

A SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS COMPLEXOS

Conceitos básicos para uma ciência do desenvolvimento
sustentável

Aspectos Teóricos e Práticos

Norbert Fenzl

José Alberto da Costa Machado

Capítulo IV

**O Metabolismo Energético-Material e a
Contabilidade de Fluxos Materiais**

Conteúdo

O METABOLISMO DOS SISTEMAS COMPLEXOS.....	2
A relação material da sociedade com a natureza.....	2
<i>Sociedades de coletores e caçadores</i>	5
<i>Sociedades agro-pastoris</i>	6
<i>Sociedades industriais</i>	7
<i>A sociedade global</i>	9
Metabolismo e Termodinâmica.....	9
APLICAÇÕES PRÁTICAS.....	12
Produção e Consumo.....	12
A Análise de Fluxos Materiais (AFM).....	13
<i>Introdução</i>	13
<i>Aspectos Metodológicos</i>	16
Metabolismo Industrial (MI).....	2
<i>Introdução</i>	2
<i>Metodologia</i>	2
Análise de ciclo de vida (ACV).....	4
<i>Introdução</i>	4
<i>O que é Análise do Ciclo de Vida?</i>	5
<i>A Metodologia</i>	6
<i>Análise do Ciclo de Vida e Reciclagem</i>	8
REFERÊNCIAS.....	10

O METABOLISMO DOS SISTEMAS COMPLEXOS

A relação material da sociedade com a natureza

Como todos os seres vivos somos obrigados a sobreviver neste planeta e obrigados a enfrentar as adversidades da natureza, mas o sucesso de enfrentá-las depende de quanto sabemos a respeito dos problemas que nos ameaçam e da criatividade com que aplicamos o nosso conhecimento (MORAN et al., 1980).

No decorrer de sua evolução os humanos desenvolveram uma quantidade impressionante de técnicas, tecnologias e conhecimentos e transformaram a natureza nos moldes das necessidades do seu próprio modo de produção. Assim, chegamos a um nível de intervenção e transformação do planeta que nos coloca frente a problemas que põem em risco a própria sobrevivência da nossa espécie.

Muita criatividade e conhecimentos novos serão necessários para evitar que as previsões apocalípticas do Fundo da ONU para a População (UNFPA), não se tornem realidade.¹

O informe prevê para o ano 2015: "Um mundo super-povoado, com megalópoles gigantescas, atingidas por novas e velhas doenças mortais que se difundem como pestes, circundadas por periferias miseráveis afetadas pela fome e poluição" (UNFPA, 2007). Segundo o informe, no ano de 2015 os centros urbanos agruparão 4,1 bilhões de pessoas, 30 cidades terão se transformado em megalópoles, de mais de 10 milhões de habitantes dos quais sete (Tóquio, Bombaim, Lagos, São Paulo entre outras) terão mais de 20 milhões de habitantes. A maior parte da população nas cidades não contará com os meios essenciais para sobreviver, como água potável, um teto e assistência médica e será assolada por doenças que virão do campo: ebola, dengue e a reaparecida tuberculose.

Esta visão apocalíptica, certamente tem fundamentos, mas ela se baseia no pressuposto que a humanidade continuará reproduzindo seus erros do passado de maneira linear. Um deles é de achar que o desenvolvimento de uma sociedade e o bem estar dos seus cidadãos somente é possível através de um aumento cada vez maior do consumo de recursos naturais e da produção material. Assim, as previsões da UNFPA nos indicam a enorme importância de estudar e analisar a intensidade do consumo material das nossas economias para poder entender o grau de insustentabilidade *modo de produção*.

Cronon (1994) afirma que "todos os grupos humanos modificam conscientemente seu ambiente de algum modo. Isto, em combinação com a linguagem, é o principal fator que distingue o homem dos outros animais". Esta afirmação é válida tanto para as sociedades de caçadores e coletores do paleolítico, como para as sociedades modernas. O que mudou de lá para cá foram os mecanismos destas modificações, sua extensão e suas conseqüências ecológicas.

Do ponto de vista da antropologia cultural materialista, as sociedades são formas de organização que servem a um propósito máximo: assegurar a sobrevivência da espécie humana. As formas de organização podem variar consideravelmente durante o tempo e o

¹ <http://www.unfpa.org/public/cache/offonce/publications/pid/406>

espaço. Porém, em todos os casos, devem prover as bases para a nutrição e para a reprodução biológica dos humanos, sob condições ambientais específicas. Nem sempre conseguem cumprir com esta finalidade: muitas sociedades falharam ou até desapareceram porque não atingiram estes objetivos.

Em escalas variadas, as sociedades humanas têm produzido *problemas ambientais* para elas mesmas desde o início de sua existência e o debate sobre esta problemática é caracterizado por discordâncias e pontos de vista (*paradigmas*) diferentes.

A percepção que há algo de errado na relação entre a sociedade humana e a natureza, e que nossa sociedade se comporta de uma maneira destrutiva em relação à base natural sobre a qual está assentada, necessita de um novo paradigma para tratar com sucesso desta relação sociedade - natureza (FISCHER-KOWALSKI; HABERL; PAYER, 1992).

A natureza sempre foi descrita em termos antropocêntricos, que destaca os humanos com atributos privilegiados em relação a todas as outras espécies do planeta Terra. Esta visão antropocêntrica leva a distorções e dificuldades em chegar a algum consenso sobre o que estaria realmente errado na relação entre a sociedade e a natureza. Seja como for, para prover suficiente nutrição, abrigo e bem estar material, as sociedades evoluíram através da organização de um fluxo contínuo de energia e materiais, extraídos do ambiente – o *input* - que é transformado de várias maneiras úteis à vida humana - o *throughput* - e, após consumo e uso é vertido outra vez nos ambientes naturais (*output*).

Durante este processo, chamado **Metabolismo Energético Material (MEM)**, a sociedade *cria* e *transforma* permanentemente seu próprio *meio ambiente*, e é ao mesmo tempo influenciado e transformado pelo mesmo.

Na sociologia a tendência atual é ver a sociedade como um sistema de comunicação desconsiderando as suas propriedades materiais e físicos. E Para a economia neoclássica, a economia é um sistema de estoques e fluxos de dinheiro, considerando somente o lado monetário da realidade. Conceitos físicos, na melhor das hipóteses, são admitidos como ferramentas da monetarização.

Assim, tanto a sociologia como a economia desconsidera *a base material* da sociedade. De acordo com as leis da física, as quantidades de entradas de energia e materiais (*input*) nos sistemas são iguais às quantidades de saídas (*output*). Somente a *qualidade* muda: segundo as leis da termodinâmica, input e output energético-material são *quantitativamente* iguais, mas *qualitativamente* diferentes. A energia e matéria de entrada são desvalorizadas (usadas) durante a passagem no sistema e retornam ao ambiente como rejeitos.

A inclusão de processos físicos na contabilidade econômica de uma sociedade permitiria visualizar mais concretamente como os sistemas de estocagem e fluxos de materiais são regulados por processos biológicos, culturais, tecnológicos e econômicos. Os diferentes sistemas sociais são sustentados em ambientes materiais específicos e quando estes mudam o sistema também precisa se modificar. Ao contrário dos ecossistemas, estas mudanças não ocorrem por evolução biológica, mas por um processo que pode ser chamado de *evolução cultural* (HARRIS apud FISCHER-KOWALSKI; HABERL,

1993). A evolução cultural não depende de mudanças das informações genéticas, mas da informação possível de ser obtida culturalmente e, a partir daí, ser incorporada à consciência humana e as organizações sociais.

Essencialmente, *metabolismo* é um conceito biológico concernente aos processos internos de um organismo vivo. Os organismos vivos mantêm um fluxo contínuo de intercâmbio material e energético com seu ambiente para prover o seu próprio funcionamento, crescimento e reprodução. De um modo análogo, os sistemas econômicos convertem matérias-primas em produtos manufaturados, serviços e finalmente em descartes. Processos estes, que os economistas descrevem como produção e consumo. Lembramos aqui que de acordo com Prigogine e Stengers (1984) a natureza conhece basicamente dois tipos de sistemas:

- Os *sistemas fechados* trocam somente *energia* com seu ambiente, têm ciclos rápidos e exercem o controle sobre a maior parte das condições ambientais essenciais para a sua existência. Por exemplo, as florestas tropicais são capazes de reciclar continuamente seus próprios nutrientes, de criar e reproduzir o ambiente do qual necessitam, sua micro-atmosfera, sua circulação de água e seus ciclos de minerais;
- Os *sistemas abertos* trocam *energia e matéria* com seus ambientes e dependem de um suprimento externo de nutrientes. As várzeas, por exemplo, só podem existir enquanto persistir o suprimento de nutrientes provenientes de inundações periódicas. Logo, os sistemas abertos dependem do seu ambiente para permanecer relativamente constantes, embora contribuam para mudá-lo.

Visto através desta analogia, um sistema sócio-econômico apresenta problemas ambientais nas duas pontas do seu metabolismo:

- Com respeito às suas entradas (*inputs*), as sociedades incorporam minerais, combustíveis fósseis, biomassa, ar, água e outros. Quando as entradas se tornam escassas, as sociedades sempre tentavam administrar a situação através da migração para terras mais férteis, redução da procriação, mudança de hábitos nutricionais, incremento das trocas comerciais ou expulsão de outros povos através de guerras;
- No lado das saídas (*outputs*), problemas ambientais surgem, quando os materiais descartados pelas sociedades não podem ser absorvidos e integrados ao meio ambiente natural de maneira inócua. No início da revolução industrial estes problemas eram ainda locais e podiam ser resolvidos por medidas relativamente simples. Com o desenvolvimento das sociedades industriais, estes problemas evoluíram para desafios globais.

O metabolismo de toda uma sociedade é, no mínimo, igual à soma dos metabolismos dos seus membros. Assim, as sociedades podem ser classificadas basicamente em três tipos de acordo com a intensidade do uso dos recursos naturais (SIEFERLE apud FISCHER-KOWALSKI; HABERL, 1994):

a) sociedades de caçadores e coletores;

- b) sociedades agro-pastoris;
- c) sociedades industriais.

Sociedades de coletores e caçadores

A maior parte de sua existência, a humanidade tem vivido em sociedades de caçadores e coletores. Organizadas em grupos geralmente inferiores a 100 indivíduos, as sociedades pré-históricas e paleolíticas apresentavam uma densidade populacional muito baixa e mesmo em ambientes favoráveis não chegaram ter um habitante por km². O metabolismo desta sociedade praticamente não ultrapassava a somatória do metabolismo individual de cada um dos seus membros. Como pode ser deduzido de achados arqueológicos, os indivíduos desta sociedade eram bem nutridos e provavelmente necessitavam somente de poucas horas de *trabalho* diário para terem assegurado a sua subsistência, deixando uma boa parte de tempo disponível para o lazer. O estilo de vida dos componentes desta sociedade era essencialmente migratório e a nutrição era provida pela coleta de frutas e outras partes comestíveis de plantas, por caça e pesca. As ferramentas eram elaboradas de pedra, madeira e ossos. O fogo era utilizado para cozimento, aquecimento, proteção contra predadores e ainda para dirigir animais selvagens para dentro de armadilhas.

A manutenção deste tipo de vida era possível graças a um crescimento populacional quase igual a zero. As taxas de crescimento da população mundial no período de 40.000 a 10.000 anos A.C. foram estimadas em 0.001% por ano (FISCHER-KOWALSKI; HABERL, 1994). Existem muitos indicadores de que esta estabilidade na densidade populacional não foi devido a *causas naturais*, mas sim, de que ela foi regulada culturalmente por estas sociedades, principalmente por infanticídio de meninas. As taxas de infanticídio são estimadas em 50% baseadas em dados atuais dos aborígenes australianos.

O modo de produção do tipo caçador - coletor chegou a seus limites quando falharam os mecanismos para manter o número da população suficientemente reduzido. No período de 40.000 a 10.000 anos A.C. a humanidade cresceu para aproximadamente 5 milhões de pessoas, espalhando-se desde a sua região de origem na África por sobre todo o planeta (FISCHER-KOWALSKI; HABERL, 1994).

O maior problema de sustentabilidade para estas sociedades de caçadores e coletores era a obtenção de quantidades suficientes de alimentos. Como isto era regulado pela natureza, cada ecossistema tinha uma capacidade definida para sustentar humanos. Quando o número de pessoas ultrapassava determinado nível crítico, restavam duas opções: a migração para novas terras com suficiente alimento ou então a fome e a morte. A evolução cultural pode induzir a evolução biológica enquanto modifica as condições de seleção dentro do ambiente: O aumento em número e o aperfeiçoamento das técnicas de caça das antigas sociedades de caçadores e coletores provavelmente contribuíram para a extinção da mega-fauna do Pleistoceno. **A figura 6** mostra o metabolismo da sociedade caçadora e coletora, cujos indivíduos consumiam aproximadamente 1 tonelada de biomassa por pessoa por ano.

Sociedades agro-pastoris

A invenção da agricultura, a chamada de *revolução neolítica*, aparentemente aconteceu, porque ficou impossível alimentar o crescente número de pessoas. Esta mudança no modo de produção coincidiu com uma mudança climática importante: o final do último período glacial. O aumento global da temperatura transformou matas em campos e favoreceu a domesticação de animais em vez da sua caça.

Sociedades do Oriente Médio foram provavelmente as primeiras a desenvolver um novo modo de produção baseado na domesticação de animais e na agricultura. Isto implicava em um novo modo de intervenção no ambiente: a *colonização*, que é definida como: atividades sociais que deliberadamente induzem ao desequilíbrio em sistemas naturais e os mantêm neste estado (FISCHER-KOWALSKI; HABERL, 1993).

O metabolismo das novas sociedades agro-pastoris ainda está baseado na biomassa para a nutrição. Comparado com as sociedades de caçadores e coletores, porém, a necessidade *per capita* chegou a 4 toneladas de biomassa por pessoa por ano devido a necessidade de prover não somente a quantidade de alimento para os humanos, mas também para os animais domésticos; madeira para fogo, não apenas para cozinhar e aquecer, mas também para produzir ferramentas de metal. De modo sempre crescente, a biomassa necessária para a nutrição é extraída do ambiente colonizado. Grandes massas de pedras são movimentadas e processadas para a construção de prédios, fortalezas e estradas; milhões de metros cúbicos de solo são arados e expostos à erosão e as intervenções humanas no manejo regional da água aumentam consideravelmente (Fig.6).

O enorme aumento da apropriação de biomassa pelas sociedades humanas com a transição de um modo de produção para outro pode ser visto pelo seguinte exemplo: os caçadores de uma tribo de índios norte-americanos produziam em média duas calorias por cada caloria gasta na caça, enquanto os agricultores do povo Maia colhiam 33 calorias por cada caloria investida nas atividades agro-pastoris. Esta mudança do modo de produção acompanhada por uma mudança cultural. O modo sedentário de vida e o valor do trabalho infantil estimularam o crescimento da população. Todavia, quase todas as sociedades agro-pastoris ainda aplicavam algum tipo de controle de natalidade. A população durante os antigos impérios (Mesopotâmia, Egito, Incas etc.) crescia a taxas de aproximadamente 0,5% anualmente (um crescimento elevado se comparado com os 0,001% das sociedades de caçadores e coletores). Deste modo, a população humana apresentava a tendência de crescer mais do que a sua base nutricional (FISCHER-KOWALSKI; HABERL, 1993).

Uma maneira de responder a este desafio foi regular culturalmente o consumo. Sabemos que toda a forma de alimentação vegetariana requer cerca de 10 vezes menos biomassa do que a alimentação com produtos e carne animal, porque antes do consumo os animais devem ser alimentados com biomassa. Assim surgiu, entre outros, a vaca sagrada na Índia e a proibição de consumir carne suína no Oriente Médio.

Outra resposta á falta de alimentos foram a migração, a conquista de novos territórios, guerras e a importação de escravos. Por exemplo, através da escravidão foram externalizados os custos biológicos de criar crianças, para o território conquistado. E,

finalmente, muitas vezes a própria natureza assumia o encargo de regular a si mesmo através de fomes, catástrofes e epidemias.

Embora tenham durado por alguns milênios e gradualmente tenham colonizado a maior parte da Terra, as sociedades agro-pastoris não conseguiram desenvolver um sistema de vida que fosse sustentável em longo prazo. Elas exauriram muitos dos recursos naturais dos quais dependiam, como florestas e solos aráveis. Muitas vezes, mesmo o trabalho duro resultou em condições de vida miseráveis, e em desnutrição para boa parte dos seus membros. Novas tecnologias, como o uso de arados de ferro ou de cavalos trouxe somente poucas melhorias, logo anuladas pelo crescimento populacional. Por muitos séculos o padrão de vida na China, Norte da Índia, Mesopotâmia ou Egito permaneceu próximo à miséria.

Fomes periódicas eram constantes nas sociedades agrárias, e um motivo forte para expansões na colonização. A expansão mais longa e mais sangrenta, mas também de maior sucesso foi a do Velho Mundo sobre o Novo Mundo no início do século 16. O sucesso desta expansão não se devia somente à superioridade tecnológica dos europeus no armamento, nas artes da navegação e da guerra, mas também devido à tecnologia de domesticação e criação de animais e de uso dos microorganismos. A criação diversificada de animais domésticos (cabras, ovelhas, porcos, cavalos, galinhas) em combinação com a capacidade de transformar leite de animais domesticados em subprodutos mais duráveis (uma tecnologia específica dos conquistadores), permitia a realização de longas jornadas e a criação de novos assentamentos sem maiores preocupações com a alimentação.

Sociedades industriais

O surgimento de um novo modo de produção no século XIX possibilitou a evolução de um novo tipo de sociedade: a sociedade industrial. O grande salto de qualidade em relação às sociedades anteriores era a massiva utilização de recursos energéticos fósseis e a utilização em grande escala da máquina a vapor. Estes recursos não renováveis não afetavam diretamente a base alimentar humana e de outras espécies, entretanto, o novo modo de produção apresentava (e continua apresentando até os dias de hoje) sérios problemas, por exemplo: (i) a profunda dependência da economia de quantidades finitas de recursos não renováveis e (ii) a massiva liberação de subprodutos prejudiciais para ciclos naturais (p.ex. o ciclo do carbono e do enxofre), causando distúrbios graves nos processos de auto-regulação dos sistemas naturais, dos quais as sociedades dependiam até então (FISCHER-KOWALSKI; HABERL, 1994).

Uma das conseqüências mais marcantes das sociedades industriais foi um brutal aumento do metabolismo e conseqüente pressão sobre o ambiente. Comparado à sociedade agro-pastoril, um cidadão da sociedade industrial consome hoje em média cerca de 15 a 20 vezes a quantidade de biomassa, 20 vezes a quantidade de água, 10 vezes a quantidade de ar a mais, do que o seu metabolismo individual necessitaria. Algo como 110 Kg (ou 80 m³) de ar por dia e por habitante, são consumidos através de processos de

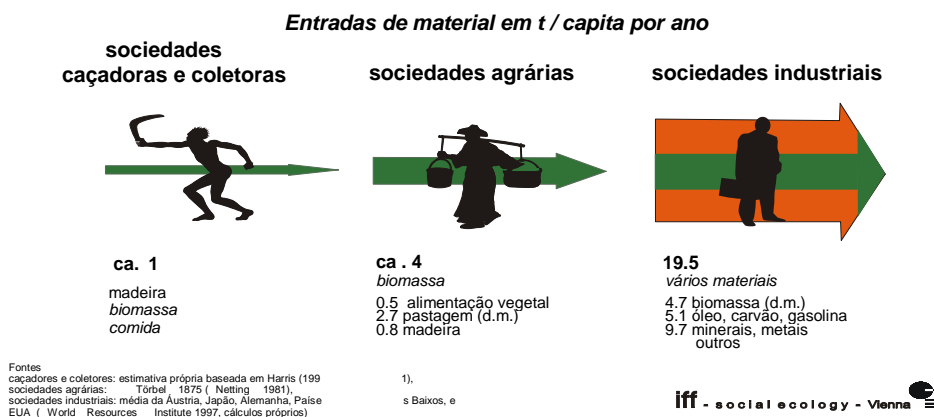
combustão, enquanto o ser humano necessita de 10 m³ (ou 13,7 kg) por dia para sua respiração (PAYER; TURETSCHKEK, 1991) (Fig.6).

O novo modo de produção também modificou as formas de colonização. De um lado houve um grande aumento na produtividade de biomassa por hectare devido à produção industrial de fertilizantes e o uso de produtos químicos para combater as pragas e insetos. Por outro lado, segundo dados da UNDP, a especulação do mercado capitalista dos alimentos levou à uma crise alimentar global que atinge severamente mais de 25% da população mundial.

Como sabemos, a cultura de cada sociedade é caracterizada por três necessidades fundamentais: reprodução, produção e recursos disponíveis. Todos os três elementos incorrem no problema da sustentabilidade do sistema social e a evolução cultural pode ser vista como uma luta constante das sociedades tentando resolver estes problemas. Se, por exemplo, as pessoas se reproduzem muito depressa, os recursos tradicionais podem não ser suficientes para produzir os alimentos necessários. Como consequência, novos recursos devem ser encontrados, ou novas técnicas de produção devem ser desenvolvidas.

Assim, os modos de produção das sociedades podem ser descritos através dos seus diferentes tipos de intervenções nos ecossistemas. No caso, o modo de produção típico dos coletores e caçadores não era muito diferente daquela de primatas mais evoluídos, com a exceção do uso do fogo e de ferramentas simples. Porém, durante a *revolução neolítica*, ou seja, durante a passagem para a sociedade agro-pastoril, isto se modificou radicalmente. Ecossistemas inteiros foram profundamente alterados, culminando com o modo de produção industrial que, utilizando fontes de energia e materiais subterrâneas, melhorou consideravelmente o lado do *input*, onerando por outro lado o *output* com seu aumento exagerado do metabolismo e seus consequentes descartes.

Fig.6 Perfis metabólicos característicos das diferentes formações sociais



A sociedade global

Finalmente é importante analisar alguns aspectos importantes da chamada *sociedade global*. A globalização econômica se acelerou significativamente no final do século XX (sobretudo a partir da quebra do chamado bloco socialista) e início do século XXI, estabelecendo novas relações sociais e econômicas entre praticamente todos os povos e nações do planeta. O setor mais amplamente globalizado é sem dúvida o sistema financeiro, seguido pelas empresas transnacionais, que juntos produzem atualmente aproximadamente 80% do PIB mundial.

Entretanto, a globalização não atinge toda a população e os setores econômicos do mundo da mesma maneira. Por exemplo, mais da metade da população mundial vive em condições semelhantes às antigas sociedades agro-pastoris. Se o perfil metabólico das sociedades industriais é atualmente em torno de 20 t/cap./ano podemos admitir que o perfil metabólico da população mundial no seu conjunto deve estar entre 12 e 15 t/cap./ano. Isto por si só já é um valor muito superior à capacidade de recuperação do planeta e corresponde em termos gerais aos resultados obtidos pelo *footprint network*, que calcula as chamadas pegadas ecológicas da humanidade.²

O grande desafio para a humanidade é justamente o fato que os governos e os economistas de plantão insistem na idéia do desenvolvimento em bases do crescimento do PIB, pretendendo “desenvolver” o conjunto do mundo dentro dos padrões do modo de produção atual que justamente é a *causa principal* da insustentabilidade que estamos enfrentando.

Isto é o *nó górdio* da humanidade do século XXI e certamente não será possível desmanchá-lo sem sacudir severamente os próprios fundamentos do capitalismo. A atual crise e colapso do setor financeiro são os primeiros sinais. Os métodos até agora desenvolvidos para operacionalizar um desenvolvimento sustentável ainda não são suficiente para enfrentar este desafio, entretanto eles indicam caminhos importantes que deverão ser tomados, junto com novas idéias e abordagens.

Metabolismo e Termodinâmica

Tal como os ecossistemas, as sociedades também são caracterizadas pela quantidade de energia incorporada e transformada pelo sistema. Esta *densidade* energética das sociedades é determinada pelo metabolismo energético-material do conjunto dos seus organismos membros (HABERL, 1994).

Uma das características mais importantes de uma sociedade no que diz respeito a seu relacionamento com o ambiente natural é o tamanho (caráter quantitativo) e o tipo (caráter qualitativo) do seu metabolismo energético.

O conceito tradicional de *consumo de energia* abrange somente as diversas formas de transformação de energia em máquinas e instalações para a produção de luz, calor, trabalho mecânico e energia para processos industriais e químicos. Na verdade energia não pode ser *consumida*, somente *transformada* e em última instância a classificação das

² <http://www.footprintnetwork.org/>

sociedades humanas em tipos coletores e caçadores, agro-pastoril, sociedade industrial é uma classificação baseada nas diferentes formas de utilização de energia. Esta questão foi amplamente tratada por Odum que iniciaram as investigações sobre fluxos de energia na ecologia, uma disciplina historicamente integrada às ciências naturais (ODUM; ODUM, 1976).

O principal fluxo de energia percorre as seguintes etapas:

- As plantas verdes convertem a radiação solar em energia química durante o processo de fotossíntese, produzindo biomassa;
- A energia acumulada em biomassa, a produção primária líquida (*net primary production*, NPP), é disponível para todos os outros organismos (heterotróficos). Em consequência, a energia fixada via fotossínteses suporta a grande diversidade de espécies que habitam os ecossistemas da Terra (WRIGHT, 1990).

A NPP é a energia acumulada via fotossíntese por plantas verdes durante certo período de tempo (em geral um ano). Estudos empíricos mostram que o fluxo de energia pode ser relacionado ao número de espécies de um determinado ecossistema. Isto significa que, se a quantidade de energia remanescente num ecossistema é reduzida, o número de espécies que vivem no mesmo irá diminuir (WRIGHT, 1990).

Atualmente se estima que a apropriação humana do NPP gire em torno de 40% do NPP total global terrestre (HABERL, 1994). Apesar de não haver clareza sobre os limites desta apropriação, sabemos que a quantidade atual já não poderá ser aumentada sem que se acelere a extinção massiva de muitas outras espécies.

Por exemplo, um estudo realizado na Áustria, mostrou que a NPP no território nacional está ao redor de 1.370 PJ/a e a apropriação sócio-econômica dos produtos da fotossíntese (no mesmo território, contando com 7,8 milhões de habitantes) está em torno de 620 PJ/a, ou seja, 45% da produção total. Isto significa que o sistema sócio-econômico consome quase a metade de toda a energia fixada por fotossíntese, sobrando o resto para todas as outras espécies além dos seres humanos (HABERL, 1994).

Nosso planeta é um sistema materialmente fechado, e a única entrada de energia é a energia solar, o que significa que todos os ecossistemas, incluindo a humanidade, são obrigados em sobreviver desta única fonte de energia. Do ponto de vista termodinâmico estamos ocupando o planeta com um modo de produção que foi desenvolvido em tempos em que a humanidade atuava como se vivesse num planeta com recursos ilimitados.

A idéia do metabolismo energético-material se baseia em princípios da termodinâmica, a *lei da conservação da energia* (energia não pode ser criada, nem destruída) e na *lei da entropia*, que diz que nem toda a energia de entrada pode ser transformada em trabalho pelo sistema. Uma parte é necessariamente transformada em entropia e dissipada na forma de calor.

Um dos primeiros economistas a pesquisar o que acontece com a matéria e a energia durante o processo econômico foi Georgescu-Roegen (1971). Ele desvendou um princípio universal que amplia a aplicação da segunda lei da termodinâmica nos processos econômicos. Segundo ele, é verdade que a energia não se perde, porém ela é *depreciada* quando for utilizada em um processo econômico e transformada em descarte (SCHÜTZ,

1980). A matéria e a energia entram em qualquer processo econômico no estado de *entropia baixa* e o deixa no estado de *alta entropia*.

Somente energia e matéria de baixa entropia podem ser utilizadas pelo homem. Por exemplo, carvão mineral, petróleo, madeira ou um alimento, antes de serem usados é matéria de baixa entropia. Como mencionando anteriormente, a lei da entropia demonstra que energia e matéria permanecem iguais na sua somatória, mas são transformados qualitativamente durante os processos metabólicos. Embora esta seja a finalidade do próprio processo econômico, devemos levar em consideração que esta transformação necessariamente produz uma degradação energético-material do sistema em que ela ocorre. Como a terra é um sistema fechado, a degradação energética dos recursos planetários necessariamente leva a humanidade a uma encruzilhada energética que ela vai precisar resolver. Por exemplo, em 1970 foram necessárias 3,1 vezes mais energia para obter uma colheita de milho somente de 2,4 vezes maior que aquela obtida em 1945 (SCHÜTZ, 1980).

Sabemos que o processo produtivo agrega valor econômico a uma determinada matéria-prima, baixando ao máximo a entropia no produto final destinado ao consumo. Porém, no sistema econômico como um todo, a entropia aumenta desproporcionalmente porque, por mais que se agregue valor num determinado produto, este se torna descarte imediatamente após seu uso ou consumo e se transforma em matéria de alta entropia. A máquina a vapor e a criação de porcos são dois exemplos clássicos (SCHÜTZ, 1980):

- A máquina a vapor produz energia mecânica preciosa, porém nunca é possível transformar toda energia contida no carvão em energia mecânica: 2/3 ou mais da energia original contida no carvão são perdidas por difusão na fricção e na inércia estrutural da máquina na forma de calor. Esta energia perdida é chamada entropia;
- Na Europa, a criação de porcos consome até 10 kilo-calorias de energia na forma de adubos na produção de milho para a ração, óleo diesel para o aquecimento dos chiqueiros e transportes e outros tipos de serviços para, no final obter uma kilo-caloria de carne de porco. Em outras palavras, 90 % da energia utilizada para produzir 1 kg de carne é entropia.

Do ponto de vista termodinâmico, podemos dizer que a produção industrial moderna é uma corrida cada vez mais acelerada da humanidade atrás de materiais de baixa entropia para transformá-los o mais rápido possível em materiais de alta entropia (lixo), sem valor.

Por esta razão Schütz (1980) faz algumas perguntas intrigantes:

sob este ponto de vista, o que vem a significar na verdade as definições atualmente utilizadas na economia? A quantidade de dinheiro existente não representaria um equivalente à quantidade de entropia gerada pelo homem? A inflação não seria no fundo nada mais do que o reflexo do aumento da entropia? O capital não seria uma espécie de lubrificante universal para acelerar os processos que desvalorizam o mundo?

A conclusão de Schütz (1980) é de que a humanidade não enxerga os acontecimentos econômicos através da ótica da segunda lei da termodinâmica. Mesmo se tomasse consciência das conseqüências fatídicas do seu labor, o homem trabalharia sempre um pouco além do necessário para a sua simples sobrevivência. A razão disto, o verdadeiro *motor* de todo processo econômico, é a busca pelo *Lebensgenuss* (o gozo da vida). Este é o produto nobre em troca do qual transformamos matéria de baixa entropia em descarte e lixo de alta entropia.

Mesmo não concordando completamente com as conclusões de Schütz (1980), as questões que ele levanta são pertinentes e cada vez mais relevantes.

Sabemos que todos os sistemas naturais (não humanos) têm tendência de transformar o mínimo possível de sua energia disponível em entropia, para maximizar sua capacidade de sobrevivência. Porém, constatamos que os processos econômicos da sociedade industrial moderna com suas enormes transformações de energia livres, de matérias primas concentradas e com a sua produção em massa de entropia na forma de calor de difusão ou descarte, fazem exatamente o contrário.

Caso a humanidade continuar dependendo dos recursos energéticos finitos, armazenados na terra, fatalmente será condenada à pobreza ou à morte pela lei da entropia. Sua única saída será o abastecimento de todas as necessidades de energia através de fontes "inesgotáveis", por exemplo, a radiação solar e a reciclagem dos seus materiais não renováveis.

APLICAÇÕES PRÁTICAS

Produção e Consumo

Na sociedade industrial moderna, a rapidez com que o homem consome e descarta um produto para o ambiente, torna fundamental uma reflexão sobre a relação produção/produto/consumo (CAMPOS, 1994; PASSERINI, 1994). A intensificação dos processos de produção requer uma quantidade crescente de recursos, aumentando drasticamente as escalas de consumo e conseqüentemente o descarte dos produtos usados. Enquanto isso, a capacidade de reciclagem e absorção do descarte, e a formação dos recursos naturais da natureza, realizam-se em escalas de tempo geológicas. Desta maneira a sociedade moderna torna-se o principal depredador da natureza.

A maior parte dos materiais utilizados atualmente é descartada após um único e breve uso. Isto é o caso de cerca de dois terços de todo o alumínio, três quartos de todo o aço e de todo o papel e do plástico Brown (1990).

Na década de 70, a crise do petróleo e o aumento da consciência ambiental contribuíram para despertar um movimento global contra o desperdício e a reciclagem de materiais foi compreendida como uma alternativa à crise energética que afeta a sociedade industrial contemporânea. Tomando-se como exemplo, o processo de reciclagem do alumínio que requer apenas 5% da energia utilizada para produzi-lo a partir do minério da bauxita (BROWN, 1990).

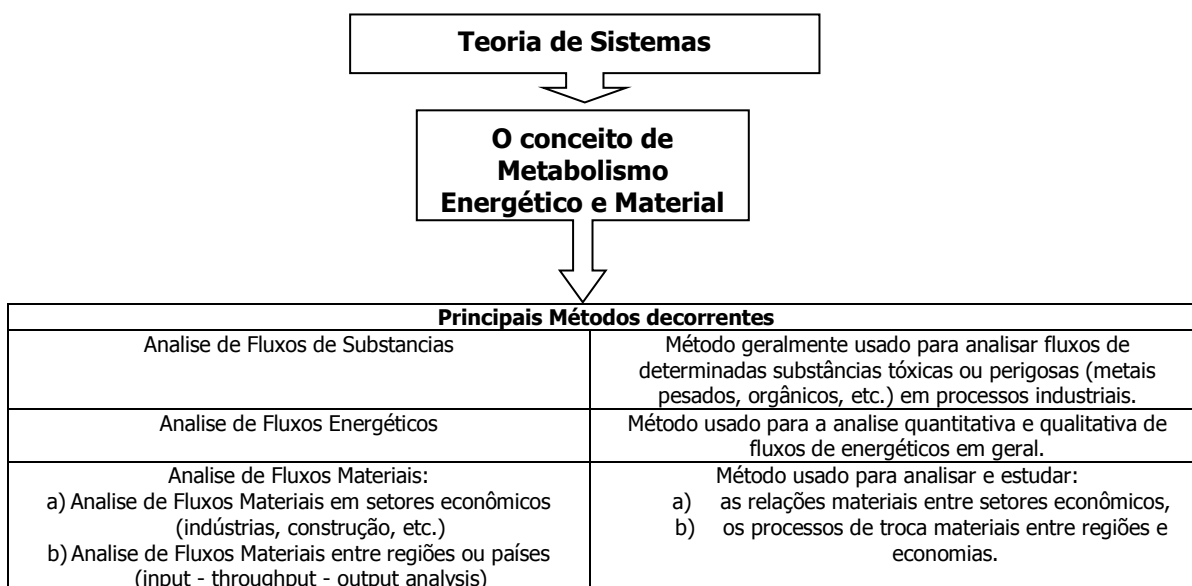
Como pudemos ver nos capítulos anteriores, uma das conseqüências mais importantes da *Teoria de Sistemas Complexos* é o conceito de *Metabolismo Energético*

Material que descreve o permanente *Fluxo de Energia e Matéria* que percorre os sistemas abertos e garante assim sua capacidade de reprodução.³

Assim, uma série de métodos analíticos foi desenvolvida a partir do conceito de Metabolismo Energético e Material, todas com enfoques diferentes, entretanto, baseados na mesma idéia da contabilidade de Fluxos.

Dependendo do enfoque, os métodos são usados para desenvolver:

- (i) tecnologias e processos menos poluentes e mais eficientes em termos energéticos e materiais;
- (ii) propostas concretas para as políticas publicas e a legislação;
- (iii) propostas para diminuir desigualdades econômicas e sociais entre regiões ou países.



Quadro 6 – Métodos decorrentes da Teoria de Sistemas

Em seguida três exemplos de aplicações práticas que estão sendo usados e desenvolvidos com bastante êxito nos últimos anos e que se enquadram no contexto dos principais métodos mencionados: a *Análise de Fluxos Materiais*, *Metabolismo Industrial* e *Análise de Ciclo de Vida*.

A Análise de Fluxos Materiais (AFM)

Introdução

Na ultima década do século passado a contabilidade e análise dos fluxos materiais e energéticos encontrou importante aceitação na busca de indicadores e métodos capazes de avaliar e medir o grau de sustentabilidade de um processo econômico ou de uma economia nacional. Por exemplo, a EUROSTAT (o instituto estatístico da União Européia) incluiu o levantamento de dados estatísticos sobre fluxos materiais nas economias nacionais para estabelecer indicadores de sustentabilidade.

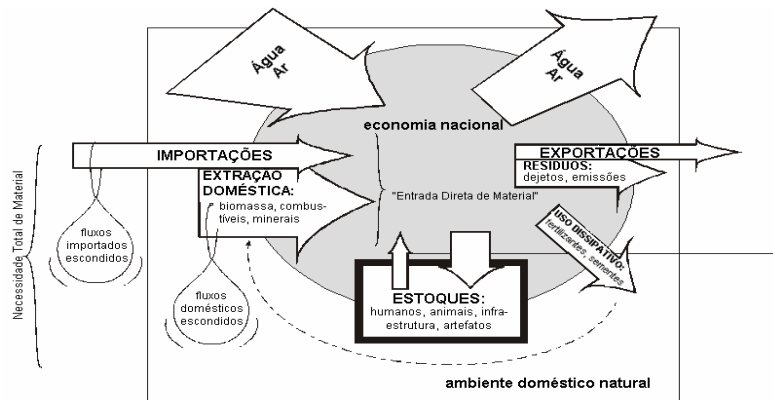
Os cálculos dos fluxos materiais apresentam ainda algumas dificuldades, especialmente devido à inconsistência e falta de dados, entretanto, o princípio é simples.⁴

³ Na literatura inglesa se usa a abreviação MFA, de *Material Flow Account*

Trata-se de calcular a quantidade (em unidades físicas) de recursos renováveis e não renováveis que uma economia retira do ambiente para sustentar o nível de vida de sua população. Desta maneira muitas externalidades que não são contabilizados monetariamente pela economia clássica se tornam visíveis e podem ser transformados em indicadores. Um exemplo simples é a produção de Alumínio: se o preço da tonelada de fato incluísse o custo social dos impactos ambientais e energéticos, certamente ninguém poderia tomar uma cerveja numa lata de alumínio.

Tradicionalmente, a economia capitalista mede sua eficiência através do famoso PIB, considerando apenas a circulação monetária representativa dos processos de produção – circulação - consumo. Desta maneira, a economia esconde a verdadeira dimensão de sua base material real que repousa sobre fluxos concretos de matéria e energia. **A Figura 7** mostra os principais componentes de uma análise de fluxos materiais e energéticos através de um sistema econômico. Atualmente estes balanços são feitos por várias instituições nacionais de estatísticas. Como mencionado anteriormente a EUROSTAT adotou uma metodologia coerente para os países da União Européia com o objetivo de levantar os dados estatísticos adequados para os cálculos dos fluxos materiais das economias nacionais.

Fig.7 Metabolismo das Sociedades, fluxos de materiais e seus componentes



Fonte: IFF Social Ecology

Desenvolver indicadores de sustentabilidade baseados em estudos dos fluxos materiais e energéticos tem importantes vantagens, visto que a redução dos indicadores de desenvolvimento à dimensão monetária relega ao capital financeiro o papel de orientador principal das atividades econômicas. Isto se torna eminentemente claro quando observamos a política dos Bancos Centrais e o método que eles usam para determinar as taxas de juros. A hegemonia do capital financeiro nas decisões econômicas, drasticamente acelerado desde o rompimento dos acordos de *Bretton Woods* em 1972 e, sobretudo nas

⁴ Os governos e instituições nacionais de estatística na maioria dos países geralmente ainda não estão levantando os dados na quantidade, qualidade e frequência necessárias para poder construir AFM precisos. Entretanto, instituições de pesquisa que tratam de problemas de desenvolvimento sustentável já dispõem de bases de dados bastante consolidadas.

décadas posteriores a queda das economias regulamentadas do chamado *socialismo real*, submeteu a economia capitalista mundial aos ideólogos do *neoliberalismo radical*.⁵

Este processo acentuou rapidamente a separação e a contradição entre os interesses do capital financeiro e os interesses e necessidades dos governos nacionais que em última instância são responsáveis pelas economias nacionais e do desenvolvimento dos *setores produtivos* do país.

O neoliberalismo desenfreado teve reflexos diretos e indiretos na apropriação dos recursos naturais pelo modo de produção capitalista. A destruição ambiental em escala global, a exploração e o uso irracional e agressivo dos recursos naturais e a submissão da produção material aos interesses do capital financeiro global (crescentemente especulativo) jogou a humanidade na maior crise econômica de sua história.

Esta situação nos obriga hoje mais que nunca, reavaliar a base material da economia mundial e criar instrumentos empíricos capazes de relacionar o lado virtual (monetário) da economia com seu lado material que se expressa através da análise e medição dos fluxos energéticos e materiais de um sistema econômico.

Assim, compreender a sustentabilidade de um processo econômico exige inicialmente como condição mínima e imprescindível a compreensão da relação dialética entre a *intensidade material* e a *contabilidade monetária* do nosso sistema econômico. Os problemas passíveis de afetar a sustentabilidade de uma economia são relacionadas em grande parte com as suas entradas e saídas energéticas e materiais.

Nas **entradas**, os problemas surgem quando há *esgotamento das reservas de recursos não renováveis* e quando o uso de *recursos renováveis for superior à sua taxa de recomposição*. As Sociedades geralmente reagem através da migração, redução da procriação, mudança de hábitos alimentares, alteração nos modos de produção, guerras, etc.

Nas **saídas**, os problemas ocorrem na medida em que os resíduos produzidos pela Sociedade não possam mais ser absorvidos de maneira natural pelo Ambiente. A utilização de matéria-prima fóssil (petróleo, minério, carvão etc.) gera resíduos de difícil absorção, causando severos impactos tais como a produção de dióxido de carbono com sua conhecida contribuição para a poluição atmosférica, o efeito estufa e as mudanças climáticas globais.

Diferentemente das Sociedades do passado, que eram *sistemas abertos em relação aos seus Ambientes*, as atividades humanas assumiram uma escala global e o ambiente natural como um todo passou a ser parte de um *mega-sistema planetário de ciclo fechado*. Hoje há evidências claras de que os efeitos das atividades do Sistema Econômico global estendem-se até os últimos confins deste planeta.

Esta é a *mais importante qualidade nova* na evolução da humanidade desde os pequenos grupos de hominídeos isolados, passando por diferentes etapas de configurações sociais e econômicas (basicamente sistemas abertos) até chegar ao estado

⁵ Em 1944 foram firmados os acordos de Bretton Woods entre os principais países capitalistas da época e estabeleceram entre outras coisas, uma paridade fixada entre as moedas nacionais. Com o rompimento dos acordos em 1972, o mercado financeiro foi "liberado" e começou a se configurar como setor dominante e crescentemente autônomo e especulativo da economia capitalista mundial.

atual: uma sociedade interligada á nível planetário que se tornou um sistema fechado. A conseqüência direta e mais importante é o fato que este tipo de sistema não tem mais condições de *exportar sua própria entropia*. O ambiente natural deixou de ser algo externo à sociedade e todos os impactos causados pelas atividades econômicas atingem a própria sociedade de forma direta e geralmente instantaneamente.

Assim, para a humanidade economicamente globalizada, há em princípio somente duas alternativas: *abrir o sistema* para o sistema solar e o Universo, tanto para exportar entropia como para importar novos recursos energéticos e materiais, *ou reformular seu modo de produção* para que seja adaptada a quantidade dos recursos naturais disponíveis, tornando-se um sistema *autopoiético* no sentido de Maturana e Varela (1980). Qualquer que seja a opção, ela requer uma reorientação e reorganização profunda do modo de produção capitalista.

Aspectos Metodológicos

A Análise do Fluxo Material é um método baseado no entendimento que sistemas complexos *emergem, crescem, assumem um estado estacionário, evoluem, assumem novos estados estacionários e morrem quando este ciclo for interrompido de alguma maneira*. Pode-se sintetizar esse ciclo da seguinte forma:

(i) Para garantir a reprodução do seu *metabolismo energético-material* o sistema importa matéria e energia do seu ambiente relevante, *o campo de interação;*

(ii) Para que essa importação possa ocorrer, o sistema precisa atuar e *configurar seu ambiente relevante* de acordo com suas necessidades;

(iii) Ao configurar esse ambiente, o sistema *importa*, ao mesmo tempo, sinais de *mudanças que ocorrem no ambiente*, o que o obriga a reagir através de ajustes estruturais;

(iv) A energia necessária para esta *permanente readaptação comportamental e estrutural* é a **entropia** do sistema, que, se excessiva, inviabiliza sua existência.

Por isso, a sustentabilidade de um sistema depende em grande parte da natureza do seu metabolismo energético-material, isto é, da sustentabilidade de seu modo de (re)produção que é baseado na relação dialética entre a estrutura e o ambiente relevante do sistema. A qualidade desse metabolismo energético-material *se revela por efeitos observáveis, no ambiente relevante, na coerência estrutural e nos elementos internos do sistema*. Esses efeitos precisam ser assimilados (percebidos) pelo sistema, para que ele possa ajustar seu metabolismo. Isto se dá por meio dos chamados *orientadores* que sinalizam, permanentemente, seu grau de aderência ao ambiente. Para satisfazer ou adequar-se a esses orientadores o sistema tem que ajustar seu metabolismo energético-material às transformações do ambiente e, assim, garantir sua sustentabilidade.

A relação sociedade-natureza e os fluxos energéticos-materiais

A relação entre a **Natureza** (biosfera e base abiótica de recursos) e as **Sociedades Humanas** (incluindo suas culturas) se dar pela interação de quatro componentes fundamentais:

- O **Ambiente**, a parte da natureza relevante para reprodução da sociedade. Produz e armazena os recursos energéticos e materiais necessários para a sobrevivência do sistema e serve ao mesmo tempo de depósito dos rejeitos e de suporte à vida;

- A **Infra-estrutura**, o conjunto de estruturas materiais (estradas, hidrelétricas e outros) que possibilitam a apropriação dos recursos ambientais para atender necessidades sociais. Atua como braço físico da Cultura na **colonização** do Ambiente por meio de **trabalho** realizado através do Sistema Econômico e Governo.

- A **Cultura**, um sistema simbólico que desempenha o papel de memória dos valores e crenças acumuladas pelo processo civilizatório, através de registros, tradições e as mais diversas formas de comunicação; a infra-estrutura pode ser considerada como a parte "materializada" da memória cultural da sociedade.

- Os **Seres Humanos** atuam como partes da memória cultural, registram por **experiência** direta as mudanças no Ambiente e aplicam **trabalho coletivo** para adequá-lo aos interesses dos seus metabolismos.

A insustentabilidade do atual padrão de desenvolvimento pode, portanto, ser resumida assim:

(i) O Sistema sócio-econômico atua sobre o Ambiente para obtenção, uso e deposição de recursos energéticos-materiais (Metabolismo Econômico-Ambiental ou Socioeconômico);

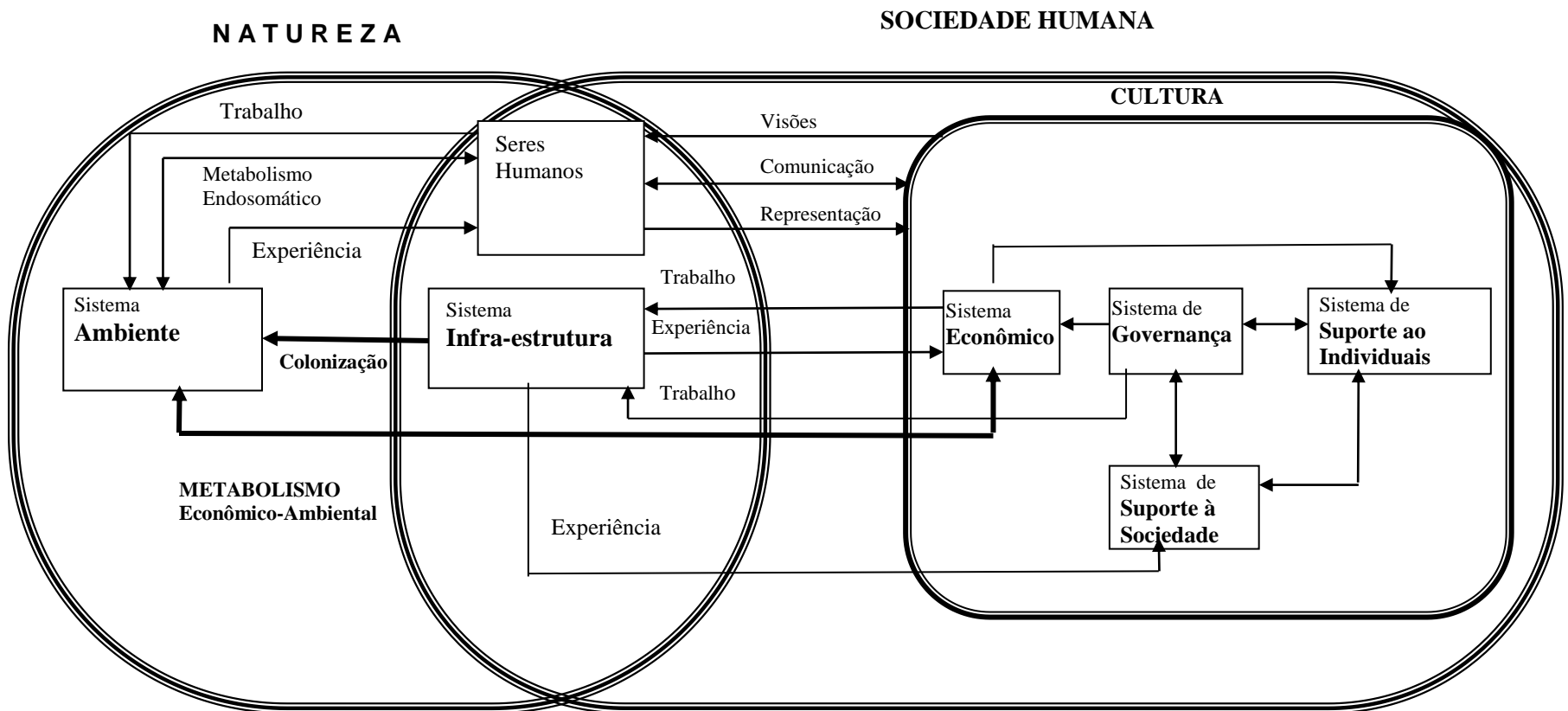
(ii) O Ambiente reage modificando-se e sinalizando tais modificações através de escassez de recursos naturais, comprometimento de ecossistemas e mudanças globais;

(iii) O Sistema sócio-econômico, por seu lado, reage ajustando a infra-estrutura às novas necessidades e interferindo no Ambiente, através da intensificação da Colonização, baseado no princípio equivocado que "desenvolvimento é aumento do PIB";

(iv) Enquanto esse círculo vicioso não é percebido como fatal pela sociedade, ela não reorganiza suas crenças e valores. Sem isso, o modo de reprodução do Metabolismo Econômico-Ambiental não muda, mesmo que surjam patologias econômicas e sociais desastrosas como guerras, fome, epidemias e catástrofes causadas por ações antrópicas.

A Análise dos Fluxos Materiais é uma metodologia para a medição das interações Sociedade-Ambiente, abrindo assim a possibilidade de medir empiricamente o grau de insustentabilidade de um processo econômico, e propor instrumentos operacionais capazes de modificar a relação sociedade ambiente.

Figura 7: Modelo de interação Sociedade-Ambiente



Fonte: Adaptado por Machado (1999) a partir de Fischer-Kowalski (1997, p. 8) e Bossel (1996, p. 4.14).

Aqui se chega à questão central do desenvolvimento sustentável que em última instância reside no modo de reprodução do metabolismo energético-material da sociedade e se reflete, na degradação ambiental, exaustão dos recursos naturais, nas patologias sociais, na acumulação de capital especulativo, nas desigualdades sociais e na qualidade de vida etc.⁶

Assim, o metabolismo energético-material, pode ser considerado sustentável se for capaz de:

- Manter a integridade estrutural do sistema frente às modificações quantitativas e qualitativas ambientais;
- Sustentar seu metabolismo face à escassez de recursos naturais; e manter a capacidade dos ecossistemas do seu Ambiente de absorver os rejeitos sem degradar-se;
- Minimizar as desigualdades entre seus componentes e que causam patologias sociais;
- Fomentar satisfação e minimizar frustrações dos indivíduos que o integram, face às aspirações não atendidas;
- Manter a diversidade dos modos de vida para possibilitar escolhas futuras, face à globalização de crenças e valores;
- Impor-se limites e respeito em relação ao uso dos recursos do seu Ambiente.

Percebemos que o debate sobre o desenvolvimento sustentável se resume em última instância a questão da sustentabilidade do nosso modo de produção.

Assim, a contabilidade de fluxos materiais possibilita uma análise do sistema econômico não somente através dos fluxos monetários, como ocorre com os instrumentos clássicos da análise econômica, mas permite medir a racionalidade da utilização dos recursos naturais e o tamanho das *mochilas ecológicas de uma economia*⁷. Informações dessa natureza permitem conhecer o peso ambiental dos processos econômicos e viabilizam a construção de indicadores de sustentabilidade, com base empírica consistente.

A União Européia publica periodicamente guias metodológicas que representam os maiores avanços na aplicação prática desta metodologia.⁸

Na última parte do livro demonstraremos a utilidade e as possibilidades da Análise de Fluxos Materiais no exemplo da economia brasileira.

⁶ Assim podemos identificar empiricamente as **causas da insustentabilidade**, independente de qualquer pressuposto ideológico, filosófico ou cultural. A sustentabilidade do metabolismo passa a ser uma questão de sobrevivência do próprio **sistema como um todo** e não simplesmente uma **opinião** de um determinado grupo social ou de interesses específicos.

⁷**Mochila ecológica** ou *fluxos ignorados*: Trata-se da quantidade de matéria e energia que é mobilizada pela economia, mas que não é integrada aos valores monetários dos produtos gerados.

⁸ **Economy-wide material flow accounts and derived indicators**, A methodological guide, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001, ISBN 92-894-0459-0, © European Communities, 2001

Metabolismo Industrial (MI)

Introdução

Metabolismo, no contexto biológico, refere-se aos processos internos de um organismo vivo que necessita de materiais ricos em energia e de baixa entropia (alimento) para prover sua própria manutenção e suas funções de crescimento e reprodução. O organismo elimina resíduos, que consistem em materiais degradados e de alta entropia. Em analogia, podemos considerar o metabolismo das atividades industriais como a totalidade de um processo físico que converte uma determinada matéria-prima (e energia) em produtos finais e resíduos. Isto ocorre sob condições onde o mercado e as instituições atuam como mecanismos auto-reguladores (GEORGESCU-ROEGEN, 1971; NICOLIS; PRIGOGINE, 1977; AYRES, 1988).

Tal como qualquer sistema vivo, um processo industrial consome insumos materiais e energéticos, transforma-os em bens que serão utilizados e eliminados sob forma de resíduos. O sistema econômico como um todo é composto de uma grande quantidade de processos industriais interligados que consomem e transformam certas quantidades de materiais em produtos específicos.

Em bases desta idéia foram desenvolvidas diferentes metodologias e aplicações práticas que estão sendo testados e aplicados em vários países e escalas econômicas, entre elas o chamado *Metabolismo Industrial* que trata do fluxo de certos materiais específicos, geralmente tóxicos ou perigosos, através dos processos industriais (AYRES, 1997a, 1997b; AYRES, 1989; AYRES; SIMONIS, 1994).

Todos estes métodos se desdobram em diferentes abordagens com enfoques específicos, entretanto, estão baseados na ideia geral da necessidade de contabilizar, estudar e analisar o caráter dos fluxos energéticos e materiais que caracterizam a sustentabilidade da sociedade.

Metodologia

A metodologia do metabolismo industrial consiste num trabalho de pesquisa que busca desvendar os caminhos de um determinado composto químicos ou um material específico através dos processos produtivos e de distribuição.

Por exemplo, o Cádmiu, um metal de alto potencial tóxico, faz parte de num grande numero de processos industriais e se encontra em diversos produtos em diferentes concentrações. O estudo do Metabolismo Industrial do Cádmiu é, portanto, extremamente importante para conhecer a *quantidade* e a *qualidade* (a forma química) do Cádmiu nos diversos produtos que inundam o mercado e a maneira em que este metal é distribuído, consumido e descartado na sociedade. Assim torna-se possível de propor soluções, regras e políticas para mitigar os efeitos do Cádmiu e diminuir sua utilização.

O método pode ser aplicado em diversos níveis: global, nacional, regional, setorial, empresarial, local e até residencial.

Enquanto em sistemas naturais os materiais movimentam-se em ciclos fechados, com uma reciclagem praticamente total, isto não ocorre em sistemas industriais, visto que a reciclagem dos produtos usados geralmente não faz parte da responsabilidade do processo de produção. Os processos industriais resultam em produtos com concentrações suficientemente elevadas de materiais potencialmente tóxicos ou perigosos para poder causar os mais diversos impactos ambientais (SOCOLOW et al., 1994; GREADEL; ALLENBY, 1995; AYRES, 1997b).

Segundo Ayres (1997a) em analogia com os ciclos materiais bio-geoquímicos (o ciclo hidrológico, os ciclos do carbono, do nitrogênio, do fósforo etc.), o Metabolismo Industrial pode ser representado pelo modelo das 4 caixas (Figura 8). Neste modelo, os ciclos industriais são comparados com os elementos dos ciclos naturais. Devido à atividade humana, os ciclos naturais são perturbados em consequência da acumulação de materiais alóctones que poluem certos estoques do ambiente natural e afetam (intoxicam) o bem-estar dos seres humanos no curto e no longo prazo.

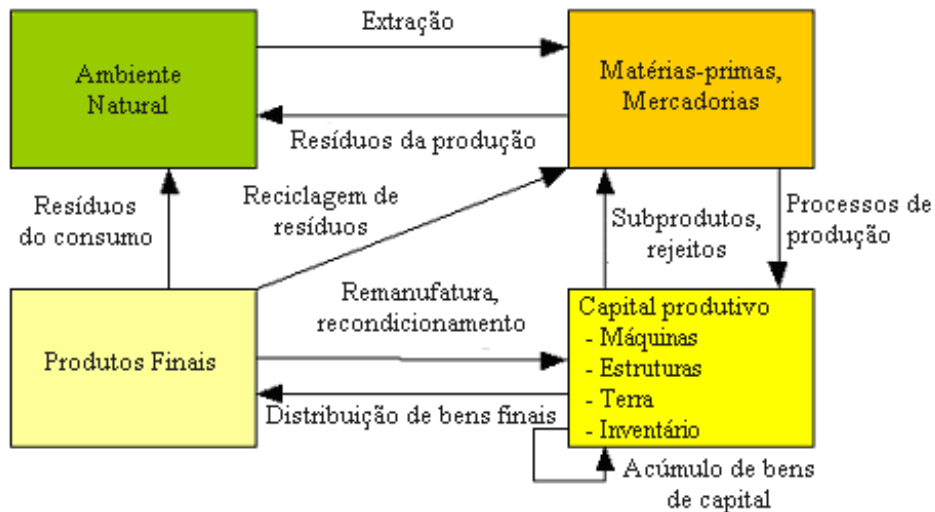


Figura 8 - Modelo das 4-caixas para os Ciclos de Material Industrial
Fonte: Ayres (1997a).

O metabolismo industrial é uma abordagem integrada, que permite, entre outras, estudar as mudanças e os efeitos das políticas ambientais que afetam o sistema como um todo:

- Estudos do metabolismo industrial permitem documentar empiricamente os efeitos das políticas econômicas e podem elaborar propostas de políticas públicas e regulamentações legais em relação do emprego de substâncias potencialmente perigosas etc.;
- O método é útil para estudar as trocas de energia e de materiais específicos entre os diversos processos produtivos. Por exemplo, certos processos industriais produzem descartes e rejeitos que podem ser úteis para outros processos;

- O método é também bastante útil para estudar os vários tipos de interações econômicas entre regiões diferentes através do comércio de bens primários e secundários, bem como através do intercâmbio de *know-how* tecnológico, investimentos, poluição e mão-de-obra (Figura 9). Em consequência dessas interações, as regiões podem *exportar* e contornar problemas ambientais locais, através da importação de bens produzidos com grande intensidade de energia e materiais (por exemplo, o Alumínio) e através da exportação de descartes. O metabolismo de um determinado processo industrial pode ser melhorado fechando os ciclos materiais e aproveitando mais racionalmente os benefícios econômicos das interações regionais. Por exemplo, os resíduos de uma região podem servir como insumos em outra. Da mesma maneira, certos bens podem ser produzidos com maior eficiência ambiental e econômica em uma região do que em outra. A dimensão espacial é, portanto, crucial para o estudo do metabolismo industrial.

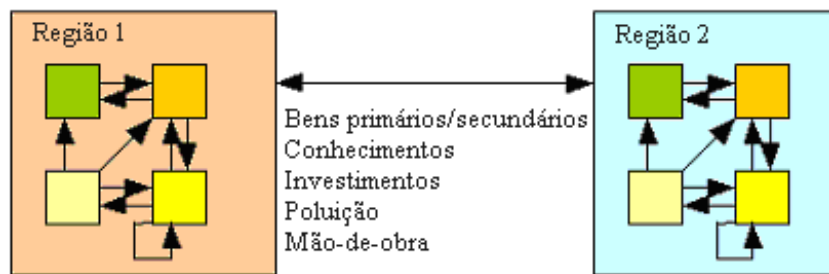


Figura 9 - Interações entre duas regiões, cada uma contendo o ciclo material mostrado na Figura 8.

Análise de ciclo de vida (ACV)

Introdução

O funcionamento dos ecossistemas e as leis da natureza ainda estão relativamente pouco compreendidos pela sociedade humana, que se tem apropriados avidamente e de forma pouco racional dos recursos naturais do planeta. Apesar da voracidade de nosso sistema econômico em relação aos recursos naturais, o uso racional dos mesmos não é necessariamente incompatível com o modo de produção capitalista. Na busca do lucro os processos produtivos são necessariamente orientados pela eficiência e sofisticação no uso de tecnologias. Por outro lado, a intensificação do uso de tecnologias de última geração, gera impactos ambientais preocupantes em escala global.

Influenciada pela teoria de sistemas, a discussão sobre problemas ambientais foi paulatinamente modificando o enfoque: em vez de concentrar a atenção exclusivamente sobre os *efeitos finais* dos impactos ambientais, as pesquisas começaram a focalizar *os ciclos produtivos* que de fato *causam* a poluição no ponto final de um processo. Não basta conhecer o nível de poluição e tentar limpar a saída dos esgotos de uma cidade ou de

uma fábrica, é preciso conhecer os processos e as diversas fontes que causam a poluição.

Os primeiros estudos que trataram do ciclo de vida de um produto foram iniciados nos anos 60 e início dos anos setenta, dando ênfase a questões tais como, eficiência energética do processo produtivo, o consumo de materiais e, até certo ponto, disposição final dos resíduos. Por exemplo, em 1972, na Inglaterra foi desenvolvida uma pesquisa conhecida como ECOBALANCE.⁹

Calculou-se na época, a energia total usada na produção de vários tipos de recipientes de bebidas de alumínio, plástico, aço e vidro. Em 1979 o autor da pesquisa consolidou sua metodologia, publicando o *Manual de Análise de Energia Industrial*. O verdadeiro interesse pela Análise do Ciclo de Vida de um Produto somente se deu de forma acentuada, na metade da década de 80 e início da década de 90, quando a discussão e o debate sobre o desenvolvimento sustentável começaram a ganhar espaço na mídia e na academia. Mas era, sobretudo a partir de 1992 (*United Nations Earth Summit* no Rio de Janeiro), que esta metodologia foi reconhecida como uma das ferramentas promissoras para uma grande variedade de tarefas relacionadas a problemas do desenvolvimento sustentável e ao manejo ambiental.

Em 1993 foi publicado o maior levantamento compreensivo internacional sobre Análise do Ciclo de Vida (LCA), chamado *The LCA Sourcebook*.¹⁰ No entanto, o interesse pelo método ainda é restrito a pesquisadores e cientistas de instituições, sobretudo européias.

Os maiores obstáculos para a aplicação do método têm sido até agora a relativa densidade de dados necessários, combinados com a resistência da política contra todo tipo de inovações e expectativas às vezes exageradas sobre o alcance do método (BOUSTEAD, 1996).

O que é Análise do Ciclo de Vida?

Todos os produtos que conhecemos e consumimos tem seu próprio ciclo de vida. Um carro, por exemplo, é composto de milhares de materiais que são transformados passo á passo e juntados para o produto final. Após a venda do carro ele entra na etapa do uso e finalmente se transformará em sucata que pode ser reciclada em parte e o restante é definitivamente depositado no nosso ambiente. Cada etapa de produção do carro apresenta seus problemas específicos de impactos ambientais. A Análise do Ciclo de Vida (ACV) - *Life Cycle Analysis* (LCA) - estuda a interação complexa entre os diferentes passos de produção, consumo e descarte de um produto e os diversos impactos que cada passo causa ao ambiente (CRAIGHILL; POWELL, 1996; BAKST et al., 1995).

Enquanto o Metabolismo Industria se concentra no fluxo de determinadas substancias, a ACV focaliza sobretudo as etapas tecnológicos de um processo industrial.

⁹ Ian Boustead: LCA - Como Surgiu, O Começo no Reino Unido, in *International Journal of Life Cycle Assessment* 1 (3) 1996

¹⁰ SustainAbility (UK); Society for the Promotion of LCA Development (Belgium); Business in the Environment (UK): *The LCA sourcebook: a European business guide to life-cycle assessment*, London, SustainAbility, 1993, 112 p., illus. ISBN ISSN: 0-9521904-0-0

O *Grupo de Pesquisa ACV* da Universidade Federal de Santa Catarina (www.ciclodevida.ufsc.br) define o método da seguinte forma:

A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica empregada na análise dos aspectos ambientais e avaliação dos impactos potenciais associados ao ciclo de vida de um produto, processo ou serviço.

Como instrumento de tomada de decisões, esta ferramenta compreende fundamentos para o desenvolvimento e a melhoria de produtos, o marketing ambiental e a comparação de diferentes opções de produtos e/ou materiais.

A ACV enfoca o ciclo de vida de produtos, processo ou serviço, desde a extração de matérias-primas, passando pelas etapas de transporte, produção, distribuição e utilização, até sua destinação final (do berço ao túmulo). Por meio da quantificação e caracterização dos fluxos elementares, de entrada e saída de matéria e energia, e agregação em categorias de impacto selecionadas, torna-se possível compreender o impacto ambiental de um sistema de produto.

A Metodologia

Os principais passos metodológicos de uma ACV devem responder as seguintes questões:

- Quais são as matérias primas necessárias (quantidade e qualidade) para produzir um determinado produto (a intensidade material do produto)?
- Quais as emissões e impactos ambientais causados pelos processos de transformação da matéria-prima em produtos básicos?
- Quais as emissões e impactos ambientais causados pelos diferentes processos de produção do produto final?
- Quais são os impactos causados pelo descarte do produto após uso?

A ACV é, portanto uma metodologia que permite:

- Quantificar e qualificar as emissões e os impactos ambientais de um produto, processo produtivo ou sistema, desde o seu início (p.ex. a extração das matérias-primas no caso de um produto) até o final da *vida*, quando o produto é descartado;
- Propor modificações tanto nos processos tecnológicos de produção como no uso e descarte de um determinado produto com o objetivo de diminuir a intensidade material, o tamanho da mochila ecológica e mitigar os impactos ambientais dos processos produtivos;
- Criar indicadores e propor políticas públicas em relação a processos econômicos e produtivos insustentáveis.

Nas últimas décadas cresceram as pressões sobre os setores produtivos para cuidar dos problemas ambientais causados pela produção. A legislação e a conscientização do consumidor exigem o cumprimento de normas tais como o sistema ISO e outros.

Atualmente, a ACV é um dos métodos mais adequados para atender estas demandas e ajuda na identificação de possíveis melhorias ao longo do ciclo de vida de diferentes produtos e no fornecimento de dados e informações ambientais

complementares úteis para as tomadas de decisão.¹¹ Por exemplo, através da realização da ACV pode-se conseguir a certificação de selo verde dos produtos tipo III pela norma ISO 14025.

A Análise do Ciclo de Vida é, portanto, uma ferramenta metodológica, semelhante à Análise de Fluxos (MFA), baseada na Teoria de Sistemas e os princípios do Metabolismo Energético Material, capaz de produzir indicadores e informações consistentes sobre a sustentabilidade de determinados processos produtivos ou sistemas em geral.

Dependendo dos autores, outros nomes podem ser atribuídos a esse método, tais como: Abordagem do Ciclo de Vida (*Life Cycle Approach*), Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*), e Análise do berço ao túmulo (*Cradle to Grave Analysis*) ou *Eco-balance*. Segundo Jensen et al. (1997), alguns pesquisadores entendem a Análise do Ciclo de Vida como um sistema conceitual útil, já outros a consideram como um grupo de ferramentas práticas. Dependendo do contexto, ambas podem ser corretas e úteis. Tanto engenheiros quanto cientistas consideram a *reflexão sobre os ciclos de vida*, como um grande estímulo à criatividade e habilidade de ampliar a visão sobre as dimensões sistêmicas de um problema específico. Portanto, a Análise do Ciclo de Vida é constituída por um grupo de novas ferramentas e técnicas capazes resolver problemas relativos à gestão ambiental, e em longo prazo, contribuir para o Desenvolvimento Sustentável (JENSEN, 1997).

Semelhante aos estudos de fluxos materiais, a Análise de Ciclo de Vida de um produto envolve uma demanda substancial de dados. Uma avaliação completa do ciclo de vida envolve fases diferentes de um processo, chamados de *estágios*. Por exemplo, o fluxo geral de energia através do ciclo completo de vida de um produto é determinado através do consumo de cada etapa de produção desde a extração da matéria-prima, do processamento, fabricação de material, fabricação do produto e do transporte até o consumidor final (BAKST et al., 1995).

Resumido, uma ACV requer quatro etapas básicas:

- Definição de Objetivos: Nesta primeira etapa da pesquisa são definidos os escopos, oportunidade, os limites do estudo, a unidade funcional (baseando-se na unidade fixa de produtos como estocado até seu uso final), elaboração de hipóteses, bem como apontar as limitações do trabalho;
- Inventário: Esta etapa constitui-se de uma compilação detalhada de todas as entradas (*input*) e saídas (*output*) tanto de cada etapa como do ciclo todo, incluindo-se a aquisição da matéria-prima, a eficiência tecnológica do processamento, a eficiência energética de cada etapa de produção etc.;
- Análise de Impactos: Nesta etapa da análise se classifica qualitativa e quantitativamente os dados do inventário e realiza-se uma caracterização e avaliação dos impactos de cada fase do processo produtivo.
- Interpretação: Finalmente faz-se a identificação e interpretação de oportunidades para obter melhoria nos processos que resultam em impactos

¹¹ A União Européia publica guias e informações detalhados sobre o desenvolvimento e a utilidade das AVC, veja o site: <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcaifohub/index.vm>

ambientais menores. Nesta fase se avalia a qualidade dos dados obtidos. Quanto mais baixa a qualidade dos dados utilizados na interpretação, maior será o risco de tomar a decisão errada (CRAIGHILL, 1996).

Análise do Ciclo de Vida e Reciclagem

Um excelente exemplo da aplicação da ACV é a reciclagem dos materiais plásticos, um dos materiais mais consumidos e mais problemáticos produzidos e vertidos ao ambiente. O plástico faz parte do cotidiano do homem moderno e por ser um material durável, novas aplicações deste material surgem a cada ano. Entretanto, o plástico não é biodegradável e não se decompõe sob ação de microorganismos, como ocorrem com outros materiais tais como, papéis, madeira, tecidos de algodão etc. Por um lado, o uso do plástico representa grandes vantagens, por outro, acarreta em enormes problemas para o meio ambiente.

A economia de energia que pode ser obtida pelo reprocessamento de plástico oriundo dos resíduos sólidos municipais ou industriais podia ser comprovada por detalhadas ACV. A energia poupada pelo uso de materiais recicláveis como PET (*Politereftato de Etileno*) e HDPE (*polietileno* de alta densidade) podem ser numa média de 88-97% da energia necessária para processar resinas virgens (BISIO et al. 1994).

Segundo Bisio (1994), a Análise do Ciclo de Vida pode ser aplicada para recuperar e re-processar plásticos coletados do lixo e estabelecer uma hierarquia aproximada de economia de energia. A disposição final dos resíduos sólidos pode ser da seguinte maneira:

- Aterrados;
- Incinerados em unidades de recuperação de energia;
- Reutilizados;
- Recuperados e re-processados em novos insumos;
- Modificados quimicamente;
- Convertidos por *pirólise* ou *hidrólise* em líquidos e/ou combustíveis gasosos ou químicos.

A próxima **tabela** mostra a energia incorporada de alguns produtos plásticos.

Tabela 7- A energia incorporada de alguns produtos plásticos

Produtos	Energia (BTUs/lb)
<i>PVC (Policloreto de Vinila)</i>	34,000
<i>PET (Politereftato de etileno)</i>	45,800
<i>PP (Polipropileno)</i>	41,000
<i>HDPE (Polietileno de alta densidade)</i>	42,200
<i>LDPE (Polietileno de baixa densidade)</i>	44,400

Fonte: Franklin Associates (1990).

Na medida em que foram observados os impactos ambientais do plástico sobre o meio ambiente, há um crescente interesse a cerca da temática da Análise do Ciclo de Vida (LCA), tanto por parte das agências governamentais, como por parte das indústrias.

Uma tese de doutorado do Núcleo de Altos Estudos Amazônicos aplicou a ACV à reciclagem do Alumínio na cidade Belém/PA/Brasil.¹²

¹² VIEIRA, A. L. Análise do Ciclo de Vida - Uma avaliação social e econômica da reciclagem das latas de alumínio na cidade de Belém. 2004 (Tese de Doutorado/UFPA/NAEA).

REFERÊNCIAS

- AYRES, R.U. (1988). Technology: the wealth of nation. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 33, n. 2, p.189-201.
- AYRES, R.U. et.al. (1989). *Industrial Metabolism, the Environment, & Application of Materials-Balance Principles for Selected Chemicals*, Research Report (RR-89-11), International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- AYRES, R.U.; SIMONIS, U.E. (1994). *Industrial metabolism: restructuring for sustainable development*. Tokyo: United Nations University.
- AYRES, R.U. (1997a). The Life Cycle of Chlorine: Part I; Chlorine Production & the Chlorine-Mercury Connection. *Journal of Industrial Ecology*, v. 1, n. 1, p. 81-94.
- AYRES, R.U. (1997b). Metals Recycling: Economic & Environmental Implications. *Resource, Conservation and Recycling*, n. 21, p. 145-173.
- BAKST, J.S. et al. (1995). *Guidelines for Assessing the Quality of Life. Life -Cycle Inventory Analysis*. Research Triangle Inst., Research Triangle Park, NC. Environmental Protection Agency. Washington, DC. Office of Solid Waste. 116p.
- BISIO A.L. et al. (1994): *How to Manage Plastics Waste: Technology and Market Opportunities*. Carl Hanser Verlag, Munich, New York.
- BOUSTEAD, I. (1996). *LCA - Origins. International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 1, n. 3.
- BROWN, L. R. (1990). *Salve o Planeta! Qualidade de Vida: O Planejamento de uma Sociedade Sustentável*. Worldwatch Institute. São Paulo-SP: Globo.
- CAMPOS, M. D. (1994). Fazer o Tempo e o Fazer do Tempo. *Ciência e Meio Ambiente*, n. 8. Santa Maria.
- CRAIGHILL, A. L.; POWELL, J. C. (1996). Lifecycle Assessment and Economic Evaluation of Recycling: A Case Study. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 17, p. 75-96.
- CRONON, H. (1994). *Nature's Metropolis*. New York: Grossman. p. 28-41.
- FISCHER-KOWALSKI, M; HABERL, H.; PAYER, H. (1992) - *A Paradise for Paradigms - Outlining an information System on Physical Exchanges between the Economy and Nature*; Schriftenreihe soziale Ökologie, Band 22, IFF-Interuniversitäres Institut für interdisziplinäre Forschung und Fortbildung, Wien, Áustria, 27 p.
- FISCHER-KOWALSKI, M.; HABERL, H. (1993) - *Metabolism and Colonization - Modes of production and the physical exchange between societies and nature*; Schriftenreihe soziale Ökologie, Band 32, IFF- Interuniversitäres Institut für interdisziplinäre Forschung und Fortbildung, Wien, Austria, 38 p.
- FISCHER-KOWALSKI, M.; HABERL, H. (1994) - *On the cultural evolution of social metabolism with nature - sustainability problems quantified*; Schriftenreihe soziale Ökologie, Band 40, IFF- Interuniversitäres Institut für interdisziplinäre Forschung und Fortbildung, Wien, Austria, 32 p.

FRANKLIN ASSOCIATES, (1990). A comparison of Energy Consumption by the Plastics Industry to total Energy Consumption in the United States. In: BIDDLE M.B. CHRISTY M.R. *Here today, here tomorrow: challenges of recycling engineering thermoplastics*. The Dow Chemical Company, Walnut Creek, California. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00302810>

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

GREADEL, T.E.; ALLENBY, B.R. (Ed.) 1995. *Industrial ecology*. Prentice Hall.

HABERL, H. (1994) - *Der Gesamtenergieinput des sozioökonomischen Systems in Österreich 1960 – 1991 - Zur Erweiterung des Begriffes "Energieverbrauch"*; Schriftenreihe soziale Ökologie, Band 35, IFF-Interuniversitäres Institut für interdisziplinäre Forschung und Fortbildung, Wien, Austria, 50 p.

JENSEN, A. A. et al. (1997). *Final Report - Life Cycle Assessment (LCA) A Guide to Approaches, Experiences and Information Sources*. Report to the European Environment Agency, Copenhagen – Denmark. <http://www.epa.gov/nrmrl/lcaccess/resources.html>

MATURANA, H.R.; VARELA, F.J. (1980): *Autopoiesis and Cognition, The Realization of the Living*, Dordrecht: Reidel.

MORAN, J. M. et al. (1980) - *Introduction to environmental science*, W.H. Freeman and Co., San Francisco, USA. 658 p. il.

NICOLIS, G.; PRIGOGINE, I. (1977). *Self-Organization in Non-equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. Wiley-Interscience.

ODUM, H. T. ; ODUM, E. C. (1976). *Energy Basis for Man and Nature*. NY: Mc Graw Hill.

OFFICE FOR OFFICIAL PUBLICATIONS OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2001): *Economy-wide material flow accounts and derived indicators*. A methodological guide, Luxembourg; , ISBN 92-894-0459-0, © European Communities, 2001

PASSERINI, E. (1994). *The Curve of the Future: Food-Trees, Solar Cars, War-Math, the Fun Economy, and Other Knowledge Essential for Sustainable Global Future*. A One-Minute Hitch-Hickers Guide to the Planet Earth. 2. ed. BookMasters. 293p.

PAYER, H.; TURETSCHKE, K. (1991). *Indikatoren für die Materialintensität der österreichischen Wirtschaft*; Schriftenreihe soziale Ökologie, Band 14, IFF-Interuniversitäres Institut für interdisziplinäre Forschung und Fortbildung, Wien, Austria, 55p.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. (1984) - *A nova aliança: a metamorfose da ciência*. Brasília, D.F: Ed. Universidade de Brasília.

SCHÜTZ, Ch. (1980). Entropie, *in Natur*, aug., p.123 - 131.

SOCOLOW, R. C. et al. (1994): *Industrial Ecology and Global Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

UNESCO, (1993). *The LCA sourcebook: a European business guide to life-cycle assessment*, London, 112 p., illus. ISBN ISSN: 0-9521904-0-0

VIEIRA, A. L., (2004). *Análise do Ciclo de Vida - Uma avaliação social e econômica da reciclagem das latas de alumínio na cidade de Belém*. (Tese de Doutorado/UFPB/NAEA).

WRIGHT, D.H. (1990). Human impacts on energy through ecosystems, and implications for species endangerment. *Ambio*, v.19, n. 4, p. 189 - 194.