

# ANÁLISE EMERGÉTICA: UMA MEDIDA DE SUSTENTABILIDADE COM BASE CIENTÍFICA

Luciane Abdalla<sup>1</sup> e Luiz Antonio Mai<sup>2</sup>

Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária, São Paulo, SP CEP: 05508-000

<sup>1</sup>abdalua@ig.com.br; <sup>2</sup>lamai@ipen.br

## RESUMO

*Neste trabalho descreve-se a metodologia emergética e seus fundamentos científicos, a qual considera a energia incorporada, possibilitando mensurar as contribuições da natureza, até então consideradas gratuitas em uma mesma base de cálculo, a emergia, possibilitando a valorização dos recursos para avaliação de sustentabilidade de sistemas naturais e antrópicos.*

**Descritores:** *emergia, energia incorporada, sustentabilidade, contabilidade ambiental, eco-economia.*

## INTRODUÇÃO

No final dos anos 1960 e durante a década de 1970, o surgimento do movimento ambientalista e o choque do petróleo fizeram dos recursos naturais, da energia e do ambiente em geral um tema de importância econômica, social e política, o qual foi chamado de Questão Ambiental. Foi uma crítica ao modelo de desenvolvimento econômico vigente, apontando para uma possível incompatibilidade entre crescimento econômico e a preservação dos recursos ambientais, o que ocasionaria limites à continuidade do crescimento econômico [1].

A preocupação atual é não apenas saber os limites deste crescimento, mas também encontrar soluções de curto e longo prazo para reverter ou minimizar problemas como o aumento constante de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera ocasionando o aquecimento global [2]. Torna-se necessário para isso um novo modelo econômico, ou seja, uma economia ambientalmente sustentável, chamada economia ecológica.

Para a economia ecológica é essencial a elaboração de indicadores de sustentabilidade

## ABSTRACT

*This paper describes the EMerger Methodology and its scientific fundamentals that takes into account the embodied energy during a transformation process, turning possible to measure the nature contribution, till now considered free, in the same calculation basis, such method comes to increase the recourses utilized to evaluate the natural systems sustainability..*

**Key words:** *emergy, embodied energy, sustainability, environmental accounting, ecology economy*

e de sistemas de contas ambientais, que fundamentem o processo de tomada de decisão em face da incerteza que caracteriza o enfrentamento dos grandes problemas ambientais [3].

A primeira vista, limitações ambientais podem ser entendidas como empecilhos ao crescimento sócio-econômico. No entanto, a aplicação da estratégia do eco-desenvolvimento visa transformar tais limitações em oportunidades e obtenção de desenvolvimento sustentável [4].

Dentre as metodologias para calcular a sustentabilidade, destaca-se a *metodologia emergética* por ser capaz de medir a valorização real de um produto, incluindo a energia incorporada em uma mesma base de cálculo, utilizando a *Teoria Geral de Sistemas* descreve, com base científica, o funcionamento energético de ecossistemas e de sistemas antrópicos.

## EMERGIA

Na economia convencional, o preço de um produto corresponde aproximadamente a

somatória das despesas com insumos, mão de obra e outros serviços mais a margem de lucro [5], mas não considera a contribuição da natureza na formação dos insumos utilizados, a contribuição da natureza na absorção do impacto ambiental na produção dos insumos, os custos de tratamento de resíduos nem o custo de outras externalidades negativas ao sistema [6]. Nitidamente esta economia apresenta limitações ao focar apenas bens e serviços produzidos pelo homem, enquanto não considera os valores referentes aos bens e serviços da natureza, responsáveis pela vida na terra.

A emergia pode ser um bom parâmetro para análise do valor dos bens, serviços e recursos provenientes tanto da natureza quanto da economia, pois é capaz de medir, entre outros parâmetros, o impacto ambiental, a sustentabilidade e a capacidade de carga dos ecossistemas. Pagar pelo conteúdo emergético de um produto pode ser a chave para viabilizar o desenvolvimento sustentável [7].

A palavra Emergia, também descrita na literatura como eMergia, para diferenciar de energia, vem do inglês EMBodied enERGY.

Definida por Odum (1996), emergia é uma medida universal da riqueza real do trabalho da natureza e da sociedade feitas em uma base comum, ou seja, considera toda energia direta ou indireta que a biosfera utiliza para produzir um bem ou serviço seja natural ou antrópico [4].

Os insumos para produção de um produto podem ser fornecidos pela natureza ou pelas atividades econômicas. A contabilidade dos insumos apresenta um problema: estão em unidades diferentes. A solução é converter os insumos em uma mesma unidade [6]. A metodologia emergética se propõe a medir todas as contribuições (moeda, massa, energia, informação), em termos de energia solar equivalente (sej), ou seja, emergia. Para tal faz uso de vários conceitos multi-disciplinares, tais como: Teoria de Sistemas, Termodinâmica, Funções Ecossistêmicas, dos novos princípios do funcionamento de sistemas abertos, da hierarquia universal de energia e o da auto-organização e da maximização do fluxo de energia disponível no sistema [5].

Para fazer a conversão das várias contribuições de fluxos de energia, deve-se usar fa-

tores de conversão, as chamadas transformidades solares que expressam essas relações em termos de energia solar equivalentes (sej), por unidade de recurso (J, kg, \$).

$$\text{Energia} \Rightarrow \text{J/ano} \times \text{sej/J} = \text{sej/ano}$$

$$\text{Massa} \Rightarrow \text{kg/ano} \times \text{sej/kg} = \text{sej/ano}$$

$$\text{Moeda} \Rightarrow \text{\$/ano} \times \text{sej/\$} = \text{sej/ano}$$

Onde sej/J, sej/Kg e sej/\$ são as transformidades, previamente calculadas.

Este procedimento torna possível agrupar termos diferentes, pois estão expressos em uma mesma unidade [6].

Teoria Geral de Sistemas: Sistema é um grupo de partes que estão conectadas e trabalham juntas para realização de um objetivo comum [8]. São interligados por vários tipos de energia, considera-se como energia as energias naturais (eólica, marés, chuvas, etc.), os materiais que participam dos ecossistemas naturais e nos sistemas antrópicos, o trabalho humano, os estoques de energia da natureza (solo, depósitos de água, etc.) e os fluxos monetários e de informações [4].

Todos os sistemas podem estar sujeitos a forças externas e/ou possuem estoques internos que poderão ser aproveitados como fonte de energia. Podem produzir trabalho, matéria, bem ou serviço; armazenar energia (matéria e informação em alguns casos); exercer alguma influência no meio em que atuam e dissipar calor e materiais [4].

Para representação de sistemas, na metodologia emergética, são utilizados símbolos que representam as partes do sistema e os fluxos de energia. A partir dos símbolos, pode-se representar o sistema em um diagrama sistêmico. O diagrama da figura 1, por exemplo, mostra a representação de um sistema natural, o sol (fonte de energia), que fornece energia a planta (produtor), através do processo de fotossíntese (interação), desenvolve sua biomassa (depósito), que por sua vez serve de alimento para o herbívoro (consumidor). Vale notar que o herbívoro fornece nutrientes à planta através de um laço de retroalimentação e parte da energia é dispersa (sumidouro) [8].

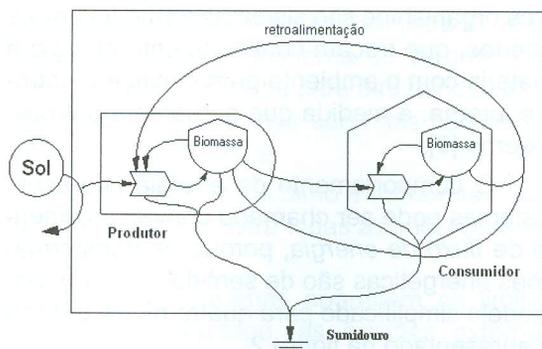


Figura 1. Representação de um Diagrama Sistêmico de um Sistema Natural.

**Termodinâmica:** A energia é definida como a capacidade de realizar trabalho. O comportamento da energia em qualquer sistema é descrito pelas leis da termodinâmica. Qualquer sistema seja natural ou artificial que não esteja de acordo com estas leis está condenado ao fracasso [9].

**Primeira Lei da Termodinâmica:** É a Lei da Conservação de Energia que declara que a energia não pode ser criada nem destruída. Por exemplo: a Luz é uma forma de energia, pois ela pode ser transformada em trabalho, calor, ou a energia potencial do alimento, dependendo da situação, mas nenhuma parte dela é destruída [9] [8]. Esquemáticamente a energia que flui para dentro de um sistema é igual à energia adicionada ao depósito mais aquela que flui para fora do sistema [8].

**Segunda Lei da Termodinâmica:** É a Lei de Dispersão de Energia que declara que a disponibilidade para que a energia realize algum trabalho se esgota devido à sua tendência à dispersão (se degrada) [8], também pode ser enunciada da seguinte forma: nenhum processo que implique uma transformação de energia ocorrerá espontaneamente, a menos que haja uma degradação da energia de uma fonte concentrada para uma fonte dispersa [9].

Uma quantidade de energia sempre se dispersa em energia térmica não disponível. Nenhuma transformação de energia em energia potencial apresenta 100% de rendimento. A entropia é a medida da energia não disponível que resulta das transformações, este termo está associado a degradação de energia [9]

A aplicação dos princípios da termodinâmica pode ser observada na figura 1. O

alimento que resulta da fotossíntese, das plantas, através da energia luminosa, produz energia potencial, que alimenta um herbívoro, a energia consumida na verdade não é gasta, já que a quantidade de um tipo de energia sempre equivale a uma determinada quantidade de outro tipo no qual é transformada (primeira lei da termodinâmica), mas menos disponível, uma vez que parte da energia é dispersa (segunda lei da termodinâmica) [8].

#### **Qualidade da Energia e Transformidade:**

Além da *quantidade*, é importante considerar também a *qualidade* da energia. Todas as calorias ou joules, não são iguais, porque as mesmas quantidades de formas diferentes de energia variam amplamente no seu potencial de trabalho. Formas altamente concentradas de energia, apresentam um potencial de trabalho maior e, portanto, uma qualidade superior em relação a formas mais diluídas, como a luz solar. Mede-se a qualidade de energia pela energia usada na transformação ou, mais especificamente, pela quantidade de um tipo de energia necessária para desenvolver outro tipo, numa cadeia de transformações energéticas [9]. A cadeia energética funciona da mesma forma que uma cadeia trófica. Consequentemente, à medida que a quantidade declina numa cadeia, a qualidade da energia (depois da dissipação térmica), aumenta proporcionalmente [9] [8].

As redes de transformações de energia incluem uma hierarquia de energia, a *Transformidade* que é uma medida da hierarquia de energia e é aplicável a tudo: energia, informação, serviços, etc. [7].

A transformidade deve ser usada para relacionar o trabalho de fontes de tipos diferentes de energia em uma base comum que é a energia. Para se comparar a energia de um mesmo tipo, deve-se medir a energia disponível.

**Princípio da máxima potência:** O princípio da Máxima potência indica porque certos modelos de organização de sistemas sobrevivem e outros não. O princípio explica porque sistemas de êxito possuem redes de organizações semelhantes. [8]

Esquemas de sistemas que sobrevivem são aqueles organizados de tal modo, que trazem energia para si o mais rápido possível e

utilizam essa energia para se retro-alimentar e trazer mais energia. Os sistemas que maximizam a potência também são sistemas que retro-alimentam a um sistema maior, do qual fazem parte [5].

Quando o abastecimento de energia é estável, máxima potência significa menos competição e um aumento na diversidade e eficiência [8].

Um sistema eficiente usa energia de alta qualidade para propósitos onde o efeito é grande. Energia de alta qualidade é usada geralmente onde pode servir como um amplificador de energia de baixa qualidade [8].

Um bom sistema, seja ele um ecossistema ou a economia, usa todos seus subprodutos para melhorar sua eficiência. Uma economia que não usa os subprodutos para propósito úteis, é menos eficiente, pois deixa de aproveitar os benefícios econômicos que poderiam derivar-se da venda dos subprodutos beneficiados [8].

**Funções Ecosistêmicas:** As várias formas de vida são acompanhadas por mudanças energéticas, apesar de nenhuma energia ser criada ou destruída. A energia que chega a superfície terrestre sob a forma de luz é equilibrada pela energia que sai da superfície sob forma de radiação térmica. A essência da vida reside na progressão de tais mudanças, como o crescimento, a autoduplicação e a síntese de relações complexas da matéria. Sem a transferência de energia, que acompanha todas estas mudanças, não poderiam existir a vida tão pouco os sistemas ecológicos. A civilização é apenas uma das proliferações naturais que dependem do fluxo constante de energia concentrada [9].

Os organismos, os ecossistemas e a biosfera inteira possuem a característica termodinâmica, de criar e manter uma condição de baixa entropia. Desta forma, os ecossistemas

e os organismos são sistemas termodinâmicos abertos, que trocam continuamente energia e matéria com o ambiente para diminuir a entropia interna, à medida que aumenta a entropia externa [9].

O comportamento da energia nos ecossistemas pode ser chamado convenientemente de *fluxo de energia*, porque as transformações energéticas são de sentido único [9]. Um modelo simplificado para quatro níveis tróficos é apresentado na figura 2.

Neste modelo as plantas (produtores) ocupam o primeiro nível trófico, os herbívoros, o segundo nível (consumidores primários), carnívoros primários, o terceiro nível trófico, (carnívoros secundários), o quarto nível trófico (consumidores terciários). O fluxo energético reduz substancialmente a cada passagem de nível. No primeiro nível o aproveitamento luminoso de 50%, e a eficiência do processo de fotossíntese de aproximadamente 1%, o que representa uma produtividade da ordem de 0,5% da energia luminosa. A produtividade secundária é de cerca de 10% [3] [1], nos níveis 3 e 4 da cadeia trófica a eficiência pode chegar a 20% [9].

## METODOLOGIA EMERGÉTICA

A Análise emergética consiste dos seguintes passos:

**Caracterização do sistema:** Para a primeira etapa de uma avaliação emergética, é fundamental a identificação dos componentes, ou seja, conhecer as entradas e saídas e estabelecer os limites do sistema.

**Elaboração do Diagrama Sistêmico:** Para analisar os fluxos de energia de um sistema elaboram-se os diagramas de fluxo de energia. Isto permite um melhor entendimento e visualização do sistema como um todo. Os diagramas de fluxo de energia mostram os elementos mais importantes do sistema. Os

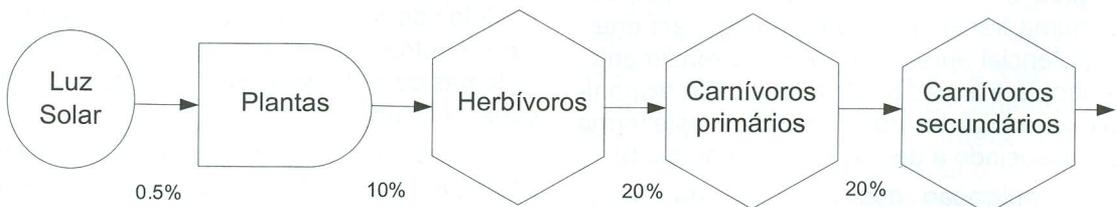


Figura 2- Fluxo energético de 4 níveis tróficos

fluxos de energia de menor intensidade, mais dispersos, ficam a esquerda do diagrama. À medida que se caminha para direita no diagrama os fluxos de energia são mais concentrados e mais complexos.

O diagrama inclui tanto a economia quanto o ambiente e mostra todas as interações relevantes

Nestes diagramas aparecem os limites do sistema estudado, as funções externas ao sistema, seus componentes internos, as trajetórias dos fluxos de energia e materiais entre componentes, incluindo as importantes retro-alimentações dos processos em curso. Esses diagramas são essenciais na metodologia emergética e sua simbologia precisa ser estudada e internalizada para compreender e apreciar seu significado e funcionamento.

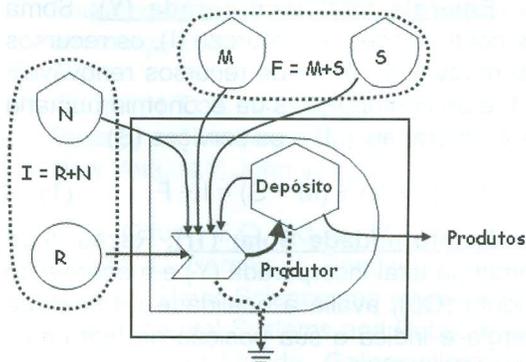


Figura 3. Modelo esquemático de um diagrama

**Montagem da Tabela de Avaliação Emergética:** Cada um dos fluxos do diagrama se converte em uma linha de cálculo da tabela, deve ser seguido o modelo ilustrado na tabela 1.

Tabela 1: Esquema de organização de uma tabela de cálculo dos fluxos de energia

Nota	Nome das contribuições	Números	Unidades J, kg ou \$/ano	Transformidade Sej/ J, kg ou \$	Fluxo de energia Sej/ano
I	Recursos da Natureza				
R	Recursos renováveis				
N	Recursos não Renováveis				
F	Recursos da Economia				
M	Materiais				
S	Serviços				
Y	Total				

O preenchimento da tabela segue o descritivo abaixo [5], com algumas adaptação:

A coluna 1 fornece a nota de pé-de-página onde se dão os detalhes do cálculo dos valores da coluna 3, ou indica a fonte de dados, a coluna 2 contém os nomes das diversas entradas do sistema., a coluna 3 tem o valor numérico de cada fluxo de entrada.

Para fazer uma avaliação do sistema em estado estacionário (equilíbrio dinâmico), são utilizados os valores anuais das contribuições da natureza e da economia humana. Essas entradas são colocadas nas suas unidades usuais para materiais (gramas ou quilogramas), para energia (Joules), para dinheiro (\$), etc.

Devem ser incluídos os fluxos necessários para manter as estruturas e armazenamentos internos de recursos.

Para calcular os valores correspondentes a depreciação dos bens, usa-se valores médios.

A coluna 4 é preenchida com as unidades utilizadas., a coluna 5 contém o valor da transformidade ou energia por unidade (kg, J, \$). Na coluna 6 são colocados os fluxos de energia. São os produtos da multiplicação dos fluxos de entrada (em unidades/área/tempo) da coluna 3, pelos valores de transformidade (energia/unidade) da coluna 5.

**Cálculo dos Índices Emergéticos e interpretação dos resultados:** Como forma de avaliar os sistemas estudados, são calculados os índices emergéticos a partir dos resultados da tabela de avaliação emergética.

Estes índices são utilizados para fazer as inferências da análise emergética [7].

**Energia total incorporada (Y):** Soma das contribuições da natureza (I), os recursos não renováveis (N) e os recursos renováveis (R), e as contribuições da economia humana (F), os materiais (M) e os serviços (S).

$$Y = (R + N) + (M + S) = I + F \quad (1)$$

**Transformidade Solar (Tr):** Razão entre a energia total incorporada (Y) e a energia do produto (Qp), avalia a qualidade do fluxo de energia e indica a sua posição na hierarquia energética.

$$Tr = \frac{Y}{Qp} \quad (2)$$

**Razão do Rendimento Emergético (EYR):** Razão entre a energia total do produto (Y) pelas entradas retroalimentadas pela economia (F). Este índice reflete a habilidade do processo de utilizar recursos locais [10].

$$EYR = \frac{Y}{F} = \frac{(R + N + F)}{F} \quad (3)$$

**Renovabilidade Emergética (%R):** Razão entre os recursos não renováveis (R) pela energia total (Y), determina a parcela total de um sistema que provem de recursos naturais não renováveis.

$$\%R = \left( \frac{R}{Y} \right) * 100 \quad (4)$$

**Taxa de investimento emergético (EIR):** Razão entre a energia fornecida pelo sistema econômico (F) e a fornecida pelo ambiente (I) é uma medida da viabilidade econômica. Esta proporção é baixa quando a fonte ambiental proporciona mais, de tal forma que os custos ambientais sejam baixos.

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad (5)$$

**Carga Ambiental (ELR):** Razão entre a soma da energia de entrada de recursos não renováveis e das entradas retroalimentadas pela economia, pelos recursos renováveis. Quanto maior o uso de recursos renováveis menos será o stress ao ecossistema, devido as atividades econômicas.

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad (6)$$

**Índice de Sustentabilidade Emergética (ESI):** Razão entre o Índice de Rendimento Emergético (EYR) pela da Carga Ambiental (ELR). Este índice representa o nível depreciativo de um produto sobre o ambiente.

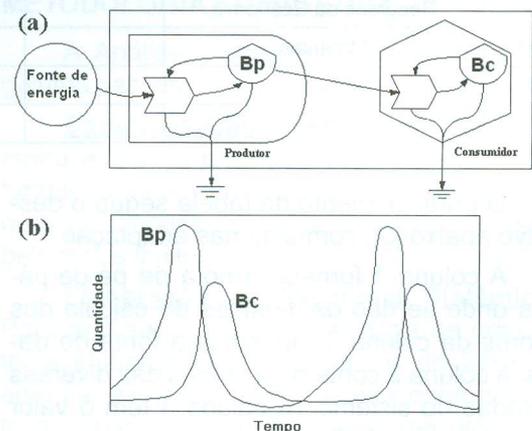
$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (7)$$

#### Modelagem e simulação do Sistema:

A biosfera está constituída de sistemas que mudam com o passar do tempo. Ambos sistemas: ambiental e humano, são descritos pela forma de suas mudanças. O modo pelo qual o sistema muda depende da organização do sistema e do tipo de fonte de energia que está disponível [8].

A partir dos diagramas de energia é possível fazer a modelagem dos sistemas e a apresentação gráfica que permite melhor entendimento e análise dos sistemas no tempo.

Figura 4. Modelo de oscilação simples. (a) Modelo; (b) resultado da simulação.



Como é mostrado no diagrama de sistemas da Figura 4 (a), existe uma fonte constante disponível para a população de produtores (Bp). Quando a população de produtores começa a crescer exponencialmente, a população de consumidores (Bc) cresce rapidamente fazendo que a população de presas se reduza novamente. Com menos comida disponível a população de consumidores diminui. A simulação gráfica das duas populações versus tempo é mostrada na Figura 4 (b) [8].

## CONCLUSÃO

A necessidade de desenvolver indicadores para avaliar a sustentabilidade surgiu na Conferencia Mundial sobre o Meio Ambiente – Rio 92. A proposta era definir padrões sustentáveis de desenvolvimento que considerassem aspectos ambientais, econômicos, sociais, éticos e culturais.

Desde então surgiram vários indicadores, com contribuições significativas para avaliar a sustentabilidade, no entanto nenhum consegue valorar os recursos naturais, os danos ambientais, a exclusão social, o tempo de reposição dos recursos ditos renováveis e muito menos o trabalho da natureza na produção de um recurso.

A metodologia emergética é um método valoroso para mensurar a sustentabilidade, utilizando para seus cálculos bases científicas, podendo ser um instrumento de tomada de decisões e previsões de cenários futuros.

## REFERÊNCIAS

- [1] Amazonas, M.C., Economia Ecológica, disponível em [www.ecoeco.org.br/economia](http://www.ecoeco.org.br/economia), acesso em agosto/2006.
- [2] Brown, L. R., Eco-economia: construindo uma economia para a terra. Salvador, UMA, 2003
- [3] Romeiro, A.R.; O papel dos indicadores de sustentabilidade e da contabilidade ambiental. In: Avaliação e contabilização de impactos ambientais. Romeiro, A.R. (organizador). Campinas, SP: Editora da UNICAMP, São Paulo, SP: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo. 2004.
- [4] Ortega, Enrique, Engenharia ecológica e agricultura sustentável. disponível em <http://www.fea.unicamp.br/fea/ortega/livro/index.htm>, acesso março/2007.
- [5] Ortega, E, Contabilidade e Diagnóstico de sistemas usando os valores dos recursos expressos em energia, disponível em <http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/resumo.pdf>, acesso em novembro/2006.
- [6] Ortega, E., Engenharia de Alimentos e meio rural, disponível em [www.fea.unicamp.br/fea/ortega/plan-disc/TA530-1a.htm](http://www.fea.unicamp.br/fea/ortega/plan-disc/TA530-1a.htm), acesso em março/2006.
- [7] Odum, H.T., Environmental Accounting: Energy and environmental decision making. New York, N.Y. John Wiley & Sons, 1996.
- [8] H. T. Odum, E.C. Odum, M.T. Brown, D. LaHart, C. Bersok, J. Sendzimir, Graeme B. Scott, David Scienceman y Nikki Meith , Environmental Systems and Public Policy, University of Florida, Gainesville 32611, USA, 1987.
- [9] Odum, E. P., Ecologia. Editora Guanabara - 1983.
- [10] ULGIATI S.; BROWN M. T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions - The case of electricity production. J Cleaner Prod, 10, p. 335-348, 2002.