

# A Síntese Emergética: Contabilizando a Riqueza Real dos Sistemas Naturais e Humanos

## Introdução

A contabilidade moderna enfrenta um desafio fundamental: a incapacidade dos sistemas econômicos, baseados predominantemente no valor monetário, de reconhecer e quantificar adequadamente a contribuição dos ecossistemas naturais para a riqueza da sociedade.<sup>1</sup> A ciência econômica convencional, por sua própria estrutura, não consegue estimar o valor dos vastos recursos energéticos e dos serviços ecossistêmicos que a biosfera fornece gratuitamente, sustentando todas as atividades humanas.<sup>2</sup> Essa invisibilidade contábil leva a uma exploração insustentável dos recursos, pois o que não é medido não pode ser gerenciado eficazmente.

Neste contexto, a emergia surge como uma solução inovadora e poderosa. Trata-se de uma metodologia de contabilidade biofísica que mede a "memória energética" de um produto, processo ou serviço. A emergia é formalmente definida como toda a energia de um tipo específico (geralmente solar) que foi utilizada, direta e indiretamente, ao longo de toda a cadeia de transformações para gerar esse produto ou serviço.<sup>2</sup> Em essência, ela quantifica o custo total que a biosfera "pagou" para criar algo, desde a energia solar que impulsiona o ciclo da água até a energia geológica que concentra minerais.

A análise emergética, desenvolvida pelo ecologista de sistemas Howard T. Odum, oferece uma perspectiva "doadora" (*donor-side*) única, que contrasta com as abordagens de "usuário" (*user-side*) focadas nos impactos. Ao quantificar o valor dos insumos da natureza e da economia em uma base comum e cientificamente robusta — o emjoule solar (sej) — a emergia permite uma avaliação mais holística e integrada da sustentabilidade. Este relatório explora em profundidade a teoria e a aplicação da emergia. A primeira seção estabelece os fundamentos conceituais, diferenciando a emergia de outros conceitos energéticos. A segunda seção detalha os pilares teóricos da transformidade e do princípio da máxima potência. A terceira seção

apresenta um guia prático da metodologia de avaliação. A quarta seção ilustra sua aplicação através de estudos de caso em agricultura, ecologia e sistemas urbanos. A quinta seção realiza uma análise comparativa com outras ferramentas de contabilidade ambiental e aborda as críticas à teoria. Finalmente, a sexta seção discute as implicações para políticas públicas e as futuras direções da pesquisa, argumentando que a síntese emergética é uma ferramenta indispensável para navegar a transição para um futuro sustentável.

## **Seção 1: Fundamentos da Emergia: Para Além da Energia Convencional**

Para compreender a profundidade da análise emergética, é crucial primeiro estabelecer suas bases conceituais, distinguindo-a de noções mais familiares de energia e apresentando o trabalho pioneiro de seu criador. A emergia não é apenas uma nova forma de medir energia; é uma nova forma de entender o valor no universo.

### **1.1. Definindo Emergia: A Memória da Energia**

No cerne da teoria está uma definição precisa: emergia é a energia útil (exergia) de um determinado tipo que é utilizada, direta e indiretamente, em todas as transformações necessárias para gerar um produto ou serviço.<sup>2</sup> Este conceito é frequentemente utilizado como sinônimo de "energia incorporada" ou, mais poeticamente, "memória energética".<sup>1</sup> Ela representa o trabalho total que a natureza e a sociedade realizaram para produzir um recurso.<sup>1</sup>

A unidade de medida da emergia é o "emjoule solar" (sej), que representa o equivalente em joules de energia solar que foi necessário para produzir um determinado item.<sup>1</sup> A escolha da energia solar como linha de base não é arbitrária; ela é a fonte de energia primária que impulsiona a maioria dos processos na biosfera.<sup>5</sup> Esta padronização em uma unidade comum é o que permite à análise emergética comparar fluxos aparentemente díspares, como a luz solar, a água da chuva, os combustíveis fósseis e o trabalho humano, em uma mesma escala de valor.<sup>2</sup>

Fundamental para essa comparação é o conceito de **qualidade energética**. A física tradicional e a análise energética convencional tratam um joule de energia como sendo sempre igual a outro joule. A análise emergética, no entanto, reconhece que diferentes formas de energia possuem qualidades distintas, ou seja, diferentes capacidades de realizar trabalho e gerar transformações. Um joule de eletricidade, por ser mais concentrado e versátil, tem uma qualidade superior a um joule de luz solar difusa. A emergia quantifica essa diferença ao medir a quantidade de energia de baixa qualidade (solar) que foi necessária para produzir uma unidade de energia de maior qualidade. Assim, a emergia não mede apenas a quantidade de energia contida em um produto, mas a magnitude do processo biosférico que o gerou.<sup>2</sup> Essa mudança de paradigma de uma visão focada na "quantidade" para uma que engloba "qualidade e memória" é a ruptura fundamental que a emergia propõe. Um joule de eletricidade "lembra" dos milhares de joules de energia solar e dos milhões de joules de água que foram necessários para produzi-lo, e a emergia torna essa memória explícita e quantificável.

## 1.2. A Origem do Conceito: O Legado de Howard T. Odum

A teoria da emergia é inseparável de seu criador, Howard Thomas Odum (1924-2002), um ecologista americano amplamente reconhecido como um dos pensadores mais inovadores e importantes de seu tempo.<sup>6</sup> Pioneiro em campos como ecologia de ecossistemas, economia ecológica e engenharia ecológica, Odum deixou um legado vasto e interdisciplinar.<sup>6</sup> Seu trabalho foi reconhecido com os mais altos prêmios da ecologia, incluindo o Prêmio Crafoord da Real Academia Sueca de Ciências, considerado o equivalente ao Prêmio Nobel para as biociências, que ele compartilhou com seu irmão Eugene Odum.<sup>6</sup>

O conceito de emergia não surgiu em um vácuo teórico, mas foi o resultado de décadas de pesquisa empírica sobre os fluxos de energia em ecossistemas. Em seus estudos seminais, como a análise da cadeia alimentar em Silver Springs, Flórida, e dos recifes de coral no Atol de Eniwetok, Odum observou que as diversas fontes de energia que impulsionavam esses sistemas — luz solar, correntes de água, ventos — não podiam ser simplesmente somadas em suas unidades brutas (joules ou calorias) sem antes serem convertidas para uma medida comum que levasse em conta suas diferentes qualidades e capacidades de realizar trabalho.<sup>2</sup> Essa percepção foi a semente da teoria da emergia, que pode ser vista como a linguagem quantitativa da ecologia de sistemas — um campo que Odum ajudou a fundar. A emergia aplica os

princípios de fluxos, armazenamentos e transformações, observados em ecossistemas naturais, a todos os sistemas, incluindo os econômicos e sociais.

A terminologia evoluiu ao longo do tempo. Odum introduziu pela primeira vez a expressão "energia incorporada" (*embodied energy*) em 1967 para se referir a essa ideia de custo energético acumulado.<sup>1</sup> No entanto, o termo foi adotado por outros pesquisadores com significados diferentes, muitas vezes referindo-se apenas à energia fóssil necessária para gerar produtos, o que gerou confusão. Para diferenciar seu método mais holístico, que incluía todas as contribuições da natureza, Odum e seu colega David Scienceman cunharam, em 1983, o neologismo "emergia" (do inglês *emergy*, uma contração de *embodied energy*).<sup>1</sup> A base de referência para a contabilidade também amadureceu, passando de equivalentes de matéria orgânica ou combustíveis fósseis para a energia solar, consolidando-a como a medida fundamental da biosfera.<sup>2</sup>

### 1.3. Emergia versus Exergia: Passado, Presente e Futuro dos Sistemas

Para refinar a compreensão da emergia, é útil contrastá-la com o conceito termodinâmico de exergia. Embora relacionados, eles abordam dimensões temporais e filosóficas distintas dos sistemas.

**Exergia** é definida como a porção da energia total de um sistema que está disponível para realizar trabalho útil em relação a um ambiente de referência. É uma medida do potencial de um sistema para causar mudança. A análise exergética, baseada na Segunda Lei da Termodinâmica, foca no **presente e no futuro** de um sistema. Seu objetivo é identificar onde ocorrem as ineficiências — ou seja, onde a exergia é destruída devido a irreversibilidades — e como otimizar os processos para minimizar essas perdas e maximizar o trabalho útil obtido.<sup>12</sup> A exergia responde à pergunta: "Qual o máximo de trabalho que posso obter deste sistema agora?".

**Emergia**, por outro lado, foca no **passado**. Matematicamente, pode ser definida como a integral da potência exergética (fluxo de exergia ao longo do tempo) desde a origem absoluta de um sistema até o momento atual.<sup>12</sup> Em termos mais simples, a emergia representa o custo histórico acumulado, a soma de todo o trabalho que a biosfera já investiu para criar um sistema e trazê-lo ao seu estado presente. Ela não mede o potencial de trabalho remanescente, mas sim o trabalho já realizado. A

emergia responde à pergunta: "Quanto trabalho a biosfera já investiu para criar este sistema?".

Essa distinção temporal é fundamental. A análise exergética é uma ferramenta de otimização para engenheiros que buscam melhorar a eficiência de processos existentes. A análise emergética é uma ferramenta de avaliação para ecologistas e planejadores que buscam entender o valor real dos recursos e a sustentabilidade a longo prazo dos sistemas. Embora a distinção seja clara, a relação entre os dois conceitos tem sido fonte de debate acadêmico, com alguns pesquisadores explorando suas sinergias e outros apontando para incompatibilidades fundamentais.<sup>12</sup>

## **Seção 2: Os Pilares Teóricos da Síntese Emergética**

A análise emergética é sustentada por dois conceitos operacionais principais que a tornam uma ferramenta quantitativa e preditiva: a transformidade, que estabelece uma hierarquia universal de energia, e o princípio da máxima potência (ou *empower*), que propõe uma lei fundamental para a auto-organização e sobrevivência dos sistemas.

### **2.1. Transformidade: A Hierarquia Universal da Energia**

A transformidade é o conceito que operacionaliza a ideia de qualidade energética e serve como a espinha dorsal da contabilidade emergética. É formalmente definida como a emergia solar necessária para gerar uma unidade (geralmente um joule) de outra forma de energia, produto ou serviço.<sup>10</sup> Sua unidade é, portanto, o emjoule solar por joule (sej/J).

A função da transformidade é atuar como um fator de conversão universal. Assim como as taxas de câmbio monetárias permitem comparar o valor de diferentes moedas, a transformidade atua como uma "taxa de câmbio" biofísica. Ela converte todos os diversos fluxos que entram em um sistema — sejam eles medidos em joules de energia, quilogramas de matéria, dólares de serviços ou bits de informação — para a "moeda" fundamental da biosfera: a energia solar equivalente.<sup>10</sup> Isso permite uma

contabilidade que transcende os mercados e as unidades de medida convencionais. Enquanto o preço de um peixe pode flutuar com a oferta e a demanda, sua transformidade reflete o vasto e complexo trabalho ecológico — a cadeia alimentar oceânica, as correntes, o ciclo da água, a energia solar inicial — necessário para produzi-lo. Esse valor biofísico, que reflete sua verdadeira "riqueza", permanece relativamente estável.

Ao aplicar este fator de conversão, a transformidade organiza todos os processos e produtos em uma **hierarquia universal de energia**. Na base desta hierarquia estão itens com baixa transformidade, como a luz solar direta (que, por definição, tem uma transformidade de 1 sej/J). À medida que a energia é transformada e concentrada através de sucessivos processos, a transformidade aumenta. Por exemplo, a produção de biomassa vegetal através da fotossíntese concentra a energia solar, resultando em uma transformidade mais alta. Um herbívoro que come essa planta concentra ainda mais a energia, aumentando novamente a transformidade. No topo da hierarquia encontram-se produtos que exigem muitas etapas de transformação e concentração, como os combustíveis fósseis (energia solar de eras geológicas concentrada), a eletricidade e, especialmente, a informação complexa e os serviços humanos especializados, que possuem as mais altas transformidades.<sup>14</sup>

## 2.2. Empower e o Princípio da Máxima Potência

Enquanto a transformidade lida com a qualidade estática da energia, o conceito de *empower* introduz a dimensão do tempo. **Empower** é definido como a taxa de fluxo de energia, ou seja, a energia por unidade de tempo (ex: sej/segundo).<sup>12</sup> É o análogo emergético da potência, que é a taxa de fluxo de energia (joules/segundo ou watts). O *empower* mede a "pulsção" de um sistema, a velocidade com que ele processa a riqueza real da biosfera.

Com base nesse conceito, Odum propôs o **Princípio da Máxima "Empower"** (ou Princípio da Máxima Potência). Este princípio postula que, durante os processos de auto-organização, os sistemas que sobrevivem, prevalecem e dominam na competição são aqueles que desenvolvem estruturas, processos e feedbacks que maximizam a captação e o uso eficiente de *empower*.<sup>15</sup> Este princípio foi sugerido como uma lei organizacional fundamental da evolução e tem sido proposto por muitos cientistas como um potencial "Quarto Princípio da Termodinâmica", complementando

as leis existentes.<sup>12</sup>

As implicações deste princípio são profundas. Ele pode ser visto como uma generalização da teoria da seleção natural de Darwin, aplicada não apenas a organismos, mas a sistemas em todas as escalas. Assim como os organismos competem por recursos para sobreviver e se reproduzir, os sistemas (ecológicos, econômicos, sociais) competem por fluxos de energia. Aqueles com designs mais eficazes em capturar essa energia e utilizá-la para reforçar sua própria estrutura e capacidade de captação (através de feedbacks autocatalíticos) irão prosperar e substituir os designs menos eficientes.<sup>15</sup>

Isso transforma a análise emergética de uma ferramenta de contabilidade passiva em uma teoria preditiva e prescritiva. Ela não apenas mede a sustentabilidade de um sistema existente, mas também oferece um critério fundamental para o design de sistemas futuros que sejam resilientes e competitivos. Segundo Odum, o objetivo de políticas públicas e do planejamento deveria ser a maximização do *empower* total do sistema (nação, região ou cidade), pois isso maximizaria a sua riqueza real e a sua viabilidade a longo prazo.<sup>16</sup>

## **Seção 3: A Metodologia da Avaliação Emergética: Um Guia Prático**

A aplicação da teoria da energia segue uma metodologia rigorosa e estruturada em três etapas principais: a criação de diagramas de sistemas, a construção de tabelas de avaliação e o cálculo de índices de desempenho. Este processo pode ser entendido como uma tradução sistemática: primeiro, traduz-se o sistema do mundo real para uma linguagem gráfica padronizada; em seguida, traduzem-se os diversos fluxos para a linguagem universal da energia; e, por fim, traduzem-se os dados de energia em insights compreensíveis sobre sustentabilidade.

### **3.1. Passo 1: Diagramas de Sistemas na Linguagem da Energia (ESL)**

O primeiro e mais crucial passo em qualquer avaliação emergética é a criação de um

diagrama de fluxo do sistema.<sup>20</sup> Este diagrama serve a múltiplos propósitos: define os limites do sistema em estudo, força o analista a identificar todos os componentes, armazenamentos e fluxos de entrada e saída relevantes, e organiza a subsequente coleta de dados.<sup>20</sup> Para construir esses diagramas, Odum desenvolveu a

**Linguagem de Sistemas de Energia** (ESL - *Energy Systems Language*), uma linguagem pictográfica onde cada símbolo possui um significado energético e cinético preciso, permitindo uma representação rigorosa das interações do sistema.<sup>22</sup> A Tabela 1 abaixo apresenta os símbolos mais comuns da ESL.

**Tabela 1: Simbologia da Linguagem de Sistemas de Energia (ESL)**

Símbolo	Nome	Descrição
Fonte ( <i>Source</i> )	Representa uma fonte de energia ou material que entra no sistema a partir do exterior. O fluxo é controlado por fatores externos ao sistema.	
Armazenamento ( <i>Storage</i> )	Um compartimento que armazena uma quantidade de energia, material ou informação dentro do sistema. Representa uma variável de estado.	
!( <a href="https://i.imgur.com/a9h6x4o.png">https://i.imgur.com/a9h6x4o.png</a> )	Dissipador de Calor ( <i>Heat Sink</i> )	Representa a dispersão de energia de alta qualidade em calor de baixa qualidade, conforme a Segunda Lei da Termodinâmica. Todo processo real e armazenamento está associado a uma perda de energia.
Produtor ( <i>Producer</i> )	Uma unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade de fontes externas em energia de maior qualidade, geralmente envolvendo um ciclo de	



	<p>materiais. Ex: plantas na fotossíntese.</p>	
Consumidor ( <i>Consumer</i> )	<p>Uma unidade que se alimenta de energia já concentrada (produzida por outros), transformando-a e armazenando-a para produzir trabalho e realimentar o sistema (feedback). Ex: animais, indústrias.</p>	
Interação ( <i>Interaction</i> )	<p>Representa um processo onde dois ou mais fluxos são necessários para produzir uma saída. Um fluxo (controle) amplifica ou limita o outro, atuando como um "portão de trabalho".</p>	
<p>!(<a href="https://i.imgur.com/d7Bv6vK.png">https://i.imgur.com/d7Bv6vK.png</a>)</p>	Transação ( <i>Transaction</i> )	<p>Representa a troca de bens, serviços ou energia (linha contínua) por dinheiro (linha tracejada), que flui na direção oposta.</p>
Chave ( <i>Switch</i> )	<p>Um símbolo que representa um processo que liga ou desliga um fluxo com base em um sinal de controle.</p>	

Fonte: Baseado nos símbolos descritos em.<sup>22</sup>

### 3.2. Passo 2: Construção da Tabela de Avaliação Emergética

Com o diagrama de sistema definido, o passo seguinte é a construção da tabela de avaliação emergética, que é o coração da contabilidade. Esta tabela organiza e quantifica todos os fluxos de entrada.<sup>1</sup> O procedimento é o seguinte:

1. **Listar Itens:** Na primeira coluna, listam-se todos os fluxos de entrada que

cruzam a fronteira do sistema, conforme identificado no diagrama.

2. **Quantificar Fluxos Brutos:** Na segunda coluna, quantificam-se esses fluxos em suas unidades nativas por um período de tempo definido (geralmente um ano), como joules/ano, kg/ano ou \$/ano.
3. **Aplicar a Transformidade:** Na terceira coluna, atribui-se a cada item seu respectivo valor unitário de energia (UEV), que pode ser uma transformidade (sej/J), uma energia específica (sej/g) ou uma razão energia/dinheiro (sej/\$). Esses valores são obtidos a partir de uma extensa literatura científica de avaliações emergéticas anteriores.<sup>26</sup>
4. **Calcular o Fluxo de Energia:** Na quarta coluna, calcula-se o fluxo de energia para cada item multiplicando o fluxo bruto (Coluna 2) por seu valor unitário de energia (Coluna 3).
5. **Somar e Categorizar:** Finalmente, os fluxos de energia individuais são somados para obter a energia total (Y) que sustenta o sistema. Para o cálculo dos índices, esses fluxos são previamente categorizados em três tipos principais:
  - **Recursos Renováveis (R):** Fluxos da natureza que são repostos em escalas de tempo humanas (ex: energia solar, vento, chuva).
  - **Recursos Não Renováveis (N):** Recursos da natureza que são consumidos mais rapidamente do que são formados (ex: combustíveis fósseis, minerais, erosão do solo).
  - **Recursos Comprados da Economia (F):** Bens e serviços adquiridos do sistema econômico humano (ex: eletricidade, fertilizantes, máquinas, mão de obra).<sup>1</sup>

### 3.3. Passo 3: Cálculo e Interpretação dos Índices Emergéticos

A tabela de avaliação fornece os dados brutos. Para extrair significado e avaliar o desempenho do sistema, calculam-se vários índices emergéticos. Eles funcionam como um painel de controle, oferecendo uma visão multidimensional da sustentabilidade do sistema ao revelar os trade-offs entre produtividade, impacto ambiental e dependência econômica.<sup>20</sup> Os principais índices são:

- **Razão de Rendimento Emergético (Emergy Yield Ratio - EYR):**
  - Fórmula:  $EYR = FY$
  - Interpretação: Mede a capacidade de um sistema de utilizar recursos locais (renováveis e não renováveis) para produzir uma saída em resposta a um investimento da economia (F). Um EYR alto (>2) indica que o processo é um

bom "multiplicador" de recursos locais e contribui com um excedente líquido para a economia. Um EYR próximo a 1 indica que o sistema mal se paga em termos emergéticos.<sup>29</sup>

- **Razão de Carga Ambiental (Environmental Loading Ratio - ELR):**
  - Fórmula:  $ELR = R/(N+F)$
  - Interpretação: Mede o estresse que o sistema impõe ao ambiente local. Compara a pressão dos insumos não renováveis (N) e comprados (F) com a capacidade de suporte dos recursos renováveis locais (R). Um ELR baixo (<2) é desejável, indicando baixa pressão ambiental, enquanto valores altos (>10) sugerem um sistema altamente dependente e potencialmente degradante.<sup>18</sup>
- **Razão de Investimento Emergético (Emergy Investment Ratio - EIR):**
  - Fórmula:  $EIR = (R+N)/F$
  - Interpretação: Compara a intensidade do investimento econômico com a contribuição dos recursos ambientais locais (gratuitos). Um EIR alto indica que o sistema é altamente desenvolvido e intensivo em capital/tecnologia, mas também muito dependente de insumos externos, enquanto um EIR baixo caracteriza sistemas mais rurais ou menos desenvolvidos.<sup>18</sup>
- **Índice de Sustentabilidade Emergética (Emergy Sustainability Index - ESI):**
  - Fórmula:  $ESI = ELR \times EYR$
  - Interpretação: É um indicador agregado que mede o rendimento (contribuição para a economia) por unidade de carga ambiental. Ele equilibra o benefício (EYR) com o estresse (ELR). Sistemas com  $ESI < 1$  são considerados consumidores e insustentáveis a longo prazo. Valores entre 1 e 5 sugerem sustentabilidade a médio prazo, e valores >5 indicam sustentabilidade a longo prazo.<sup>30</sup>
- **Renovabilidade (%R):**
  - Fórmula:  $\%R = EYR \times 100$
  - Interpretação: Mede a porcentagem da emergia total do sistema que é derivada de fontes renováveis. É um indicador direto da sustentabilidade a longo prazo; quanto maior o valor, mais o sistema opera com base em fluxos de energia sustentáveis.<sup>20</sup>

## Seção 4: Aplicações da Análise Emergética: Estudos de Caso

A força da metodologia emergética não reside apenas em sua elegância teórica, mas em sua aplicação prática para diagnosticar e comparar sistemas complexos. Sua

capacidade de colocar sistemas fundamentalmente diferentes — de um campo de milho a uma cidade inteira — em uma base comum a torna uma ferramenta de diagnóstico comparativo excepcionalmente poderosa para a formulação de políticas. Os estudos de caso a seguir ilustram como a análise emergética revela dependências ocultas e os verdadeiros custos biofísicos que sustentam os sistemas humanos.

#### **4.1. Avaliação de Agroecossistemas**

A agricultura representa uma interface ideal para a análise emergética, pois combina de forma explícita insumos da natureza (sol, chuva, solo) com insumos da economia (combustível, fertilizantes, trabalho).<sup>35</sup>

Um estudo de caso paradigmático realizado por Martin et al. (2006) comparou três sistemas agrícolas muito distintos: (1) uma produção convencional de milho em larga escala no Kansas, EUA; (2) uma pequena produção familiar de amoras em Ohio, EUA; e (3) um sistema de policultivo de subsistência do povo indígena Lacandon em Chiapas, México.<sup>35</sup> Os resultados foram reveladores. O sistema de milho, altamente industrializado, apresentou o maior rendimento de energia por hectare. No entanto, sua análise emergética mostrou que ele era profundamente insustentável: possuía a maior carga ambiental (ELR de 18.83) e o menor Índice de Sustentabilidade Emergética (ESI de apenas 0.06), devido à sua massiva dependência de insumos não renováveis como fertilizantes e água de irrigação, que representavam 95% da energia comprada. No extremo oposto, o sistema indígena Lacandon, que imita a sucessão ecológica natural, teve o menor rendimento, mas se mostrou extraordinariamente sustentável, com um ESI de 115.98, pois operava quase inteiramente com base em recursos renováveis locais. O sistema de amoras ficou em uma posição intermediária.<sup>36</sup>

Este caso ilustra de forma quantitativa o trade-off fundamental entre a alta produtividade, impulsionada por insumos fósseis, e a sustentabilidade a longo prazo. Ele expõe os custos ambientais ocultos da agricultura industrial e quantifica o valor da sabedoria ecológica incorporada nos sistemas tradicionais. Outros estudos aplicaram a mesma lógica para avaliar sistemas de produção de café na Colômbia, demonstrando como melhorias na eficiência do trabalho podem aumentar a sustentabilidade<sup>37</sup>, e sistemas de produção de leite, comparando abordagens tradicionais e silvipastoris.<sup>18</sup>

## **4.2. Valoração de Ecossistemas Naturais e Serviços Ecossistêmicos**

Um dos maiores desafios da gestão ambiental é atribuir valor ao capital natural e aos serviços ecossistêmicos, que são frequentemente considerados "gratuitos" pela economia de mercado. A emergia oferece uma metodologia para quantificar seu valor biofísico.<sup>38</sup>

Um estudo sofisticado de Berrios et al. aplicou a análise emergética para avaliar a "saúde" de três ecossistemas bentônicos (do fundo do mar) no Chile, todos influenciados por um intenso fenômeno de ressurgência costeira que traz nutrientes para a superfície.<sup>40</sup> A análise da "assinatura emergética" de cada baía revelou que o fluxo de nitrato da ressurgência dominava o sistema, um desequilíbrio que sugere uma menor diversidade biológica. Mais importante, o cálculo de índices de rede baseados em emergia, como a "ascendência", permitiu aos pesquisadores diferenciar a organização funcional e a resiliência de cada ecossistema. Isso demonstrou que a emergia pode ir além da simples contabilidade de entradas e saídas para se tornar uma ferramenta de diagnóstico ecológico avançado, capaz de avaliar a estrutura e a função internas de sistemas complexos.<sup>40</sup>

Em uma aplicação mais direta à política, um estudo na Bacia do Rio Qingyi, na China, utilizou a análise emergética para calcular o "transbordamento ecológico" — a quantidade de serviços ecossistêmicos gerados a montante que são utilizados a jusante. Com base nesses cálculos, os pesquisadores propuseram um valor monetário para a compensação ecológica que a cidade a jusante deveria pagar à cidade a montante pela utilização desses serviços, fornecendo uma base científica para políticas de gestão de bacias hidrográficas.<sup>41</sup>

## **4.3. Análise do Metabolismo de Sistemas Urbanos**

As cidades podem ser vistas como ecossistemas heterotróficos, com um metabolismo intenso que depende de um fluxo contínuo de energia, materiais e informações de vastas áreas de suporte. A análise emergética é ideal para modelar esse metabolismo e avaliar a dependência e a eficiência das cidades.<sup>42</sup>

Um estudo de Zhang et al. (2009) combinou a análise emergética com a análise de redes ecológicas para estudar o metabolismo de quatro grandes cidades chinesas: Pequim, Xangai, Tianjin e Chongqing.<sup>42</sup> A pesquisa revelou que, embora as cidades tivessem estruturas de rede semelhantes, Pequim apresentava um "índice de mutualismo" significativamente maior. Isso indicava uma maior cooperação e sinergia entre seus diferentes setores (agrícola, industrial, doméstico), resultando em um metabolismo geral mais eficiente. Este caso mostra como a emergia pode ser usada para diagnosticar não apenas a dependência externa de uma cidade, mas também a saúde e a eficiência de suas interações

*internas.*<sup>42</sup>

Outro estudo inovador propôs e avaliou um "Sistema de Autocirculação Urbana" para Providence, Rhode Island, EUA, integrando subsistemas de tratamento de resíduos (biogás, zonas úmidas construídas) e produção (agricultura urbana, energia solar). A análise emergética foi usada para comparar o desempenho de cada subsistema isoladamente versus o sistema integrado. Os resultados foram impressionantes: o sistema integrado apresentou um Índice de Sustentabilidade Emergética (ESI) ordens de magnitude maior ( $7.45 \times 10^2$ ) do que a maioria dos componentes isolados, quantificando de forma robusta os enormes benefícios sinérgicos do design de economia circular.<sup>43</sup>

## **Seção 5: Análise Comparativa e Perspectivas Críticas**

Para apreciar plenamente o papel da emergia, é essencial situá-la no campo mais amplo das ferramentas de contabilidade ambiental e abordar de forma transparente as críticas e limitações que acompanham a teoria. Este exame crítico não diminui seu valor, mas, ao contrário, refina a compreensão de suas forças e de seu domínio de aplicação ideal.

### **5.1. Emergia no Contexto de Outras Ferramentas de Contabilidade Ambiental**

A emergia não é a única metodologia que busca quantificar a interação entre os sistemas humanos e o meio ambiente. Outras ferramentas, como a Análise de Ciclo

de Vida (ACV) e a Pegada Ecológica, são mais difundidas, embora respondam a perguntas diferentes.

A **Análise de Ciclo de Vida (ACV)** é uma metodologia padronizada pela ISO 14040 que avalia os impactos ambientais potenciais de um produto ou serviço ao longo de todas as etapas de sua vida, "do berço ao túmulo".<sup>44</sup> A ACV adota uma perspectiva de "usuário" ou de "impacto", focando nas saídas do sistema (emissões, resíduos) e seus efeitos sobre o meio ambiente, como o aquecimento global (medido em kg de

CO<sub>2</sub>-equivalente), a acidificação ou a eutrofização.<sup>46</sup> É uma ferramenta multicritério, que gera resultados para diversas categorias de impacto. Em contraste, a emergia adota uma perspectiva de "doador" ou de "recurso", focando nos insumos que a natureza e a economia fornecem para criar o sistema. Ela produz um indicador único e agregado (emergia total) que mede o custo biofísico da formação, não o impacto da sua utilização ou descarte.<sup>47</sup> As duas metodologias são, portanto, vistas como altamente complementares: a emergia avalia a sustentabilidade dos recursos que entram no sistema, enquanto a ACV avalia os danos causados pelos poluentes que saem dele.<sup>49</sup>

A **Pegada Ecológica** mede a demanda humana sobre a biosfera em termos da área de terra e água biologicamente produtiva necessária para sustentar um determinado estilo de vida, ou seja, para fornecer os recursos consumidos e absorver os resíduos gerados.<sup>51</sup> Sua unidade é o "hectare global" (gha). Assim como a emergia, é um indicador agregado, mas traduz a demanda em uma unidade de

*espaço*, enquanto a emergia a traduz em uma unidade de *energia solar passada*. A principal diferença conceitual é que a emergia incorpora explicitamente a qualidade hierárquica da energia através da transformidade, um aspecto que a Pegada Ecológica não aborda diretamente.<sup>47</sup> Reconhecendo suas complementaridades, alguns pesquisadores desenvolveram modelos híbridos, como a "Pegada Ecológica Emergética" (EEF), que busca combinar a perspectiva de capacidade de carga da Pegada Ecológica com a base termodinâmica da emergia.<sup>53</sup>

A Tabela 2 resume as principais diferenças entre essas três ferramentas.

**Tabela 2: Comparativo entre Análise Emergética, ACV e Pegada Ecológica**

Critério	Análise Emergética	Análise de Ciclo de Vida (ACV)	Pegada Ecológica

<b>Unidade Fundamental</b>	Emjoule Solar (sej)	Unidades de impacto específicas (ex: kg CO <sub>2</sub> -eq, kg SO <sub>2</sub> -eq)	Hectare Global (gha)
<b>Perspectiva</b>	Lado do Doador (recursos)	Lado do Usuário (impactos)	Lado do Usuário (demanda)
<b>Foco Principal</b>	Custo biofísico acumulado para a formação de um sistema/produto	Impactos ambientais potenciais das saídas (emissões, resíduos)	Demanda por área bioprodutiva para sustentar o consumo
<b>Tratamento da Qualidade</b>	Central (através da Transformidade)	Ignorado ou tratado via fatores de equivalência de impacto	Implícito na produtividade da terra, mas não hierárquico
<b>Aplicação Típica</b>	Avaliação da sustentabilidade e eficiência de sistemas complexos (nações, ecossistemas)	Avaliação de impactos ambientais específicos de um produto ou processo	Comparação da demanda humana com a biocapacidade planetária ou regional

Fonte: Baseado nas informações de.<sup>47</sup>

## 5.2. Críticas, Limitações e o Debate Científico

Apesar de seu poder conceitual, a teoria da emergia não está isenta de críticas e enfrenta desafios significativos para sua aceitação na comunidade científica mais ampla.

As **críticas metodológicas** frequentemente se concentram na incerteza e na padronização. A precisão de uma análise emergética depende criticamente dos Valores Unitários de Emergia (UEVs) ou transformidades. O cálculo desses valores é complexo, e eles podem variar entre estudos e locais, introduzindo uma fonte significativa de incerteza. A falta de uma base de dados de UEVs globalmente padronizada e revisada por pares é uma limitação prática e uma crítica recorrente.<sup>48</sup> Além disso, a definição dos limites de um sistema, um passo inicial crucial, contém um



elemento de subjetividade que pode influenciar os resultados finais.<sup>48</sup>

As **críticas teóricas** são mais profundas e refletem um choque de paradigmas. Economistas, em particular, criticam a "teoria do valor emergético" por ser uma teoria baseada exclusivamente na oferta (*supply-side*). Ao definir o valor de algo com base no trabalho da natureza para produzi-lo, a emergia ignora completamente o papel da demanda, das preferências humanas e da utilidade, que são os pilares da teoria do valor neoclássica.<sup>56</sup> Este não é um mero desacordo técnico, mas um conflito fundamental de visões de mundo: uma visão ecocêntrica, onde o valor é determinado pela biofísica, versus uma visão antropocêntrica, onde o valor é determinado pela utilidade humana. Adicionalmente, a proposta do Princípio da Máxima Empower como uma "quarta lei" da termodinâmica é controversa e não é amplamente aceita pela comunidade de físicos, que a considera, por vezes, tautológica ou insuficientemente formalizada.<sup>12</sup>

Como resultado, apesar de décadas de pesquisa, a emergia permanece um conceito relativamente de nicho. Ela não alcançou a consolidação científica e a aceitação institucional da ACV, por exemplo, e ainda enfrenta ceticismo e resistência de pesquisadores de outras disciplinas.<sup>56</sup>

## Seção 6: O Futuro da Pesquisa em Emergia e Implicações Políticas

Apesar dos desafios, a pesquisa em emergia está em rápida expansão e evolução, abrindo novas fronteiras e oferecendo ferramentas valiosas para a formulação de políticas públicas em um mundo que busca urgentemente a sustentabilidade.

### 6.1. Novas Fronteiras e Direções de Pesquisa

A tendência mais forte e promissora na pesquisa em emergia é a **integração metodológica**. Em vez de ver as diferentes ferramentas de contabilidade ambiental como concorrentes, os pesquisadores estão cada vez mais buscando combiná-las para criar avaliações mais completas. A integração da emergia com a Análise de Ciclo

de Vida (ACV) é uma área particularmente ativa, com o objetivo de unir a perspectiva de recursos da emergia (upstream) com a perspectiva de impactos da ACV (downstream).<sup>48</sup> Da mesma forma, a combinação com a Pegada Ecológica e com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite análises de sustentabilidade que são tanto biofisicamente robustas quanto espacialmente explícitas.

Paralelamente, a comunidade de pesquisa em emergia trabalha continuamente no **refinamento teórico e prático** da metodologia. Isso inclui esforços para atualizar o *baseline* emergético global (a emergia total que impulsiona a biosfera anualmente), desenvolver UEVs mais precisos e específicos para cada localidade, e melhorar a transparência e a facilidade de uso da análise para torná-la mais acessível a não especialistas.<sup>48</sup>

Finalmente, a pesquisa está se expandindo para **novas aplicações**. A análise emergética está sendo usada para avaliar a sustentabilidade de tecnologias de energia renovável, para quantificar os benefícios de modelos de economia circular e para analisar sistemas de informação e conhecimento. A integração com modelos de inteligência artificial e aprendizado de máquina também abre possibilidades para simulações de sistemas complexos com uma base emergética.<sup>61</sup>

## 6.2. Implicações para Políticas Públicas e Tomada de Decisão

O potencial da emergia para influenciar a tomada de decisões no mundo real é vasto. Ao fornecer uma medida de "riqueza real", a emergia oferece aos formuladores de políticas um critério de decisão que vai além do Produto Interno Bruto (PIB). A política pública, orientada pela emergia, buscaria maximizar o fluxo de *empower* de uma nação ou região, garantindo que os projetos de desenvolvimento (como barragens, estradas ou novas indústrias) resultem em um aumento líquido da riqueza real, uma vez que os custos ambientais e a depleção de recursos são totalmente contabilizados.<sup>16</sup>

A análise emergética também é uma ferramenta poderosa para avaliar a equidade no **comércio internacional**. Estudos frequentemente mostram que países em desenvolvimento exportam produtos de alta emergia (matérias-primas, produtos agrícolas que incorporam muito trabalho da natureza) em troca de dinheiro e produtos manufaturados de baixa emergia. Isso resulta em uma transferência líquida de riqueza real dos países mais pobres para os mais ricos, um desequilíbrio invisível

para a contabilidade monetária.<sup>18</sup> Esses insights têm implicações profundas para políticas comerciais justas e para o desenvolvimento sustentável.

Na **gestão de recursos**, a metodologia fornece uma base quantitativa sólida para políticas ambientais. O estudo de caso do estado da Virgínia Ocidental, nos EUA, demonstrou como uma avaliação emergética em nível estadual pode informar a gestão ambiental, revelando a dependência do estado da exportação de recursos não renováveis (carvão) e a balança de trocas com a economia nacional.<sup>64</sup> A sociedade enfrenta uma transição energética massiva, e ferramentas como o Retorno Energético sobre o Investimento (EROI) são usadas para avaliar a viabilidade de novas fontes de energia.<sup>66</sup> A análise emergética pode ser vista como uma versão muito mais abrangente e ecologicamente fundamentada do EROI. Enquanto o EROI considera principalmente a energia investida pela economia, a emergia inclui a energia investida pela natureza e os serviços ecossistêmicos necessários. Uma fazenda solar pode ter um bom EROI, mas sua análise emergética revelará o custo total dos materiais, do uso da terra e dos processos industriais necessários para sua construção, fornecendo uma imagem mais completa de sua sustentabilidade a longo prazo.

No entanto, o maior desafio para o futuro da emergia pode não ser técnico, mas sim de comunicação. A complexidade conceitual da teoria e sua visão de mundo, que desafia a primazia do valor de mercado, representam barreiras significativas para sua adoção em políticas públicas.<sup>56</sup> Os tomadores de decisão estão acostumados a pensar em termos de dólares, empregos e crescimento do PIB, não em emjoules solares e transformidades. Portanto, para que a emergia realize seu potencial de influenciar políticas, seus insights profundos precisam ser "traduzidos" em narrativas e métricas que sejam compreensíveis e convincentes para um público não especializado.

## Conclusão

A síntese emergética, concebida por Howard T. Odum, representa mais do que uma simples ferramenta de contabilidade ambiental; ela oferece uma reavaliação fundamental do conceito de valor. Ao definir a emergia como a "memória energética" de todos os produtos e serviços, quantificada em uma unidade comum baseada na energia solar, a metodologia permite uma avaliação integrada dos sistemas naturais e humanos. Ela torna visível o imenso trabalho da natureza — o sol, o vento, a chuva, os

ciclos geológicos — que sustenta a economia, mas que é ignorado pela contabilidade monetária.

Através de seus pilares teóricos, como a transformidade e o princípio da máxima potência, e de sua metodologia rigorosa baseada em diagramas de sistemas, tabelas de avaliação e índices de desempenho, a análise emergética fornece um meio robusto para avaliar a sustentabilidade, a eficiência e a carga ambiental de sistemas complexos. Os estudos de caso em agricultura, ecologia e planejamento urbano demonstram seu poder de diagnóstico, revelando os custos ocultos da produção industrializada, o valor dos sistemas tradicionais e as dependências profundas da sociedade moderna em relação aos recursos não renováveis.

Apesar de enfrentar críticas válidas e desafios relacionados à sua complexidade e aceitação, a emergia ocupa um nicho único e insubstituível no campo da ciência da sustentabilidade. Sua perspectiva "doadora" a torna um complemento essencial para outras ferramentas como a Análise de Ciclo de Vida e a Pegada Ecológica. Em última análise, a síntese emergética de H.T. Odum fornece não apenas um método de contabilidade, mas uma visão de mundo holística. Ela nos desafia a repensar o significado de riqueza, eficiência e progresso em um planeta com recursos finitos, oferecendo uma bússola biofísica para guiar a humanidade em sua transição para um futuro verdadeiramente sustentável.

## Referências citadas

1. Aplicação do Conceito de Emergia na Contabilidade de Gestão Ambiental - ResearchGate, acessado em julho 23, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/270159172\\_Aplicacao\\_do\\_Conceito\\_de\\_Emergia\\_na\\_Contabilidade\\_de\\_Gestao\\_Ambiental](https://www.researchgate.net/publication/270159172_Aplicacao_do_Conceito_de_Emergia_na_Contabilidade_de_Gestao_Ambiental)
2. Emergia – Wikipédia, a enciclopédia livre, acessado em julho 23, 2025, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Emergia>
3. Emergia - Parte 1 - e-Aulas da USP, acessado em julho 23, 2025, <https://eaulas.usp.br/portal/VMSResources/video.action;jsessionid=19A8C38FD258D29D9F3F135385611B7E?itemId=17634&idVideoVersion=36381>
4. Emergía - Wikipedia, la enciclopedia libre, acessado em julho 23, 2025, <https://es.wikipedia.org/wiki/Emerg%C3%ADa>
5. Energia – Wikipédia, a enciclopédia livre, acessado em julho 23, 2025, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia>
6. Howard T. Odum - Wikipedia, acessado em julho 23, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Howard\\_T.\\_Odum](https://en.wikipedia.org/wiki/Howard_T._Odum)
7. Institute of Ecology records, Howard Thomas Odum interview - Hargrett Manuscripts and Russell Library Finding Aids, acessado em julho 23, 2025, [https://sclfind.libs.uga.edu/sclfind/view?docId=ead/UA97-066\\_0012-1.xml;query=:brand=default](https://sclfind.libs.uga.edu/sclfind/view?docId=ead/UA97-066_0012-1.xml;query=:brand=default)

8. Howard Odum - Aspen Global Change Institute, acessado em julho 23, 2025, <https://www.agci.org/people/0034x000013tCdZAAU/howard-odum>
9. Anais Eletrônico INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE EMERGIA Hermam Vargas<sup>1</sup>, Jennifer Martins Waldhelm<sup>2</sup> RESUMO: Esta pesquisa será um - Unicesumar, acessado em julho 23, 2025, [https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2015/wp-content/uploads/sites/65/2016/07/Jennifer\\_Martins\\_Waldhelm.pdf](https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2015/wp-content/uploads/sites/65/2016/07/Jennifer_Martins_Waldhelm.pdf)
10. COMPETITIVIDADE EMERGIA (COM “M” MESMO) E O SISTEMA EMBALAGEM IDEIAS PARA MODELAGEM UTILIZANDO A ANÁLISE EMERGÉTICA PARTE - Instituto Mauá de Tecnologia, acessado em julho 23, 2025, <https://maua.br/files/artigos/artigo-emergia-parte-1.pdf>
11. INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE EMERGIA - Unicesumar, acessado em julho 23, 2025, [https://www.unicesumar.edu.br/mostra-2016/wp-content/uploads/sites/154/2017/01/jennifer\\_martins\\_waldhelm.pdf](https://www.unicesumar.edu.br/mostra-2016/wp-content/uploads/sites/154/2017/01/jennifer_martins_waldhelm.pdf)
12. Emergia e propostas de quarto princípio da Termodinâmica - UFPR, acessado em julho 23, 2025, <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM104/Termodinamica/Aulas-ppt/22-Jun-2017-JVargas-Emergia-e-proposta-de-4o-principio-da-Termodinamica.pdf>
13. CELSO EDUARDO TUNA Análise exergetica e termoeconomia ..., acessado em julho 23, 2025, <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/4ce30686-a20e-4990-ac32-d493617d58be/download>
14. 1 Potencialidades da Contabilidade Emergética para Disclosures Ambientais Resumo O uso de métodos de valoração dos impactos - Congresso USP, acessado em julho 23, 2025, <https://congressousp.fipecafi.org/anais/artigos112011/388.pdf>
15. SELF-ORGANIZATION AND MAXIMUM EMPOWER - Howard T. Odum - PA35 Going Live., acessado em julho 23, 2025, [https://pa-net.squarespace.com/s/1995\\_Odum\\_Self-Organization-Maximum-Empower.pdf](https://pa-net.squarespace.com/s/1995_Odum_Self-Organization-Maximum-Empower.pdf)
16. Emergy Evaluation - EPA Archives, acessado em julho 23, 2025, <https://archive.epa.gov/emap/aed/html/collaboration/web/pdf/emergyeval.pdf>
17. Howard T. Odum, acessado em julho 23, 2025, <http://www.eoht.info/page/Howard%20T.%20Odum>
18. CONTABILIDADE AMBIENTAL EMERGÉTICA: UMA ... - RI UFLA, acessado em julho 23, 2025, [http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/2483/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_Contabilidade%20ambiental%20emerg%C3%A9tica.pdf](http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/2483/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Contabilidade%20ambiental%20emerg%C3%A9tica.pdf)
19. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAL BRUNO MEIRELLES DE - Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, acessado em julho 23, 2025, [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106132/tde-14102021-145638/publico/BMO\\_Dissertacao.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106132/tde-14102021-145638/publico/BMO_Dissertacao.pdf)
20. AVALIAÇÃO EMERGÉTICA DO SISTEMA DE ... - alicie Embrapa, acessado em julho

- 23, 2025,  
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1015865/1/2005AA025.pdf>
21. Valoração Ambiental pela Metodologia Emergética.indd, acessado em julho 23, 2025,  
[https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/EDITORA/catalogo/valoracao\\_ambiental\\_pela\\_metodologia\\_energetica.pdf](https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/EDITORA/catalogo/valoracao_ambiental_pela_metodologia_energetica.pdf)
  22. Energy Systems in Ecology, acessado em julho 23, 2025,  
[https://www.emergysociety.com/wp-content/uploads/OdumHT-and-OdumEC.1989.Energy-Systems-in-Ecology.Systems-Control-encyclopedia.Perga\\_.pdf](https://www.emergysociety.com/wp-content/uploads/OdumHT-and-OdumEC.1989.Energy-Systems-in-Ecology.Systems-Control-encyclopedia.Perga_.pdf)
  23. Energy systems language - Wikipedia, acessado em julho 23, 2025,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_systems\\_language](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_systems_language)
  24. ISAER - International Society for the Advancement of Emergy ..., acessado em julho 23, 2025, <https://www.emergysociety.com/esl-symbols/>
  25. – Symbols of the Emergy Language System. | Download Scientific Diagram - ResearchGate, acessado em julho 23, 2025,  
[https://www.researchgate.net/figure/Symbols-of-the-Emergy-Language-System\\_fig1\\_262635268](https://www.researchgate.net/figure/Symbols-of-the-Emergy-Language-System_fig1_262635268)
  26. Handbook of Emergy Evaluation, acessado em julho 23, 2025,  
<https://archive.epa.gov/aed/html/collaboration/web/pdf/folio1.pdf>
  27. Template emergy table (for a generic agricultural system) - ResearchGate, acessado em julho 23, 2025,  
[https://www.researchgate.net/figure/Template-emergy-table-for-a-generic-agricultural-system\\_tbl1\\_273181613](https://www.researchgate.net/figure/Template-emergy-table-for-a-generic-agricultural-system_tbl1_273181613)
  28. Análise Emergética - PM Analysis, acessado em julho 23, 2025,  
<https://pmanalysis.com.br/artigos/analise-emergetica/>
  29. The emergy perspective: natural and anthropic energy flows in agricultural biomass production - JRC Publications Repository, acessado em julho 23, 2025,  
[https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC116274/jrc116274\\_emergy\\_jrc\\_report\\_12\\_june\\_2019\\_pubsy.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC116274/jrc116274_emergy_jrc_report_12_june_2019_pubsy.pdf)
  30. Emergy - Wikipedia, acessado em julho 23, 2025,  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Emergy>
  31. Environmental impact of different agricultural ... - SciELO Brasil, acessado em julho 23, 2025,  
<https://www.scielo.br/j/rca/a/kwbfHGdYtgVhmXLZDFpTPyK/?lang=en>
  32. EMERGY SYNTHESIS:, acessado em julho 23, 2025,  
[https://www.emergysociety.com/wp-content/uploads/23\\_Lanzotti.etal\\_.pdf](https://www.emergysociety.com/wp-content/uploads/23_Lanzotti.etal_.pdf)
  33. Emergy Analysis and Sustainability Efficiency Analysis of Different Crop-Based Biodiesel in Life Cycle Perspective - PMC, acessado em julho 23, 2025,  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3666206/>
  34. Emergy Analysis and Sustainability Efficiency Analysis of Different ..., acessado em julho 23, 2025, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3666206/>
  35. Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management | Request PDF - ResearchGate, acessado em julho 23, 2025,



- [https://www.researchgate.net/publication/223835482\\_Emergy\\_evaluation\\_of\\_the\\_performance\\_and\\_sustainability\\_of\\_three\\_agricultural\\_systems\\_with\\_different\\_scenarios\\_and\\_management](https://www.researchgate.net/publication/223835482_Emergy_evaluation_of_the_performance_and_sustainability_of_three_agricultural_systems_with_different_scenarios_and_management)
36. Emergy evaluation of the performance and sustainability of three ..., acessado em julho 23, 2025, <https://www.emergysociety.com/wp-content/uploads/MartinJF-et-al.2006.Evaluating-comparing-sustainability-of-3-ag.-methods-with-emergy-analysis.pdf>
  37. A Multidisciplinary Approach Integrating Emergy Analysis and Process Modeling for Agricultural Systems Sustainable Management—Coffee Farm Validation - MDPI, acessado em julho 23, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8931>
  38. Utilização da metodologia emergética para avaliação dos ecossistemas de pastagens e serviços ecossistêmicos do Pantanal. - Portal Embrapa, acessado em julho 23, 2025, <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1086262/utilizacao-da-metodologia-emergetica-para-avaliacao-dos-ecossistemas-de-pastagens-e-servicos-ecossistemicos-do-pantanal>
  39. Emergy-based evaluation of natural capital and ecosystem services ..., acessado em julho 23, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/288968421\\_Emergy-based\\_evaluation\\_of\\_natural\\_capital\\_and\\_ecosystem\\_services\\_the\\_case\\_study\\_of\\_Astroni\\_Wildlife\\_Reserve\\_Italy](https://www.researchgate.net/publication/288968421_Emergy-based_evaluation_of_natural_capital_and_ecosystem_services_the_case_study_of_Astroni_Wildlife_Reserve_Italy)
  40. Emergy-based indicators for evaluating ecosystem health: A case ..., acessado em julho 23, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6171125/>
  41. Emergy Analysis and Ecological Spillover as Tools to Quantify Ecological Compensation in Xuchang City, Qingyi River Basin, China - MDPI, acessado em julho 23, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/414>
  42. Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems ..., acessado em julho 23, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/222126750\\_Ecological\\_network\\_and\\_emergy\\_analysis\\_of\\_urban\\_metabolic\\_systems\\_Model\\_development\\_and\\_a\\_case\\_study\\_of\\_four\\_Chinese\\_cities](https://www.researchgate.net/publication/222126750_Ecological_network_and_emergy_analysis_of_urban_metabolic_systems_Model_development_and_a_case_study_of_four_Chinese_cities)
  43. Multi-System Urban Waste-Energy Self-Circulation: Design of Urban ..., acessado em julho 23, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8303415/>
  44. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) - ACV Brasil, acessado em julho 23, 2025, <https://acvbrasil.com.br/consultorias/avaliacao-do-ciclo-de-vida-acv>
  45. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos - SciELO, acessado em julho 23, 2025, <https://www.scielo.br/j/prod/a/k9QMLVqqYtNxvPXtJSm9JYM/?format=pdf&lang=pt>
  46. O que é Avaliação do Ciclo de Vida - ACV, acessado em julho 23, 2025, <https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>
  47. Review of Emergy Analysis and Life Cycle Assessment: Coupling Development Perspective, acessado em julho 23, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/367>
  48. Review of Emergy Analysis and Life Cycle Assessment, acessado em julho 23,

- 2025,  
<https://www.wisdomlib.org/science/journal/sustainability-journal-mdpi/d/doc1777929.html>
49. (PDF) Review of Emergy Analysis and Life Cycle Assessment: Coupling Development Perspective - ResearchGate, acessado em julho 23, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/338379633\\_Review\\_of\\_Emergy\\_Analysis\\_and\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_Coupling\\_Development\\_Perspective](https://www.researchgate.net/publication/338379633_Review_of_Emergy_Analysis_and_Life_Cycle_Assessment_Coupling_Development_Perspective)
  50. Is there more in common than we think? Convergence of ecological ..., acessado em julho 23, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/319977669\\_Is\\_there\\_more\\_in\\_common\\_than\\_we\\_think\\_Convergence\\_of\\_ecological\\_footprinting\\_emergy\\_analysis\\_life\\_cycle\\_assessment\\_and\\_other\\_methods\\_of\\_environmental\\_accounting](https://www.researchgate.net/publication/319977669_Is_there_more_in_common_than_we_think_Convergence_of_ecological_footprinting_emergy_analysis_life_cycle_assessment_and_other_methods_of_environmental_accounting)
  51. Entenda a pegada ecológica e como reduzi-la - Ei Energia, acessado em julho 23, 2025, <https://eienergia.com.br/entenda-a-pegada-ecologica-e-como-reduzi-la/>
  52. O que é pegada ambiental e pegada ecológica? - Blog Ofitexto, acessado em julho 23, 2025, <https://blog.ofitexto.com.br/agronomia/o-que-e-pegada-ambiental-e-pegada-ecologica/>
  53. The Dynamic Analysis and Comparison of Emergy Ecological Footprint for the, acessado em julho 23, 2025, <https://www.wisdomlib.org/science/journal/sustainability-journal-mdpi/d/doc1776421.html>
  54. Assessing Environmental Sustainability Based on the Three-Dimensional Emergy Ecological Footprint (3D EEF) Model: A Case Study of Gansu Province, China - MDPI, acessado em julho 23, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/10/8007>
  55. Ecological effect life cycle assessment of house buildings based on emergy footprint model, acessado em julho 23, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10543385/>
  56. A review of emergy theory, its application and latest developments - ResearchGate, acessado em julho 23, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/283723100\\_A\\_review\\_of\\_emergy\\_theory\\_its\\_application\\_and\\_latest\\_developments](https://www.researchgate.net/publication/283723100_A_review_of_emergy_theory_its_application_and_latest_developments)
  57. Promise and problems of emergy analysis | Request PDF, acessado em julho 23, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/222427225\\_Promise\\_and\\_problems\\_of\\_emergy\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/222427225_Promise_and_problems_of_emergy_analysis)
  58. A review of emergy theory, its application and latest developments - IDEAS/RePEc, acessado em julho 23, 2025, <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v54y2016icp882-888.html>
  59. Recent progress on emergy research: A bibliometric analysis, acessado em julho 23, 2025, <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v73y2017icp1051-1060.html>
  60. ISAER - International Society for the Advancement of Emergy ..., acessado em julho 23, 2025, <https://www.emergysociety.com/emergy-research/>
  61. Tecnologias Emergentes e Tendências Futuras: Explorando o Futuro da Inovação, acessado em julho 23, 2025,



<https://www.gimawa.com.br/single-post/tecnologias-emergentes-e-tend%C3%A2ncias-futuras-explorando-o-futuro-da-inova%C3%A7%C3%A3o>

62. Futuro da Inteligência Artificial: 5 tendências para 2025 - SoftDesign, acessado em julho 23, 2025, <https://softdesign.com.br/blog/futuro-da-inteligencia-artificial/>
63. Principles of EMERGY Analysis for Public Policy - Coastal Resources Center, acessado em julho 23, 2025, [https://www.crc.uri.edu/download/Odum\\_PrinciplesPublicPolicy\\_sm2.pdf](https://www.crc.uri.edu/download/Odum_PrinciplesPublicPolicy_sm2.pdf)
64. Environmental Accounting Using Emergy Evaluation Of The State Of West Virginia, acessado em julho 23, 2025, <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=300066BU.TXT>
65. Environmental Accounting Using Emergy: Evaluation of the State of West Virginia, acessado em julho 23, 2025, <https://archive.epa.gov/emap/aed/research/web/pdf/envaccttechrept.pdf>
66. Energy return on investment - Wikipedia, acessado em julho 23, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_return\\_on\\_investment](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_return_on_investment)
67. Energy Return on Investment (EROI): Overview, Calculations - Investopedia, acessado em julho 23, 2025, <https://www.investopedia.com/terms/e/energy-return-on-investment.asp>