. Oxford, United Kingdom: Eolss Publishers, 2006. v. 2.
- VALERO, A.; SERRA, L.; UCHE, J. Fundamentals of exergy cost accounting and thermoeconomics. Part I: Theory. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 128, n. 1, pp. 1-8, 2006.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.