

Avaliação ambiental e diagrama triangular: estudo de sistema operacional alternativo para a distribuição de chapas de aço

C. M. V. B. Almeida, S. N. Bueno; F. A. Barrella e B. F. Giannetti
LaFTA – Laboratório de Físico-Química Teórica e Aplicada,
Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Paulista,
R. Dr. Bacelar 1212, Cep 04026-002, São Paulo, Brazil

Resumo

Neste trabalho empregou-se a análise de emergia e a ferramenta do diagrama triangular para avaliar o desempenho de um sistema operacional alternativo para a distribuição de chapas de aço. O processo convencional de distribuição é comparado a um sistema que inclui a coleta de sucata. Os dados empregados nas simulações são hipotéticos. Contudo isto não invalida as conclusões obtidas. A metodologia permite determinar o valor da emergia total do sistema ($3,63E+17$ seJ) e calcular as energias específicas de cada processo. A emergia investida para recuperar 1 kg de aço ($1,21E+13$ seJ/kg) é maior que a necessária para fabricar 1 kg de aço ($4,13E+12$ seJ/kg), o que indica que o sistema de coleta simulado utiliza mais recursos na recuperação do que os recursos necessários para fabricar a mesma quantidade de aço. Para a obtenção de benefícios seria necessário aumentar a quantidade de sucata recuperada em no mínimo cinco vezes, sem investir em bens e serviços. O cálculo de indicadores de sustentabilidade para o sistema operacional proposto indica que somente será possível manter a distribuição de chapas de aço combinada à coleta de sucata por longo prazo, com benefício ambiental e eficiência econômica, se a quantidade de sucata recuperada for aumentada em dez vezes. Do exemplo empregado é possível mostrar a aplicação da metodologia emergética e o uso do diagrama triangular como ferramentas de avaliação ambiental.

Palavras Chaves: recuperação de sucata, aço, emergia, diagrama triangular, benefícios ambientais e econômicos.

1. Introdução

A mudança de atitude das empresas em relação ao meio ambiente teve início nas áreas de produção e operação onde há grandes oportunidades para reduzir o impacto de processos (SARKIS, 1995 e SHEN, 1995). Entretanto, a exploração de novas alternativas de operação que visam diminuir impactos ambientais dos processos produtivos ou para modificar os existentes exige investimento de capital e inclui novos desafios nas tomadas de decisão.

A comparação entre processos alternativos pode delinear as vantagens econômicas e ambientais dos mesmos. Na década de 90, as abordagens dividiram-se em duas vertentes. Na primeira, o ambiente foi tomado como um desafio para a indústria e o tratamento de resíduos foi considerado como um custo adicional a ser agregado ao preço do produto (SHARMA e VREDENBURG, 1998 e WALLEY e WHITEHEAD, 1994). Na segunda, considerou-se que a relação ambiente-empresa, baseada em um gerenciamento ambiental efetivo, é capaz de trazer melhorias tanto para o ambiente como para a competitividade da empresa (SHEN, 1995; PORTER, 1995 e HART, 1995).

Neste contexto, começou-se a utilizar a análise financeira tradicional como critério para tomadas de decisão de caráter ambiental. Entretanto, este tipo de análise não tem ferramentas para contabilizar benefícios e custos intangíveis. Não há como estabelecer um valor monetário para parâmetros como o valor de uma reserva natural ou o custo da absorção de poluentes pelo ambiente. É, portanto, incoerente estabelecer a análise financeira como ferramenta para avaliar ganhos ou perdas ambientais, especialmente se a empresa tiver incluído a proteção ao ambiente entre suas estratégias de competitividade.

A avaliação ambiental com base na emergia leva em conta a taxa de exploração de reservas naturais, o uso eficiente destas reservas e a capacidade de suporte do meio ambiente (ODUM, 1996). Os indicadores que resultam desta análise refletem tanto a contribuição do sistema econômico como a do meio ambiente (BROWN e ULGIATI, 2002). Estes indicadores são utilizados para avaliar as relações entre componentes do sistema produtivo e as reservas utilizadas para a obtenção do produto de interesse; dependem da fração de insumos renováveis e não renováveis e consideram os insumos disponíveis localmente e aqueles importados de fora do sistema. Obtém-se, desta forma, informações valiosas sobre o desenvolvimento e a operação dos sistemas produtivos, levando em conta a capacidade de carga do ambiente. Pode-se ainda avaliar a eficiência termodinâmica do sistema, a qualidade dos fluxos de entrada e saída do sistema de produção e especialmente a interação entre o sistema e o ambiente em que este está inserido.

Desde a sua introdução a análise emergética nos processos produtivos (ODUM, 1996) tem-se tornado cada vez mais importante no cenário mundial, sendo hoje estudada nas mais variadas instituições de pesquisa, quer sejam acadêmicas quer sejam dos setores industriais ou governos. Encontram-se aplicações em vários setores, como na produção de energia elétrica (BROWN e ULGIATI, 2002; ULGIATI e BROWN, 2002; ODUM e PETERSON, 1996; ODUM, 2000 e BJÖRKLUND et al., 2001), no tratamento de água (GEBER e BJÖRKUND, 2001 e MARTIN, 2002), na fabricação de papel e celulose (LOPES et al., 2003), na produção agrícola (LEFROY e RYDBERG, 2003 e PANZIERI et al., 2000), no desenvolvimento urbano (SHU-LI e WAN-LIN., 2003; SHU-LI, 1998 e HOWINGTON et al., 1997), nas relações com a economia tradicional (HORNBERG, 1998; CLEVELAND et al., 2000; TON et al., 1998 e BROWN e ULGIATI, 1997), entre outras.

Para diferentes setores e processos, novos índices e abordagens têm sido propostos (ULGIATI et al., 1995; POPP et al., 2001, MANOLIADIS, 2002; RONCHI et al., 2002; BARRERA e SALDÍVAR, 2002; SPANGENBERG, 2002 e SEAGER e THEIS, 2002) expandindo o alcance da análise emergética, mas ao mesmo tempo gerando uma maior complexidade analítica. Neste contexto, o uso de uma ferramenta gráfica pode, não só auxiliar a interpretação dos dados, mas também facilitar comparações e complementar os modelos hoje empregados para a tomada de decisão (GIANNETTI et al., 2004 a e b). Introduzindo a possibilidade de simular ações, como o aumento de investimento ou a troca de matéria prima, e prever os possíveis impactos ambientais gerados por estas ações.

Neste trabalho, considera-se que um gerenciamento ambiental efetivo é capaz de trazer melhorias tanto para o ambiente como para a competitividade da empresa. Com a utilização da análise de emergia, um novo sistema operacional aplicado a uma distribuidora de ferro e aço é avaliado. Os resultados obtidos são avaliados com o auxílio de uma ferramenta gráfica desenvolvida para este fim.

1.1. O sistema em estudo

A empresa hipotética é uma distribuidora que compra aço diretamente de uma grande siderúrgica e distribui chapas de aço para metalúrgicas e empresas no ramo de ferro e aço em geral. Admite-se que a siderúrgica e a distribuidora estabeleceram um acordo segundo o qual a distribuidora retorna à siderúrgica duas toneladas de sucata para cada tonelada retirada de material. Por outro lado, a distribuidora estabelece uma parceria com seus clientes a fim de garantir um estoque de sucata. Para cada tonelada fornecida de material pela distribuidora, os clientes devem

retornar quatro toneladas em sucata (Fig. 1). Supõe-se que alguns clientes preferem manter-se no antigo sistema e, desta forma, a distribuidora conta com dois tipos de clientes: com e sem troca de sucata. Para atender os clientes que optaram pela troca de sucata, a distribuidora implanta a infraestrutura necessária, incluindo a produção de caçambas, a contratação de mão de obra especializada temporária e compra de caminhões para o transporte das caçambas.

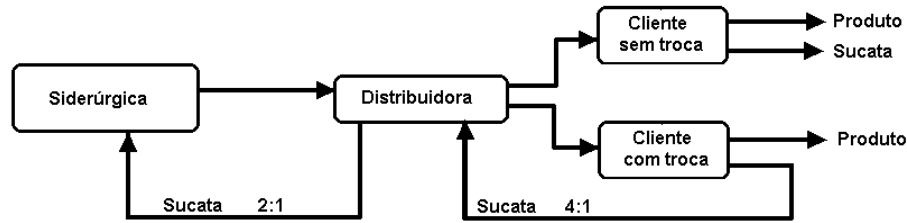


Fig. 1. Fluxograma da distribuição de chapas de aço.

1.2. Ferramenta gráfica para análise dos resultados

A ferramenta gráfica empregada baseia-se no diagrama triangular, que é definido como um sistema de coordenadas a partir de um triângulo equilátero cuja altura é igual à unidade. Cada uma das alturas é associada a uma das variáveis, conforme apresentado na figura 2a. Assim, um ponto qualquer inscrito no triângulo, pode ser definido a partir de um conjunto de três valores de coordenadas. Uma importante propriedade dos diagramas é que a soma das coordenadas triangulares das variáveis é igual à altura do triângulo (Fig. 2b). Uma segunda propriedade se refere à combinação de sistemas. Quando combinamos dois sistemas, cujas composições são representadas pelos pontos P e Q (Fig. 2c) a composição da mistura resultante será representada por um ponto X sobre o segmento PQ. Finalmente, outra propriedade importante é que todos os sistemas representados pelos pontos de uma linha que passa por um dos vértices do triângulo possuem dois de seus componentes na mesma razão (Fig. 2d). Uma descrição detalhada da ferramenta pode ser encontrada em (GIANNETTI et al, 2004 a e b)

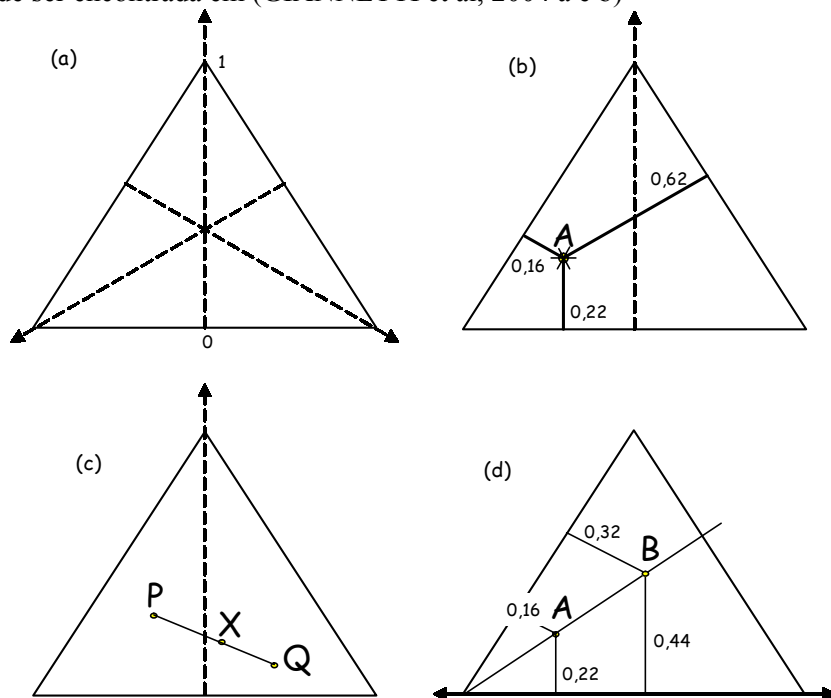


Figura 2 - Diagrama Triangular, representação de : (a) sistema de coordenadas triangulares. (b) propriedade soma das coordenadas. (c) propriedade da combinação de sistemas. (d) propriedade da proporcionalidade.

2. Metodologia

A análise do novo sistema operacional para a comercialização de chapas de aço foi conduzida com base no cálculo da energia dos dois sistemas, comparando-se o uso dos recursos utilizados direta ou indiretamente na obtenção do serviço de distribuição, com e sem troca de sucata.

2.1. Energia e Indicadores

Energia pode ser definida como a *memória da energia* ou a energia total incorporada em um produto, processo ou serviço. É a quantidade de energia necessária, de forma direta ou indireta, para obter um produto (bem ou serviço) em um determinado processo, sendo sua unidade expressa em seJ (joule de energia solar). O uso de uma única unidade para a qual são convertidos os diversos tipos de energia permite somar todas as contribuições de energia utilizadas para a obtenção de um determinado produto ou serviço. Define-se a transformidade como a quantidade de energia solar empregada, diretamente e/ou indiretamente, na obtenção de um joule de um determinado produto (bem ou serviço), sendo sua unidade expressa em seJ/J (joule de energia solar por Joule). A transformidade fornece uma medida da concentração de energia e pode ser considerada como um indicador de qualidade. Os valores de energia e transformidade dependem do material e da energia utilizados nas diversas etapas necessárias para a obtenção do produto ou serviço e, por este motivo, variam de acordo com a matéria prima selecionada, com o tipo de energia empregado na produção e com a eficiência do sistema produtivo.

As fontes de recursos que compõem qualquer processo podem ser divididas em três classes: renováveis, não renováveis e provenientes da economia. Na figura 3 observa-se que fluxos de entrada em um sistema de produção são divididos em reservas não-renováveis (N), serviços e produtos do ambiente renováveis (R) e fluxos provenientes da economia (F). Os recursos renováveis (R) são retirados do ambiente e, como, o próprio nome diz, tem a capacidade de renovação temporal e espacial mais rápida que o seu consumo. Encontram-se dentro dessa classe a energia solar, dos ventos, da chuva, etc. Os recursos não renováveis (N) são armazenados na natureza, porém seu consumo é mais rápido do que a sua capacidade de renovação. Dentro dessa classe se encontram fontes de recursos como carvão, petróleo, florestas, água potável, etc. Os recursos pagos – vindos da economia (F) são associados a bens e serviços ou a recursos provenientes de outras regiões fora dos limites do sistema estudado. A figura 2 mostra um diagrama simplificado em que são identificados os fluxos de entrada R, N e F e o fluxo de saída do produto Y.

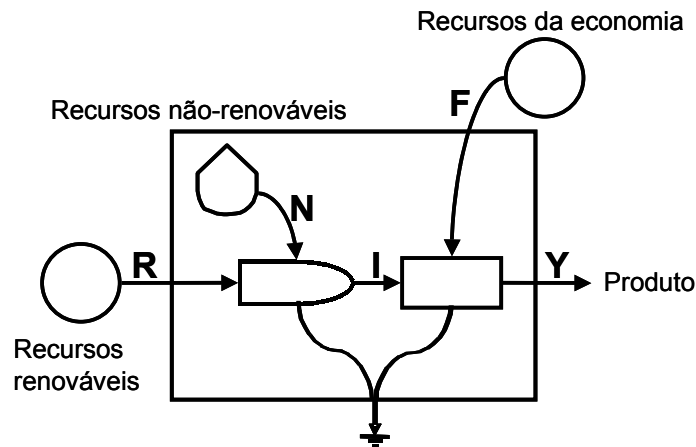


Figura 3 - Diagrama de fluxos de energia, onde aparecem os fluxos de entrada de recursos renováveis (R), não renováveis (N) e provenientes da economia (F) e o fluxo de saída do produto (Y).

Os fluxos de recursos identificados na figura 3 permitem calcular diferentes índices que, por sua vez, podem ser de grande utilidade para analisar ou monitorar um sistema (Tab. 1).

Tab. 1. Indicadores calculados a partir da análise de energia

Indicador	Cálculo	Significado
EYR	$EYR = \frac{Y}{F} = \frac{R + N + F}{F}$	O rendimento energético reflete a habilidade do processo de utilizar recursos locais
EIR	$EIR = \frac{F}{N + R}$	O investimento energético é a relação entre a energia fornecida pelo sistema econômico e a fornecida diretamente pelo meio ambiente ao sistema estudado
ELR	$ELR = \frac{N + F}{R}$	O índice de carga ambiental mostra o balanço entre os investimentos locais renováveis e não renováveis. Um valor alto de ELR pode indicar um estresse de utilização dos recursos renováveis locais
SI	$SI = \frac{EYR}{ELR} = \frac{\frac{Y}{F}}{\frac{N+F}{R}}$	O índice de sustentabilidade associa a maximização de EYR (rendimento) e a minimização de ELR (impacto), ou seja, o máximo do aproveitamento do investimento com um mínimo de estresse dos recursos locais.
%R	$\%R = \frac{R \times 100}{R + N + F} = \frac{R \times 100}{Y}$	O percentual de energia renovável é a parcela de energia total processada de um determinado sistema que provém de fontes de recursos renováveis

2.2. Características do sistema

Setores industriais que se posicionam entre as indústrias de extração primária, como a mineração e a produção de energia, têm bem definidas as fontes de recursos que utilizam diretamente. Entretanto, à medida que o setor se posiciona na cadeia produtiva nas proximidades do consumidor ou do descarte de materiais, a determinação das fontes de recursos fornecidas pela natureza torna-se mais complexa e é contabilizada, de forma indireta, por meio da transformidade.

No setor de serviços, por exemplo, a maior parte dos recursos utilizados é de natureza não renovável ou proveniente da economia, como os combustíveis e a mão de obra utilizada, o que inviabiliza o cálculo de alguns indicadores tradicionais da análise de energia, como o ELR. Avançando na cadeia, há ainda setores voltados à reciclagem de materiais e ao tratamento de efluentes. O descarte e a reciclagem de materiais necessitam de investimentos, tanto econômicos como de recursos fornecidos pelo ambiente. Quando se faz a análise de energia destes setores, deve-se considerar que a energia investida deve ser associada a uma contribuição aos serviços da natureza, já que na ausência destes processos, todo o resíduo produzido seria descartado no ambiente, causando considerável impacto ambiental.

No caso analisado, são consideradas as etapas de implantação e operação, ou seja, os recursos diretos e indiretos empregados em cada fase. Admite-se o período de um ano de operação. Para a fase de implantação do sistema de troca, com depreciação da infra-estrutura e dos equipamentos de acordo com a tabela do imposto de renda. Desta forma, estabeleceu-se a depreciação do concreto em 25 anos, dos equipamentos e instalações em 10 anos e dos veículos de transporte em 7 anos. Os valores das transformidades dos recursos utilizados foram retirados da literatura, como mostra o anexo a este texto (Tab. 2).

Neste caso, como a contribuição direta de recursos renováveis é muito pequena, foram calculados os índices EYR e EIR, relacionados ao desempenho econômico do sistema. Para a valoração da contribuição do novo sistema operacional ao meio ambiente, determinou-se a quantidade de energia economizada devido à utilização de sucata em relação à produção da mesma quantidade pela usina. Foram admitidos valores médios mensais dos fluxos de entrada e saída de dentro da empresa (ver Tab. 3).

Tab. 2. Transformidades e emergias por massa utilizada no estudo.

Item	Transformidade ou emergia/massa	Unidade	Referências
Chapas de ferro	4,13E+09	g	BROWN e BURANAKARN, 2003
Eletrodo/Arame de soldagem	1,78E+15	t	Odum, 1996
Máquinas e caminhões	6,70E+09	g	ULGIATI et al,1994
Propano	4,8E+04	J	Odum, 1996
Oxigênio	5,16E+07	g	BROWN e ULGIATI, 2002
Tinner	3,80E+08	g	BROWN e ULGIATI, 2002
Tinta sintética	1,50E+09	g	BROWN e ULGIATI, 2002
Mão de obra	7,38E+06	J	ULGIATI et al,1994
Energia elétrica	1,85E+05	J	BROWN e ULGIATI, 2002
Água	6,85E+11	m ³	BUENFII, 2001
Combustível	6,60E+04	J	ULGIATI e BROWN, 2002

Na fase de operação do projeto, os recursos diretos e indiretos foram alocados de acordo com a média do fluxo de entrada e saída de materiais para cada cliente, com e sem troca de sucata. Parte dos recursos foram divididos em 33 % aos clientes com troca e 67 % aos clientes sem troca (ver Tab. 3).

Tab. 3. Valor médio mensal supostos para entrada e saída de material na distribuidora.

Entrada/kg		Saída/kg	
Fornecida pela	60.000	Para cliente com troca (sistema novo)	10.000
Siderúrgica (chapas de aço)			
Sucata que retorna dos clientes	30.000	Para cliente sem troca (sistema convencional)	20.000

3. Resultados e discussão

O primeiro passo na análise proposta é a construção de diagramas como forma de organizar as relações entre componentes e visualizar os fluxos de material e energia que circulam no sistema.

A figura 4 mostra os diagramas de energia da distribuidora de chapas de aço considerando o sistema antigo, sem troca de sucata (a) e o sistema implementado, que conta tanto com clientes que adotaram o sistema de troca de sucata como com clientes que continuam apenas comprando as chapas da distribuidora, sem retornar a sucata. Os limites do sistema foram definidos. Dados da produção das chapas na siderúrgica ou de sua utilização após a compra pelos clientes não foram considerados objetos deste estudo.

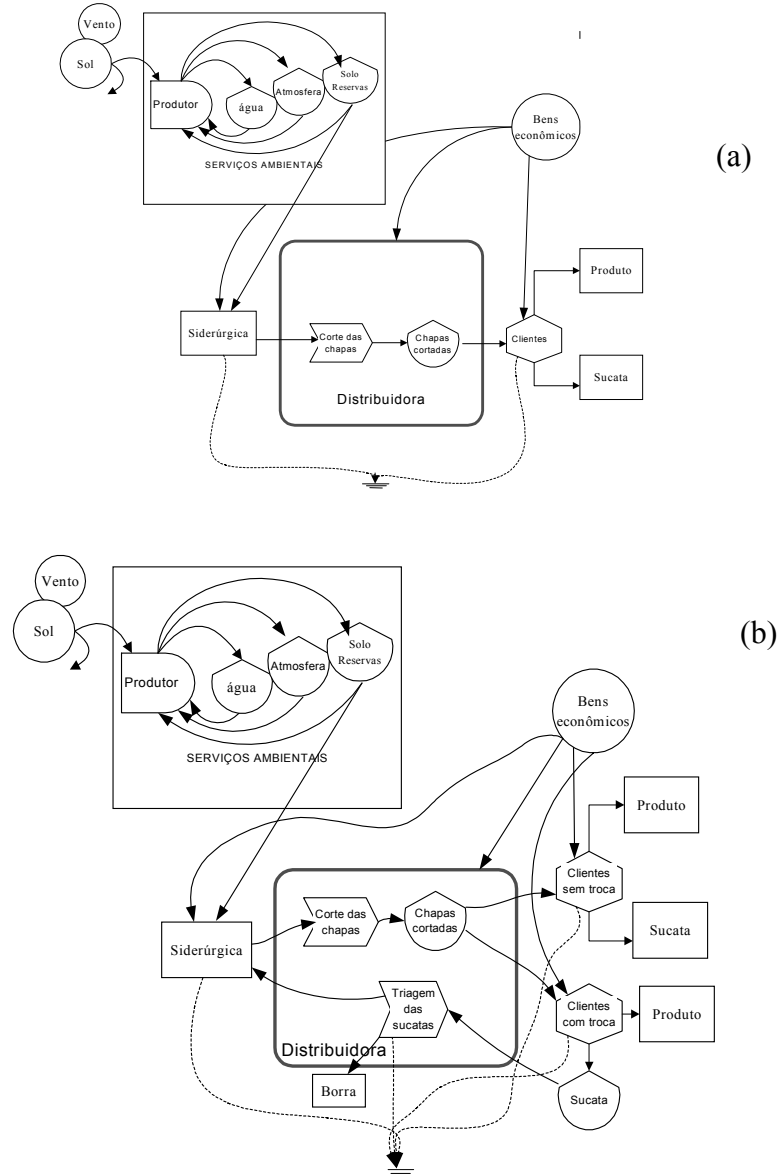


Figura 4 –Diagramas dos fluxos de energia da distribuição de chapas de aço: (a) sistema convencional e (b) sistema com troca de material.

Os diagramas permitem uma visualização geral dos sistemas, mostram as possíveis interações entre componentes e fornecem informações sobre as diferentes fontes de recursos, necessárias para o funcionamento do sistema, que incluem tanto os recursos provenientes do meio ambiente, como aqueles vindos da economia.

Uma vez construídos os diagramas e conhecidos os valores dos fluxos de material e energia que circulam nos sistemas em estudo, é possível construir as tabelas para análise dos recursos empregados direta ou indiretamente para a obtenção do bem ou serviço sob análise. Considera-se tanto os recursos empregados para a implantação do sistema, como os utilizados em sua operação. As tabelas 4 e 5 mostram os recursos utilizados para implantação e operação do sistema de distribuição de chapas de aço, respectivamente. Detalhes dos cálculos efetuados para elaboração da tabela serão fornecidos pelos autores, se requisitados.

Cada linha da tabela representa um fluxo de entrada no sistema de interesse. Na tabela 4, pode-se observar que o maior investimento de recursos para a implantação do sistema se deve à compra de caminhões para transporte das caçambas que recolhem a sucata (~70 %). A utilização de chapas de aço para a construção das caçambas contribuiu com aproximadamente 13 % do total de energia utilizado na implantação. A tabela 5 mostra os recursos utilizados na manutenção e operação do sistema de distribuição de chapas de aço, para os dois casos, com e sem troca de sucata.

A tabela 5 mostra o balanço energético efetuado para a manutenção e operação do sistema. Na fase de operação a energia elétrica e o combustível são os recursos utilizados em maior proporção, já na fase de manutenção a mão de obra e o maquinário são os que têm maior contribuição para o valor da energia. Em relação ao total de energia empregada para o sistema completo, as maiores contribuições são provenientes da compra dos caminhões na fase de implantação e do uso de combustíveis na fase de operação.

Tab. 4. Avaliação da energia na distribuição de chapas de aço na fase de implantação.

Item	Descrição	Unidade	Valor	Transf. seJ/unid	Energia seJ	% Impl/Oper	% Total
FASE DE IMPLANTAÇÃO (SISTEMA SEM TROCA)							
<i>Caminhões</i>							
	1 Caminhão(carreta)	kg	2,50E+03	6,70E+12	1,68E+16	19,81	4,33
Total da fase de Implantação (sem troca)					1,68E+16		
FASE DE IMPLANTAÇÃO (SISTEMA COM TROCA)							
<i>Construção de caçambas (77 unidades)</i>							
	2 Chapas de ferro	kg	7,25E+03	4,130E+12	2,99E+16	12,96	7,74
	3 Eletrodo	kg	9,66E+01	1,780E+12	1,72E+14	0,07	0,04
	4 Arame para soldagem	kg	5,44E+01	1,780E+12	9,68E+13	0,04	0,03
	5 Maquinário	kg	6,01E+00	6,700E+12	4,03E+13	0,02	0,01
	6 Propano	J	1,27E+08	4,800E+04	6,10E+12	<0,01	<0,01
	7 Oxigênio	kg	3,38E+04	5,160E+07	1,74E+12	<0,01	<0,01
	8 Tinner	kg	3,08E+00	3,800E+11	1,17E+12	<0,01	<0,01
	9 Tinta sintética	kg	6,16E+00	1,500E+12	9,24E+12	<0,01	<0,01
	10 Energia Elétrica	J	2,30E+08	1,850E+05	4,26E+13	0,02	0,01
	11 Água	m ³	3,00E+02	6,850E+11	2,06E+14	0,09	0,05
<i>Mão de Obra</i>							
	12 Fixa	J	1,71E+08	7,380E+06	1,26E+15	0,55	0,33
	13 Temporária	J	7,34E+07	7,380E+06	5,42E+14	0,23	0,14
<i>Transporte</i>							
	14 Combustível	J	1,06E+09	6,600E+04	7,00E+13	0,03	0,02
<i>Caminhões</i>							
	15 Caminhão com caçamba fixa	kg	4,05E+03	6,700E+12	2,71E+16	11,74	7,02
	16 Caminhão (carreta)	kg	1,50E+03	6,700E+12	1,01E+16	4,35	2,60
	17 Caminhão com caçamba móvel	kg	2,41E+04	6,700E+12	1,61E+17	69,89	41,76
Total da fase de Implantação (com troca)					2,95E+17		

Tab. 5. Avaliação da energia na distribuição de chapas de aço na fase de manutenção e operação.

Item	Descrição	Unidade	Valor	Transf. seJ/unid	Energia seJ	% Impl/Oper	% Total
FASE DE MANUTENÇÃO							
1	Chapas de aço	kg	7,25E+01	4,130E+12	2,99E+14	4,59	0,08
2	Eletrodo	kg	2,42E+01	1,780E+12	4,31E+13	0,66	0,01
3	Arame para soldagem	kg	1,36E+01	1,780E+12	2,42E+13	0,37	0,01
4	Maquinário	kg	2,29E+02	6,700E+12	1,53E+15	23,54	0,40
5	Propano	J	3,17E+07	4,800E+04	1,52E+12	0,02	<0,01
6	Oxigênio	kg	8,45E+03	5,160E+07	4,36E+11	0,01	<0,01
7	Tinner	kg	2,57E+01	3,800E+11	9,77E+12	0,15	<0,01
8	Tinta sintética	kg	5,13E+01	1,500E+12	7,70E+13	1,18	0,02
9	Mão de Obra	J	6,10E+08	7,380E+06	4,50E+15	69,07	1,19
10	Energia Elétrica	m3	5,76E+07	1,850E+05	1,07E+13	0,15	<0,01
11	Água	J	2,51E+01	6,850E+11	1,72E+13	0,26	<0,01
Total da fase de Manutenção					6,52E+15		
FASE DE OPERAÇÃO							
<i>Cliente com troca</i>							
12	Energia elétrica		3,94E+09	1,850E+05	7,29E+14	1,27	0,19
13	Mão de obra		2,77E+09	7,380E+06	2,04E+16	35,65	5,39
14	Combustível		5,48E+11	6,600E+04	3,62E+16	63,08	9,53
15	Oxigênio		6,04E+03	5,160E+07	3,12E+11	<0,01	<0,01
16	Propano		1,59E+06	4,800E+04	7,63E+10	<0,01	<0,01
					5,73E+16		
<i>Cliente sem troca</i>							
17	Energia elétrica		6,43E+03	1,850E+05	1,19E+09	<0,01	<0,01
18	Mão de obra		4,51E+09	7,380E+06	3,33E+16	49,09	9,18
19	Combustível		5,23E+11	6,600E+04	3,45E+16	50,91	9,52
20	Oxigênio		9,86E+06	5,160E+04	5,09E+11	<0,01	<0,01
21	Propano		2,62E+06	4,800E+04	1,26E+11	<0,01	<0,01
					6,78E+16		
Energia Total (Implantação+Manutenção+Operação)					3,63E+17		

A partir do valor da energia total do sistema ($3,63E+17$ seJ) pode-se calcular as energias específicas de cada processo com base nos fluxos de material mostrados na tabela 2 (Tab. 6).

Comparando-se a energia investida para recuperar 1 kg de aço ($1,13E+13$ seJ/kg) com a energia necessária para fabricar 1kg de aço ($4,13E+12$ seJ/kg) percebe-se que o sistema de coleta ainda utiliza mais recursos na recuperação do que os recursos necessários para fabricar a mesma quantidade de aço. Para que benefícios fossem obtidos seria necessário aumentar a quantidade de sucata recuperada em no mínimo cinco vezes, sem investir em bens e serviço, o que é possível, já que o sistema implantado foi planejado de forma a coletar, pelo menos dez vezes mais do que coleta atualmente.

Tab. 6. Energias específicas calculadas para o sistema de distribuição de chapas de aço.

Nota	Item	Aço/ kg	Energia específica/ seJ/kg
1	Distribuição com o sistema convencional	20.000	4,23E+12
2	Distribuição com o novo sistema	30.000	1,13E+13
3	Coleta do sistema com troca	30.000	9,23E+12
4	Recuperação da sucata	30.000	1,21E+13
1.	(implantação + operação)/aço distribuído para clientes sem troca = $(1,68E+16 + 6,78E+16)/20.000$		
2.	energia total/aço total distribuído		
3.	energia do sistema com troca/aço recuperado = $(\text{implantação} + \text{manutenção} + \text{operação})/\text{aço recuperado}$ = $(2,13E+17 + 6,62E+15 + 5,73E+16)/30.000 \text{ kg}$		
4.	energia total/aço recuperado = $3,63E+17 \text{ seJ}/30.000 \text{ kg}$		

O cálculo dos índices EYR e EIR pode trazer algumas informações adicionais sobre o sistema. Como, neste caso não há entradas diretas de recursos renováveis, $EYR = (N+F)/F$ e $EIR = F/N$. O valor de $EYR = 1,14$ é baixo e indica que o sistema é falho ao explorar os recursos não pagos, locais e vindos da economia. Sistemas que exploram os recursos com eficiência apresentam EYR maior que 5 (ULGIATI e BROWN, 1998). De fato, operando muito abaixo de sua capacidade para a coleta de sucata, o sistema de distribuição ainda não mostra bom desempenho econômico. O valor de $EIR = 7,73$, por outro lado é alto, já que sistemas com bom desempenho têm EIR menor que 0,25. O valor encontrado indica que o investimento econômico é alto em relação aos recursos locais explorados. Por outro lado o cálculo destes índices não reflete o possível benefício que resulta da recuperação da sucata.

Uma análise mais acurada pode ser realizada com a observação dos dados obtidos no diagrama triangular, mostrado na figura 5. No vértice superior do diagrama se representa a energia do aço recuperado e nos vértices da base do triângulo, se representa à direita a energia investida em bens e serviços e à esquerda, a energia investida em combustível na fase de operação. Desta forma, será possível analisar o sistema de distribuição de chapas de aço com base nestas três variáveis que, como visto nas tabelas 4 e 5, são percentualmente representativas.

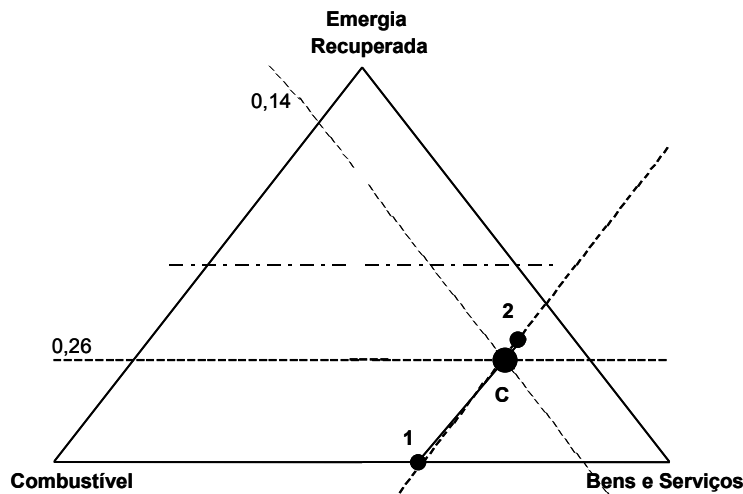


Figura 5 – Diagrama triangular para comercialização de ferro e aço: (1) cliente sem troca, (2) cliente com troca, (C) sistema resultante e (— · - - - ·) linha de simetria.

A localização dos pontos na figura 5 representa o resultado da composição entre o investimento de combustível e de bens e serviços em relação à quantidade de sucata recuperada. A linha de simetria, que corta o diagrama na horizontal, corresponde à metade da altura do triângulo (50%), ou seja, se os recursos investidos (em combustível e bens e serviços) para recuperar a sucata forem menores

que a energia recuperada, o sistema resultante deverá ser representado por um ponto acima desta linha. Pode-se observar que tanto o sistema com troca de sucata (2) como o sistema resultante (C) dos dois tipos de operação, com e sem troca, estão localizados abaixo da linha de simetria, o que demonstra que o sistema não opera de forma a trazer benefícios. O investimento em bens e serviços é alto (60 %) e a quantidade de material recuperado pequena (26 %) o que se reflete no baixo consumo de combustível (14 %) na fase de operação.

A ferramenta gráfica permite simular condições para a avaliação de possíveis mudanças. Como a implementação do sistema foi concebida de forma a poder operar com uma quantidade de sucata dez vezes maior sem a necessidade de ampliar a infraestrutura, foram consideradas situações em que a coleta aumenta. O consumo de combustível na operação foi considerado diretamente proporcional à quantidade de sucata coletada. Finalmente, como as trocas são feitas na proporção de 4:1 com os clientes e de 2:1 com a siderúrgica, considerou-se que a quantidade de aço comercializado com os clientes sem troca dobra, a cada vez que a quantidade de sucata recolhida quadruplica. Os resultados da simulação podem ser observados na figura 6.

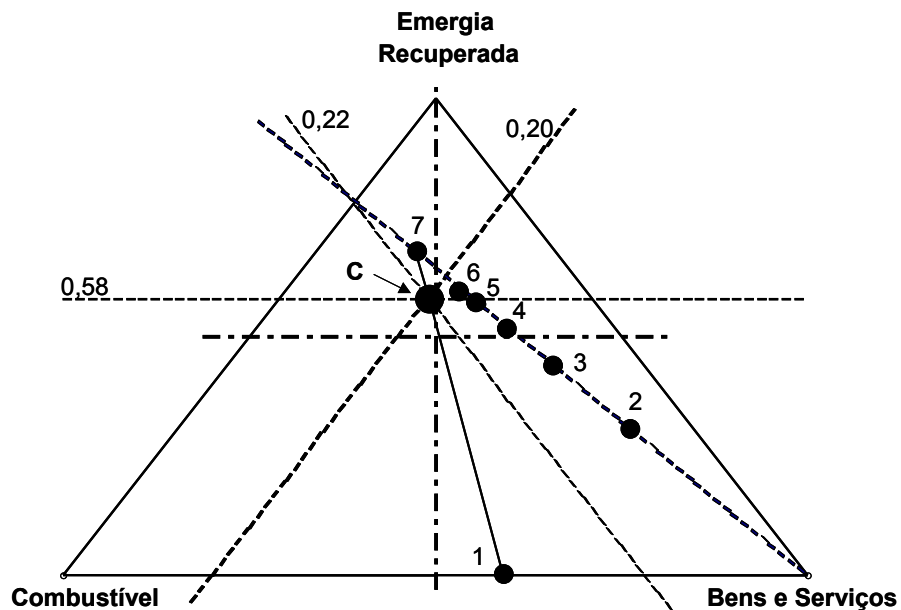


Figura 6 – Diagrama triangular para comercialização de ferro e aço: (1) cliente sem troca, (2) cliente com troca, (3) considerando o dobro de recuperação, (4) considerando o triplo de recuperação, (5) considerando o quádruplo de recuperação, (6) considerando o quádruplo de recuperação, (7) considerando a recuperação dez vezes maior e (C) sistema resultante da combinação entre (1) e (7); (— · — · — · — · —) linha de simetria.

A observação do diagrama mostra que para obter benefício com relação à coleta de sucata deve-se, no mínimo, quintuplicar a quantidade recuperada sem aumentar o investimento em bens e serviços (Fig. 6), lembrando que o sistema combinado sempre estará localizado abaixo do ponto que representa o sistema com troca. A linha, que passa pelos pontos 2 a 7 e pelo vértice à direita da base do triângulo, mostra que a simulação foi efetuada, mantendo-se bens e serviços constantes. O ponto (C) mostra o sistema resultante da combinação entre o sistema (7) e o (1), já que não há sentido em recolher a sucata sem aumentar a comercialização do aço para os dois tipos de cliente. As linhas paralelas aos lados do diagrama, que passam pelo ponto (C) mostram que nesta condição a quantidade de bens e serviços representaria 20 % deste sistema, o combustível gasto na operação 22 % e a quantidade de sucata recuperada seria de 58 %, o que está associado a um benefício de 8 % em relação à energia investida no sistema de recuperação.

Lembrando que no sistema em estudo a maior parte dos recursos utilizados é de natureza não renovável ou proveniente da economia, o que inviabiliza o cálculo de alguns indicadores tradicionais da análise de energia, como o ELR, deve-se considerar o benefício alcançado pela recuperação do material, que caso fosse simplesmente descartado, traria dano ao ambiente. Indicadores, análogos aos utilizados na análise energética convencional, podem ser desenvolvidos para definir o sistema. Desta forma, pode-se definir uma eficiência de operação análoga ao EYR como:

$$\eta_{op} = (C+R_{ec}+BS)/BS \quad (1)$$

onde C é o combustível gasto na operação, BS os bens e serviços utilizados tanto na implantação do sistema como na operação e manutenção e R_{ec} a energia do material recuperado.

Da mesma forma, pode-se definir a eficiência da recuperação, η_{rec} , como análoga ao recíproco de ELR. Quanto maior o valor deste indicador, menor será a carga ambiental do sistema operacional em estudo, ou maior será o benefício do sistema de recuperação de sucata.

$$\eta_{rec} = (C+BS)/R_{ec} \quad (2)$$

Finalmente, pode-se definir um índice de sustentabilidade do sistema operacional multiplicando-se η_{op} por η_{rec} .

$$SI_{op} = \eta_{op} \cdot \eta_{rec} \quad (3)$$

O índice de sustentabilidade convencional é definido pela razão entre EYR e ELR (Tab. 1), o que indica que um sistema sustentável deve aliar bom desempenho econômico com baixa carga ambiental.

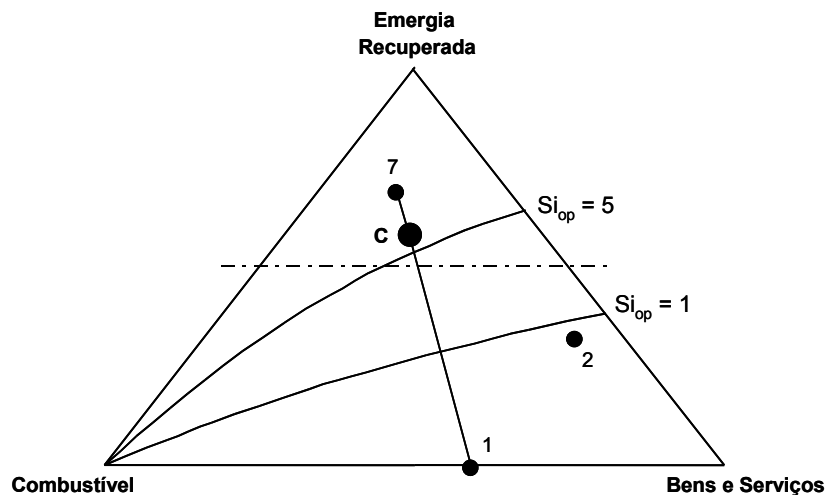


Figura 7 – Diagrama triangular para comercialização de ferro e aço: (1) cliente sem troca, (2) cliente com troca, (7) considerando a recuperação dez vezes maior e (C) sistema resultante da combinação entre (1) e (7); (---) linha de simetria e (—) linhas de sustentabilidade.

Segundo BROWN e ULGIATI, 2002, valores de SI menores que 1 são indicativos de produtos ou processos que não são sustentáveis a longo prazo. Sistemas com valores maiores que 1 indicam produtos e processos que dão contribuições sustentáveis para a economia. Sustentabilidade em médio prazo pode ser caracterizada por um SI entre 1 e 5 enquanto produtos e processos com sustentabilidade a longo prazo têm SI maiores. Considerando o sistema operacional alternativo proposto e a quantidade de sucata recuperada como uma fonte de recurso renovável, pode-se avaliar o desempenho do sistema de distribuição de chapas de aço com critérios semelhantes.

A figura 7 mostra que para a operação representada pelo ponto 2, em que o sistema opera abaixo de sua capacidade de coleta, não será possível manter estas quantidades de sucata recuperada a longo prazo, pois não há contribuição do sistema nem para o ambiente nem para a economia. Por outro lado, quando o sistema estiver operando próximo à sua capacidade máxima (C), será possível manter a distribuição de chapas de aço combinada à coleta de sucata por longo prazo com benefício ambiental e eficiência econômica.

A tabela 7 mostra os índices para as duas possibilidades estudadas, o sistema em sua fase inicial e operando com capacidade aumentada em dez vezes.

Tab. 7. Indicadores calculados para o sistema de distribuição de chapas de aço com base em dados coletados (fase inicial) e em simulação (capacidade máxima).

	Fase inicial		Capacidade máxima
η_{op}	1,66	η_{op}	5,00
η_{rec}	0,35	η_{rec}	1,40
SI_{op}	0,58	SI_{op}	7,00

4. Comentários finais

A metodologia e a ferramenta gráfica apresentadas vêm auxiliar e complementar os modelos hoje empregados para a tomada de decisões. Pode-se verificar que as possibilidades de análise e simulação com base na análise emergética utilizando o suporte do diagrama triangular são infundáveis. Por meio da análise de sustentabilidade pode-se simular ações, como o aumento de investimento ou a troca de matéria prima, e prever os possíveis impactos ambientais gerados por estas ações. Evita-se, assim, que a tomada de decisões no âmbito da produção gere efeitos não desejados, tanto para o ambiente como para a própria empresa.

Empregou-se a análise de emergia e a ferramenta do diagrama triangular para avaliar o desempenho de um sistema operacional alternativo para a distribuição de chapas de aço. O processo convencional de distribuição é comparado a um sistema que inclui a coleta de sucata. A partir do valor da emergia total do sistema ($3,63E+17$ seJ) pode-se calcular as energias específicas de cada processo. A emergia investida para recuperar 1 kg de aço ($1,21E+13$ seJ/kg) é maior que a necessária para fabricar 1 kg de aço ($4,13E+12$ seJ/kg), o que indica que o sistema de coleta ainda utiliza mais recursos na recuperação do que os recursos necessários para fabricar a mesma quantidade de aço. Para a obtenção de benefícios será necessário aumentar a quantidade de sucata recuperada em no mínimo cinco vezes, sem investir em bens e serviços. O cálculo de indicadores de sustentabilidade para o sistema operacional proposto indica que somente será possível manter a distribuição de chapas de aço combinada à coleta de sucata por longo prazo com benefício ambiental e eficiência econômica se a quantidade de sucata recuperada for aumentada em dez vezes. Os resultados mostram que administradores do setor privado, e empresários poderão aplicar a metodologia e a ferramenta para gerenciar e monitorar recursos disponíveis de forma compatível com a vocação ecológica e com a capacidade real para sua sustentabilidade.

5. Referências

- BARRERA-ROLDÁN A.; SALDÍVAR-VALDÉS A., Proposal and application of a Sustainable Development Index, *Ecological Indicators*, 2 (2002) 251-256.
- BJÖRKLUND J.; GEBER U.; RYDBERG T., Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge, *Resources, Conservation and Recycling*, 31 (2001) 293-316.
- BROWN M. T.; ULGIATI S., Emergy Evaluations and Environmental Loading of Electricity Production Systems, *J Cleaner Prod*, 10 (2002) 321-334.
- BROWN M. T.; BURANAKARN V., Emergy Evaluations of Material Cycles and Recycles Options, *Proceedings from the First Biennial Emergy Analysis Research Conference*, (1999) 141-154.
- BROWN M.T.; S. ULGIATI, Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation, *Ecological Engineering*, 9 (1997) 51-69.
- BUENFIL, A.A., Emergy evaluation of water, PhD Thesis, University of Florida (2001) 224.
- CLEVELAND C.J.; KAUFMANN R.K.; STERN D.I., Aggregation and the role of energy in the economy, *Ecological Economics*, 32 (2000) 301-317.
- GEBER U.; BJÖRKLUND J., The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems – a case study, *Ecological Engineering*, 18 (2001) 39-59.
- GIANNETTI B.F., BARELLA F.A. E ALMEIDA C.M.V.B, Ferramenta para Tomada de Decisão Considerando a Interação dos Sistemas de Produção e o Meio Ambiente, submetido à revista *Produção*, 2004a.
- GIANNETTI B.F., BARELLA F.A. E ALMEIDA C.M.V.B, A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting, submetido à *Produção*, 2004b.
- HORNBORG A., Cometary: Towards an ecological theory of unequal exchange: articulating world system theory and ecological economics, *Ecological Economics*, 25 (1998) 127-136.
- HART, S. (1995). “A natural resource based view of the firm”, *Academy of Management Review*, Vol 20, no. 4, 986-1014.
- LEFROY E.; RYDBERG T., Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia, *Ecological Modelling*, 161 (2003) 195-211.
- LOPES E. et al., Application of Life Cycle Assessment to the Portuguese Pulp and Paper Industry, *J. Cleaner Prod*. 11 (2003) 51-59.
- MANOLIADIS, ODYSSEUS. G., Development of ecological indicators-a methodological framework using compromise programming, *Ecological Indicators*, 2 (2002) 169-176.
- MARTIN J.F., Emergy valuation of diversions of river water to marshes in the Mississippi River Delta, *Ecological Engineering*, 18 (2002) 265-286.
- ODUM H.T., “Environmental Accounting – EMERGY and Environmental Decision Making”, Ed. John Wiley & Sons Ltd., (1996), 370
- ODUM H.T., Emergy evaluation of an OTEC electrical power system, *Energy*, 25 (2000) 389-393.
- ODUM H.T.; PETERSON N., Simulation and evaluation with energy systems blocks, *Ecological Modelling*, 93 (1996) 155-173.
- PANZIERI M.; MARCHETTINI N.; HALLAM T.G., Importance of the Bradyrhizobium japonicum symbiosis for the sustainability of a soybean cultivation, *Ecological Modelling*, 135 (2000) 301-310.
- POPP J.; HOAG D.; HYATT D. E., Sustainability indices with multiple objectives, *Ecological Indicators*, 1 (2001) 37-47.
- PORTER M.; LINDE VAN DER C., Green and Competitive, *Harvard Business Review*, Set-Out (1995)120-134.

- PORTER M.; LINDE VAN DER C., Toward a new conception of the environment competitiveness relationship, *J. Econ. Perspect.*, 9 (1995) 97-118.
- RONCHI E.; FEDERICO A. e MUSMECI F., A system oriented integrated indicator for sustainable development in Italy, *Ecological Indicators*, 2 (2002) 197-210.
- SARKIS, J. (1995) "Manufacturing strategy and environmental consciousness", *Technovation*, vol. 15, no 2, 79-97.
- SHARMA, S. e VREDENBURG, H. (1998), "Proactive corporate environmental strategy and the development of competitively valuable organizational capabilities", *Strategic Management Journal*, vol 19, no 8, 729-753.
- SEAGER T. P.; THEIS T. L., A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology, *Journal of Cleaner Production*, 10 (2002) 225-235.
- SHEN, T. T. (1995) *Industrial Pollution Prevention*, Springer-Verlag, Berlin.
- SHU-LI HUANG, Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis, *Journal of Environmental Management*, 52 (1998) 39-51.
- SHU-LI HUANG; WAN-LIN HSU, Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction, *Landscape and Urban Planning*, 63 (2003) 61-74.
- SPANGENBERG J. H., Environmental space and the prism of sustainability: frameworks for indicators measuring sustainable development, *Ecological Indicators*, 2 (2002) 295-309.
- TON S.; ODUM H.T.; DELFINO J.J., Ecological-economic evaluation of wetland management alternatives, *Ecological Engineering*, 11 (1998) 291-302.
- 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 (2002) 335-348.
- ULGIATI S.; BROWN M.T., Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems, *Ecological Modelling*, 108 (1998) 23-36.
- ULGIATI S.; BROWN M.T.; S. BASTIANONI; N. MARCHETTINI, Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources, *Ecological Engineering*, 5 (1995) 519-531.
- ULGIATI S.; ODUM H.T.; BASTIANONI S., Emergy use, environmental loading and sustainability: Na emergy analysis of Italy, 73 (1994) 215-268.
- WALLEY, N. e WHITEHEAD, B. (1994), "It's not easy being green", *Harvard Business Review*, vol 72, n. 3, 46-52.