

SISTEMA ECOLÓGICO E SISTEMA DE PRODUÇÃO: A ABORDAGEM INTEGRADA DA ECOLOGIA INDUSTRIAL

Biagio F. Giannetti, Silvia H. Bonilla, Cecília M.V.B. Almeida

Laboratório de Físico-Química Teórica e Aplicada - LaFTA
Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Paulista
Rua Dr. Bacelar 1212, Mirandópolis, São Paulo - SP, CEP 04026-002

Resumo

Um modelo simples de um sistema produtivo é formalizado para auxiliar na discussão da estratégia empregada pelos sistemas naturais diante da escassez de recursos. São discutidos os sistemas de produção fazendo um paralelo com os sistemas ecológicos. Finalmente, sugere-se que um melhor entendimento dos processos de otimização e de sustentabilidade dos sistemas da ecossfera podem servir de modelo para aprimorar os sistemas de produção. Apresenta-se uma abordagem que, utilizando a analogia entre os sistemas produtivos e os naturais, pode oferecer sustentação teórica para modelos organização da produção amigável ao meio ambiente.

Palavras-chave: Auto-organização, sistema ecológico, sistema produtivo, competitividade, recursos escassos, ecologia industrial.

Introdução

O conflito entre a dinâmica da economia e, conseqüentemente, dos sistemas de produção atuais com a ecologia é devido ao antagonismo que há entre a realidade ecológica e a realidade sociocultural (Leipert, L., 1999).

Visto que os sistemas produtivos são sistemas abertos (trocam matéria e energia com as vizinhanças) necessariamente estão inseridos no sistema ecológico da Terra e, portanto, dependem dos princípios que regem o funcionamento dos sistemas ecológicos. Desta forma, os sistemas econômicos e de produção não podem impor a sua lógica construída socialmente aos sistemas ecológicos.

A abordagem do sistema econômico como um sistema aberto não tem sido empregada pela economia neoclássica, que pelo contrário - numa visão pré-analítica - considera a economia como um sistema isolado. A imagem fundamental do processo produtivo e de consumo é dada por um fluxo circular da fábrica ao comércio e vice-versa, sem vias de entrada nem de saída. Esta imagem é em termos monetários, o que fisicamente é um absurdo, um moto perpetuo. Neste modelo, não se considera que o processo econômico ocorra por um processo entrópico unidirecional e irreversível. Enfim, o sistema emprega energia e matéria sem obedecer os princípios termodinâmicos.

Duzentos anos de industrialização, baseada no ponto de vista de que os recursos são essencialmente ilimitados, graças ao progresso técnico e à substituição sem limite, resultam numa profunda crise ecológica. Em contraste a esta situação, quando comparadas escala de

tempo e resultados obtidos pelos sistemas ecológicos, estão os milhares de anos de evolução da biosfera que tem assegurado a estabilidade de todo o sistema. Diante destes fatos, pode-se intuir que muitas das soluções de otimização e de sustentação das cadeias produtivas são encontrados na natureza.

Neste contexto o trabalho apresenta e faz reflexões sobre a teoria da auto-organização dos sistemas, apresentando uma abordagem integradora dos sistemas ecológicos e de produção. Esta abordagem, que caracteriza a Ecologia Industrial é uma importante ferramenta para o planejamento e a adequação de um modelo de produção amigável ao meio ambiente.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma:

- Na seção **Estratégias Competitivas: Sistemas Ecológicos e de Produção**, descreve-se como se organizam os sistemas naturais e os sistemas feitos pelo homem com relação à disponibilidade de recursos.
- Na seção **Formalização da Teoria da Auto-Organização**, é apresentada a teoria desenvolvida por Odum (Odum, H.T., 1983) e desenvolvido um modelo de um sistema simples de produção.
- Na seção **Implicações da Teoria da Auto-Organização**, discute-se as diferentes formas de organização dos sistemas produtivos correlacionando a organização dos sistemas ecológicos como modelo otimizado e sustentável da produção.
- Na seção **Definições e Conceitos da Ecologia Industrial** procurou-se apresentar algumas das principais características da nova abordagem, dando ênfase à organização com base no estudo da termodinâmica e na teoria de sistemas.
- Na última seção apresenta-se um comentário final sobre os assuntos discutidos neste capítulo.

Estratégias Competitivas: Sistemas Ecológicos e de Produção

Quando se trata de competição e de sobrevivência dos negócios, os sistemas produtivos se comportam de forma muito semelhante aos seres vivos. O palco das atividades empresariais é o mercado, segundo a visão convencional, enquanto que os seres vivos agem nos ecossistemas. Em ambos casos os sistemas se organizam de forma a prevalecer sobre seus competidores. Um fator importante que determina o tipo de estratégia a ser adotada é a disponibilidade de recursos.

Competição sem limitação de recursos

Na economia convencional chega-se a pensar que "quando o mercado funciona mal é porque ele está precisando de mais mercado" (frase atribuída a Rober Lucas Jr, Prêmio Nobel de Economia - 1995). Esta forma de pensar e de agir faz parte de um modelo de crescimento que está baseado em valores socioculturais que desconsideram as limitações dos sistemas (Leipert, L., 1999).

Nos sistemas naturais, estáveis, uma alta taxa de crescimento de uma espécie é um fator que pode determinar uma importante vantagem competitiva com relação a outra espécie. Esta estratégia somente pode ser empregada quando o ecossistema não possui restrições de

recursos. Nestas situações, quando a demanda de alimento é pequena, comparada à sua disponibilidade, o crescimento das populações de plantas ou de animais é descrito nos primeiros estágios por um modelo exponencial (Odum, H.T. e Odum, E.C., 1994).

Na história recente da humanidade, a população tem crescido exponencialmente e este tipo de crescimento ainda persiste em alguns países. A base material das indústrias também pode crescer de forma acelerada, por exemplo, indústrias de extração de petróleo e de mineração crescem exponencialmente quando novas jazidas são descobertas. A economia das nações também pode apresentar um crescimento acelerado. Um exemplo claro disto são os Estados Unidos com uma economia que cresceu exponencialmente, entre a metade do século dezanove até metade do século vinte, empregando a grande abundância de recursos naturais e a descoberta dos combustíveis fósseis (Odum, H.T. e Odum, E.C., 1994). No Brasil o crescimento acelerado da economia ocorreu entre 1950 e 1980 e, como no caso dos Estados Unidos, foi principalmente sustentado às custas de recursos naturais. Vale realçar que no Brasil do "milagre econômico" (período compreendido entre 1969 e 1973) e durante boa parte dos anos 80, a classe média se expandiu e se desenvolveu sem que houvesse verdadeira competição dentro dela quanto ao uso dos recursos que o mercado ou o Estado lhe ofereciam para a melhoria do seu poder aquisitivo e do seu bem-estar material (Santos, M., 1999). Desta forma, a população (especialmente urbana) apresentou o comportamento esperado em sistemas onde não há limitação de recursos: um crescimento contínuo, primeiro nas grandes cidades, depois nas cidades menores e no campo modernizado. Quando a crise do petróleo estancou o fluxo de capitais externos, em 73, o modelo econômico começou a ruir, deixando uma dívida externa de mais de 100 bilhões de dólares, que até hoje pesa no caixa nacional. Este fato, penosamente vivido pela sociedade brasileira, evidencia a importância de compreender como se organizam os sistemas diante da escassez de recursos.

Competição com recursos escassos

Lotka (1922) teorizou sobre a dependência que há entre a possibilidade de desenvolvimento e evolução de sistemas e a quantidade de energia disponível. O autor formalizou o Princípio da Máxima Potência: "a seleção natural operará de modo a incrementar a massa total do sistema orgânico, a velocidade de circulação de matéria e o fluxo de energia total que percorre o sistema, resultando deste processo um resíduo inutilizado de matéria e de energia disponível" (Tiezzi, E. e Marchettini, N., 1999). Este princípio é observado no caso de abundância de recursos com pouca competição.

No caso de recursos escassos o sistema organiza-se de modo a poder usufruir melhor da energia e da matéria à disposição. A estratégia é diversificar. Quando maior o grau de diversificação o sistema torna-se mais flexível e, portanto, mais apto a responder com eficácia às mudanças do meio. Dessa forma, no regime de escassez de recursos, a vantagem competitiva é dos sistemas mais eficientes. Os sistemas mais eficientes são os que possuem a melhor organização da atividade dissipadora: a menor produção de entropia específica (entropia por unidade de massa) é o critério de escolha entre os sistemas em competição (Tiezzi, E. e Marchettini, N., 1999).

Aqui se faz necessário diferenciar, nos sistemas ecológicos, a competição entre indivíduos da mesma espécie (competição intra espécies) e a competição entre espécies (competição inter espécies) (López-Castillo, A., 1995). A competição (adaptação) intra espécies tem como principal componente a diferenciação da constituição genética dos indivíduos que compõem a espécie. Na competição inter espécies (Darwin, C., 1988), as características do indivíduo determinadas por seus genes e pelas condições do ambiente desempenham um papel fundamental na competição. Na evolução dos sistemas ecológicos os processos de intra

competição (adaptação) devem ter ocorrido de forma mais rápida que os processos de inter competição (seleção natural) (López-Castillo, A., 1995).

Lotka (1922) afirma que a máxima potência de saída é o critério de sobrevivência para os sistemas. A sobrevivência do mais adaptado de Darwin (Darwin, C., 1988) está ligada à disponibilidade de recursos e à capacidade de empregar a energia por unidade de tempo (Tiezzi, E. e Marchettini, N., 1999). Vale a pena ressaltar que este Princípio da Máxima Potência se aplica a todos os sistemas naturais e da economia humana. Os sistemas de produção possuem uma dinâmica de competição interna e externa semelhante aos dos sistemas ecológicos.

Formalização da Teoria da Auto-Organização

H.T. Odum desenvolveu a teoria da auto-organização (Odum, H.T. e Pinkerton, R.C., 1955) (Odum, H.T., 1983). A teoria desenvolvida por Odum aplica aos sistemas ambientais a teoria da estrutura dissipadora de Prigogine (Nicolis, G. e Prigogine, I., 1977) e do Princípio da Potência Máxima de Lotka (Lotka, A.J., 1922).

Para discutir mais claramente a teoria da auto-organização e suas implicações nos sistemas ecológicos será empregado um modelo de um sistema simples (Tiezzi, E. e Marchettini, N., 1999). O modelo apresentado é um resumo das partes importantes de um sistema e tem como objetivo evidenciar as possíveis estratégias de auto-organização sob uma óptica formal. Com esta finalidade será admitido um sistema aberto que troca energia com as vizinhanças e serão admitidos dois fluxos J_1 e J_2 (um de entrada e outro de saída, respectivamente), associados às forças X_1 e X_2 (Tiezzi, E. e Marchettini, N., 1999). Num exemplo físico, X poderia ser o gradiente de temperatura ou de potencial elétrico e o J correspondente - para os exemplos dados - seria o calor e a corrente. Num sistema ecológico o produto J_1X_1 poderia ser a potência de entrada (P_1) de alimento e J_2X_2 a potência de saída (P_2) de biomassa. De forma análoga, numa máquina P_1 poderia estar relacionada com a potência de consumo de matéria prima e P_2 com a potência de saída de produto.

Admitindo as duas forças (X_1 e X_2) e os dois fluxos (J_1 e J_2) é possível relacioná-los com o incremento de entropia (dS/dt):

$$T(dS/dt) = J_1X_1 + J_2X_2 = P_1 + P_2 \quad (1)$$

O produto da temperatura pela taxa de variação da entropia com relação ao tempo, $T(dS/dt)$, é a energia desperdiçada no processo.

Em condições próximas do equilíbrio ter-se-ia a seguinte relação linear entre as forças e os fluxos:

$$J_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2 \quad (2)$$

$$J_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2 \quad (3)$$

onde é válida a reciprocidade de Onsager com $L_{12} = L_{21}$, onde L_{ij} são coeficientes fenomenológicos diretos e L_{ji} são coeficientes fenomenológicos cruzados.

A partir destas relações lineares, que são somente válidas em condições próximas ao equilíbrio, e supondo o fluxo de saída nulo ($J_2 = 0$) podem-se definir os seguintes parâmetros:

$$f = X_2/X_1 = -L_{21}/L_{22} \quad (4)$$

$$\mu = J_1/X_1 = (L_{11}L_{22} - L_{12}L_{21})/L_{22} \quad (5)$$

No caso de forças de entrada e saída diferentes, f é a relação dimensional e μ é o quociente entre fluxo e a força de entrada, ambos para a condição de $J_2 = 0$.

Empregando a expressão linear de J_2 e admitindo a hipótese de $X_1 = 0$ (ausência de uma força de entrada), define-se o parâmetro c :

$$c = L_{22} = J_2/X_2 \quad (6)$$

Substituindo as três definições de f , μ e c nas equações que definem J_1 e J_2 , resulta:

$$J_1 = (\mu + cf^2)X_1 - cfX_2 \quad (7)$$

$$J_2 = -cfX_1 + cX_2 \quad (8)$$

O termo $\mu + cf^2$ é igual a L_{11} , e pelas definições de μ , c e f , chega-se a:

$$L_{11} = \mu + L_{12}L_{21}/L_{22} = \mu + (cf)^2/c = \mu + cf^2 \quad (9)$$

Para a condição que o sistema não se encontra longe do equilíbrio termodinâmico, condição na qual a equação pode ser usada como uma primeira aproximação e os valores de μ , c e f são constantes, define-se o parâmetro adimensional R :

$$R = X_2/fX_1 \quad (10)$$

Considerando a expressão de J_2 ($J_2 = -cfX_1 + cX_2$), a potência de saída P_2 (onde $P_2 = -J_2X_2$, o sinal indica que o referencial adotado está no sistema) pode ser escrita da seguinte forma:

$$P_2 = -J_2X_2 = (cfX_1 - cX_2)X_2 \quad (11)$$

Empregando, nesta última expressão, a definição de R, obtém-se a potência de saída em função da força de entrada X_1 :

$$P_2 = (cfX_1 - cfRX_1)fRX_1 = cf^2X_1^2R(1-R) \quad (12)$$

O máximo de P_2 com relação a R é obtido quando:

$$dP^2/dR = cf^2X_1^2(1-2R) = 0 \quad (13)$$

A solução desta equação resulta em $R = 1/2$. Isto significa que em um processo que ocorre segundo as considerações feitas, obtém-se a máxima potência de saída quando o quociente entre a força de saída e entrada, após ter convertido as unidades das forças nas mesmas unidades de medida, é igual a meio. Visto que $P_2 = cf^2X_1^2R(1-R)$, na condição de potência máxima, $R = 1/2$, resulta:

$$P_2 = cf^2X_1^2/4 \quad (14)$$

A eficiência η em função de R é dada por:

$$\eta = P_2/P_1 = \frac{R}{1 + \frac{\mu}{cf^2(1-R)}} \quad (15)$$

para o caso de máxima potência de saída ($R = 1/2$)

$$\eta(P_2, \text{máx}) = P_2(\text{máx})/P_1 = \frac{1}{2\left(1 + \frac{2\mu}{cf^2}\right)} \quad (16)$$

Analisando a expressão, percebe-se que o valor máximo da eficiência é obtido quando a relação $2\mu/cf^2$ é igual a zero (consequentemente, $\mu = 0$).

O gráfico da figura 1 mostra a simulação das equações (12) e (15) (para $\mu = 0$).

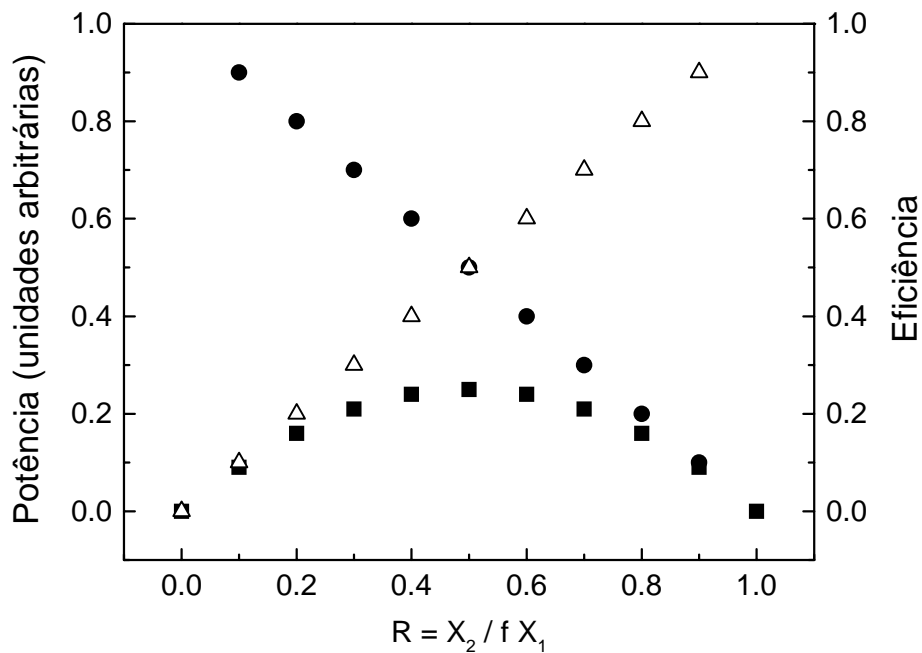


Fig. 1. Variação da potência e da eficiência do sistema aberto, em condições próximas ao equilíbrio, em função da relação entre as forças X_1 e X_2 , admitindo-se X_1 , c e f iguais a 1, empregando-se as equações (11), (12) e (15) do texto: (λ) P1, potência de entrada e (ν) P2, potência de saída e (Δ) eficiência para $\mu=0$.

Implicações da Teoria da Auto-Organização

O modelo apresentado permite fazer três observações: (a) para potência máxima de saída P_2 , o valor da eficiência atingido pelo sistema é de 50 % (Fig. 1), (b) o valor da eficiência diminui com o incremento de P_1 . O incremento da potência de entrada, no intervalo de $\frac{1}{2} < R < 1$, faz com que a potência de saída seja maior, porém com perda da eficiência e (c) aumentando-se o valor de P_1 , no intervalo entre $0 < R < \frac{1}{2}$, observa-se tanto a diminuição tanto da potência de saída como da eficiência. Estas constatações são reunidas na lei chamada "lei do tempo regulador de velocidade": "o sistema sacrifica a eficiência a favor da saída máxima de potência". Esta conclusão tem-se mostrado válida em muitos casos mecânicos, químicos, físicos e biológicos (Tiezzi, E. e Marchettini, N., 1999).

Desta forma, a organização e a competição dos sistemas naturais podem ocorrer sob diferentes estratégias. Quando os recursos são abundantes o crescimento da biomassa ocorre de forma acelerada (exponencialmente), para isto a potência aumenta às custas da eficiência (Princípio da Máxima Potência). Nesta estratégia os sistemas competem pelo domínio do habitat.

Pode-se utilizar o Princípio da Máxima Potência para oferecer uma nova abordagem com sustentação teórica para descrever sistemas de produção. As empresas apresentam o mesmo comportamento que os sistemas naturais em situações com grande disponibilidade de recursos: aumentam a sua produtividade sem se preocupar com o desperdício de matéria e de energia. Nesta situação as empresas ocupam o maior mercado possível baseado na alta produção, fornecendo seus produtos a novos mercados antes de seus concorrentes. Porém, o fluxo de desperdícios (matéria e energia) é liberado em formas pouco amigáveis ao meio

ambiente. Isto acaba modificando as propriedades físico-químicas do meio ambiente e fazendo com que se perca a estabilidade do sistema.

Antes da globalização as nações ricas em recursos naturais e com meios (capital, mão de obra e tecnologia) possuíam vantagens competitivas importantes. A globalização da economia permite que as empresas possam explorar recursos naturais de outras nações com maior facilidade. Erroneamente, pode-se pensar que com a globalização a questão dos recursos naturais fica num plano secundário passando para um plano de maior importância variáveis como a disponibilidade de recursos da economia humana (capital, mão de obra e serviços). Atualmente, especialmente, as grandes organizações produtivas percebem que a sustentação da competitividade está sendo ameaçada pela desestabilização da biosfera. Um exemplo disto é a constatação da perda da qualidade da água no planeta num nível acelerado. Levando em consideração que a água faz parte de todos os processos produtivos, sendo em alguns processos industriais a principal matéria prima, pode-se afirmar que toda a economia está sob ameaça. Uma resposta dada pelos estados, diante desta situação de degradação acelerada do meio-ambiente, é o endurecimento da legislação ambiental. A legislação ambiental tem sido empregada com vários objetivos: (a) responder às pressões da sociedade civil, (b) evitar a perda de recursos do estado na remediação do meio ambiente, (c) poupar o desperdício de recursos estratégicos e (d) mais recentemente, proteger setores econômicos (barreiras legais verdes). Quando se leva em conta estes fatos, na maioria dos casos, nota-se que a ação de remediação e preservação do meio ambiente tem surgido por uma questão de necessidade (processo reativo, ação e reação) e não de uma forma planejada (prever em vez de remediar). Com a aceleração do agravamento das condições do meio ambiente e com a lenta reação da sociedade, a questão não pode ser conduzida somente de forma reativa, pois corre-se o risco de uma crise de proporções mundiais.

Quando os recursos são escassos, o enunciado do Princípio da Máxima Potência justifica o uso de retro-alimentação. O sistema se organiza de forma hierárquica de modo que os componentes de um determinado nível de hierarquia mais alto fazem a retro-alimentação positiva naquele componente de um nível de hierarquia mais baixo. Na engenharia este tipo de procedimento é chamado de otimização do processo: evitar perdas e reaproveitar ao máximo possível, com a retro-alimentação, matérias primas e energia. Mais especificamente, na engenharia de produção, a produção enxuta (Womack, J.P., 1991) e produção mais limpa (Furtado, J.S., 1997) empregam estes conceitos.

A reorganização nos sistemas ecológicos não ocorre somente internamente (intra organização), os sistemas podem formar organizações entre sistemas (inter organização). Um exemplo de inter organização são as cadeias tróficas da natureza. A natureza encontrou formas de diminuir o desperdício de matéria e de energia baseados na "colaboração" dos componentes do sistema (intra organização) ou entre diferentes sub-sistemas que compõem o sistema ecológico (inter organização). A mudança de estratégia de competitiva excludente para colaborativa permite que os desperdícios sejam diminuídos. No processo evolutivo os sistemas mais aptos (mais flexíveis às mudanças do ambiente e de estratégia colaborativa) predominaram.

Definições e Conceitos da Ecologia Industrial

“De forma quase teológica, Ecologia Industrial é o meio pelo qual a humanidade pode, deliberada e racionalmente, atingir e manter o desenvolvimento sustentável, com contínua evolução econômica, cultural e tecnológica. O conceito consiste de uma visão sistêmica da atividade econômica e suas inter-relações com os sistemas fundamentais biológicos, químicos e físicos, com a finalidade de estabelecer e manter a espécie humana em um nível que pode ser sustentado indefinidamente.”

TE Graedel and BR Allenby, “Industrial Ecology”, Prentice Hall, 1995.

A Ecologia Industrial é uma abordagem que pretende oferecer um quadro conceitual para interpretar e adaptar a compreensão do sistema natural e aplicar esta compreensão aos sistemas industriais de forma a alcançar um padrão de industrialização que seja não só mais eficiente, mas também intrinsecamente ajustado às tolerâncias e características do sistema natural (Tibbs, H., 1992). O sistema industrial, apresenta-se ainda em grande parte na forma linear, em que recursos são retirados do meio ambiente e resíduos são devolvidos de forma altamente degradada no final do processo. Como mostrado, este sistema linear pode somente atingir um valor potência máxima com uma eficiência de 50%, independente do aumento da entrada de recursos. Quando estes são escassos, o Princípio da Máxima Potência justifica o uso de retro-alimentação. O sistema se organiza de forma hierárquica de modo que componentes de um nível de hierarquia mais alto retro-alimentam positivamente os componentes de um nível de hierarquia mais baixo. Ocorre a otimização do processo: minimizam-se as perdas com o máximo reaproveitamento de matérias primas e energia. Como exemplo citou-se a a produção enxuta (Womack, J.P., 1991) e a produção mais limpa (Furtado, J.S., 1997). Entretanto, outra estratégia dos sistemas naturais para manter a estabilidade é a diversificação. Quando maior o grau de diversificação o sistema torna-se mais flexível e, portanto, mais apto a responder com eficácia às mudanças do meio. Desta forma, a Ecologia Industrial visa a formação de organizações para diminuir o desperdício de matéria e de energia baseados na "colaboração" dos componentes do sistema (intra organização) ou entre diferentes sub-sistemas que compõem o sistema industrial inserido no sistema ecológico (inter organização). A mudança de estratégia que passa a considerar a colaboração entre empresas de diferentes setores faz com que os desperdícios sejam diminuídos. Com base nos processos observados na natureza, postula-se que o processo evolutivo dos sistemas industriais mais flexíveis às mudanças do ambiente e de estratégia colaborativa irá predominar. Esta abordagem implica em (1) aplicar a teoria dos sistemas e a termodinâmica aos sistemas industriais, (2) definir os limites do sistema incorporando o sistema natural e (3) otimizar o sistema. Neste contexto, o sistema industrial é planejado e deve operar como um sistema biológico interdependente do sistema natural. Para isto, o sistema industrial:

- deve operar levando em conta os limites da capacidade de carga do planeta e da região em que está inserido,
- deve operar levando em conta os sistemas vizinhos, com uma visão integrada de todos os componentes do sistema em que está inserido e seus relacionamentos com a biosfera.
- refletir, no projeto e operação, as atividades dos sistemas biológicos,

- otimizar o ciclo de materiais de forma a aproximar-se de um ciclo fechado,
- utilizar fontes de energia renováveis
- e conservar materiais não renováveis.

Pela ecologia industrial, o sistema industrial é considerado um sub-sistema da biosfera, isto é, uma organização particular de fluxos de matéria, energia e informação. A evolução do sistema industrial é concebida como uma dinâmica compatível com o funcionamento de outros ecossistemas. Parte-se do princípio de que é possível organizar todo o fluxo de matéria e de energia, que circula no sistema industrial, de maneira a torná-lo um circuito quase inteiramente fechado. “Da mesma forma que as plantas sintetizam as substâncias que alimentam os animais herbívoros, que alimentam os carnívoros, cujos dejetos alimentam outros organismos”, as empresas poderiam utilizar seus resíduos como matéria-prima e reutilizar os produtos depois de usados, criando um novo ciclo de vida para os materiais descartados (Erkman, S., 1997).

A Ecologia Industrial é o estudo das inter-relações físicas, químicas e biológicas do sistema industrial inserido no meio ambiente. Neste contexto, uma abordagem sistêmica é necessária para visualizar as conexões entre o sistema antropológico, o biológico e o ambiente. Desta forma, pode-se dizer que o principal objetivo da Ecologia Industrial é transformar o caráter linear do sistema industrial para um sistema cíclico, em que matérias primas, energia e resíduos sejam sempre reutilizados.

Ainda não há uma definição única, de aceitação generalizada, da Ecologia Industrial. Entretanto, as várias definições contêm pontos similares, apenas enfatizados diferentemente: Entre estes se pode citar:

- A visão sistêmica das interações entre os sistemas industriais e a biosfera
- acompanhamento dos fluxos de material e energia
- A redução da demanda por matérias primas, água e energia e da devolução de resíduos à natureza, com contribuição (trans)multidisciplinar
- A transformação dos processos lineares (ciclos abertos) em processos cíclicos, visando que os resíduos de um processo possam ser utilizados como matéria prima de outros.
- Um caminho para reduzir o impacto ambiental dos sistemas industriais
- Ênfase na integração das atividades industriais com o ambiente

A Ecologia Industrial visa reduzir a demanda por matérias primas, água e energia e a devolução de resíduos à natureza por meio da integração de processos ou indústrias, de forma que resíduos ou subprodutos de um processo possam servir de matéria prima de outro. A observação dos conceitos de Ecologia Industrial leva ao exame integrado das interações entre a indústria e o meio ambiente. O sistema industrial é considerado como produtor tanto de produtos como de resíduos (Giannetti et al, 2003a). Com esta abordagem, os limites de uma empresa se estendem até o meio ambiente, exigindo que produtos e resíduos sejam desenvolvidos e discutidos entre diferentes empresas. O aspecto mais crítico deste novo conceito é, portanto, a implementação da cooperação efetiva entre empresas com a formação de uma Eco-rede (veja possíveis interações na Figura 2).

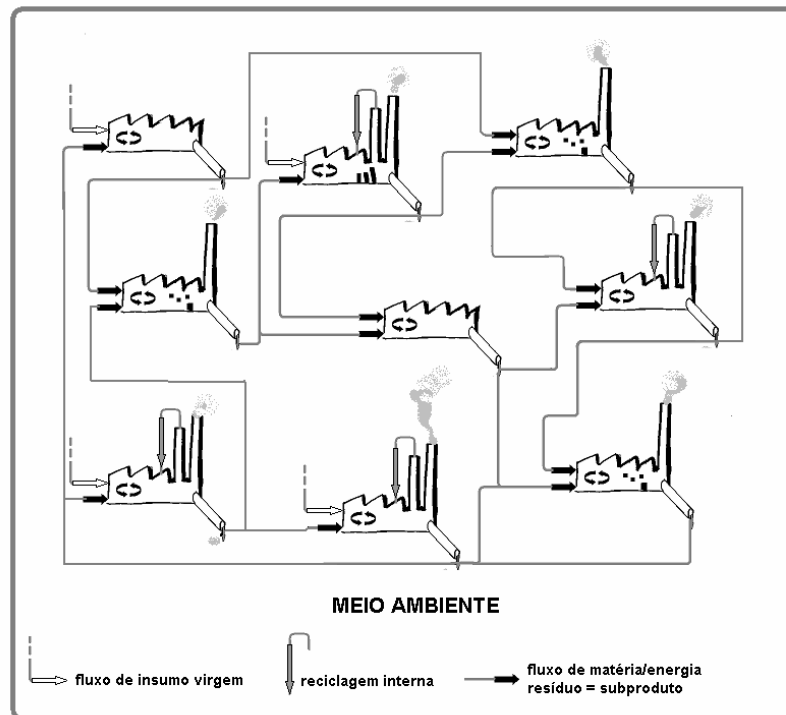


Figura 2. Representação de uma Eco-rede, mostrando a otimização dos fluxos de materiais/energia devida à formação da rede. Os fluxos de produto não estão representados na figura, mas somente aqueles que caracterizam uma eco-rede.

Considera-se que, por mais que se aperfeiçoem os processos de combate à poluição, sempre haverá necessidade de matéria prima e sempre haverá geração de resíduo ou subprodutos. A integração adequada de diferentes empresas, de forma que resíduos e subprodutos gerados possam servir de matérias primas para outras empresas, reduziria a devolução de materiais à natureza. Da mesma forma, a utilização de resíduos como matéria prima reduziria a demanda por novos recursos naturais.

A pretensão é desenvolver, o quanto possível, ciclos fechados de produção, distribuição, consumo evitando a devolução de resíduos. Além da redução da demanda e da restituição ao mínimo inevitável, os resíduos que não pudessem ser suprimidos no fim de todo o ciclo, seriam antes do descarte tornados o mais compatíveis possível com o ambiente. A idéia geral é aproveitar ao máximo os recursos naturais inevitavelmente necessários, reduzindo a um mínimo a pressão sobre a natureza, tanto do lado da demanda quanto do da restituição. O modelo ideal de referência é o sistema natural, com seus ciclos fechados, nos quais não cabem os conceitos de resíduos e matéria prima. Os materiais e a energia, em uso ou incorporados no produto, são vistos como elementos de um fluxo que, temporariamente, assumem uma determinada conformação que pode ser transformada posteriormente.

Na Ecologia Industrial o objeto de estudo é a inter-relação entre empresas, entre seus produtos e processos em escala local, regional e global. Mas, mais importante, é o estudo das interações entre os sistemas industrial e ecológico e, conseqüentemente, os efeitos ambientais que estas empresas causam tanto nos componentes bióticos como nos abióticos da ecosfera.

A sociedade humana tem soluções semelhantes nos sistemas produtivos. Cadeias e redes de produção se organizam espontaneamente concentradas geograficamente aumentando suas

vantagens competitivas (Giannetti et al, 2003b).

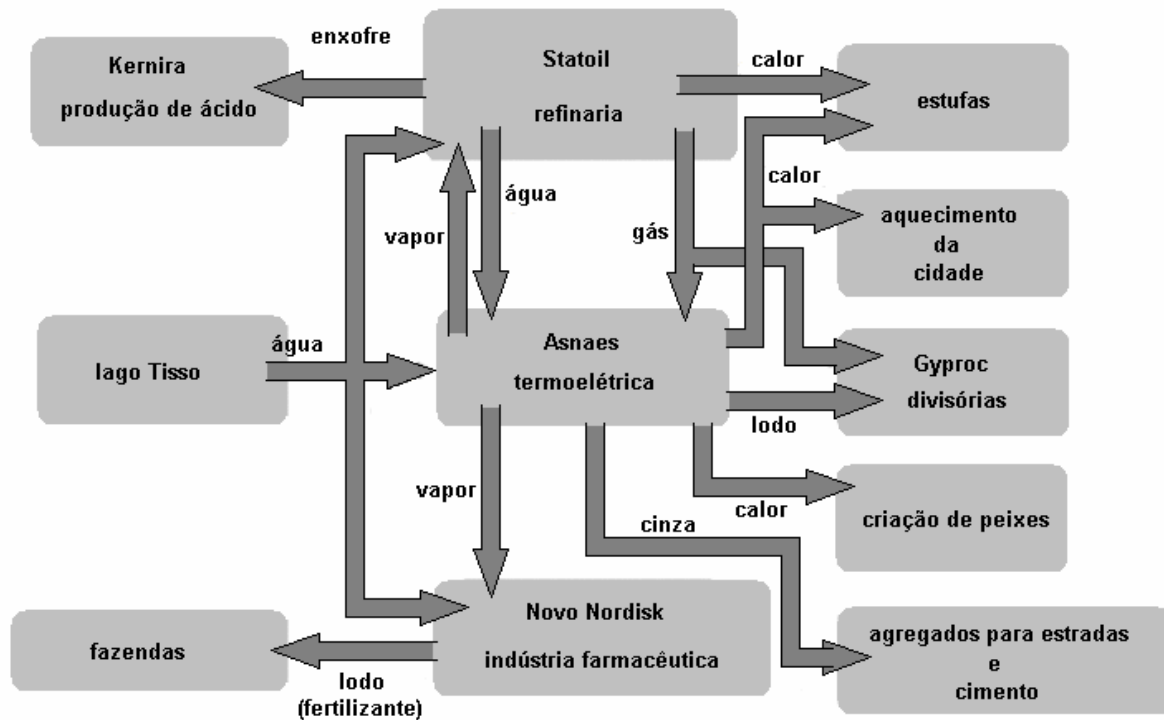


Fig. 3. O exemplo clássico e mais conhecido da Ecologia Industrial é o parque industrial de Kalundborg na Dinamarca.

Um exemplo muito citado na literatura da organização espontânea de empresas é o parque industrial de Kalundborg. As empresas do parque de Kalundborg organizaram-se espontaneamente, especialmente devido à proximidade entre elas (Fig. 3). São altamente integradas e utilizam resíduos de algumas indústrias como fonte de energia e matéria prima para outras. O processo de simbiose não foi resultado de um planejamento, mas do desenvolvimento gradual da cooperação entre as empresas da região e a cidade de Kalundborg. Esta cooperação resultou na viabilidade de algumas das empresas devido à presença de outras levando em consideração a demanda da sociedade local.

Os participantes vão desde grandes empresas como a Asnæsværket e a Refinaria Statoil que são as maiores empresas do país em sua área. A Novo Nordisk é uma indústria de biotecnologia com 45% do mercado mundial de insulina e 50% do de enzimas. Já a Gyproc, fabricante de divisórias, é uma empresa de porte médio que emprega 175 trabalhadores. Além da interação entre empresas, o reaproveitamento de material e energia também favorece a sociedade local. O lodo gerado no tratamento de efluentes é utilizado como fertilizante pelas fazendas das vizinhanças e na criação de peixes, a cinza gerada pela termoelétrica é utilizada para pavimentação de estradas e os fluxos de calor são utilizados para manutenção de estufas e para o aquecimento da cidade.

Um arranjo deste tipo tem algumas características:

- As empresas participantes são diferentes, apesar de compartilharem fluxos
- Há um acordo comercial entre as empresas

- Os benefícios ecológicos são acompanhados de benefícios econômicos
- A cooperação é voluntária, apesar da participação das autoridades municipais
- As empresas participantes estão fisicamente próximas

Este tipo de agrupamento de inter sistemas de produção altamente competitivos foram identificados e denominados por Porter (1990) de "cluster". Porter salienta que aproximadamente metade da exportação total dos países europeus provem destes sistemas de organização (Porter, M.E., 1990). A constatação do trabalho de Porter (1990) é que não é suficiente ter tecnologia e recursos naturais para fabricar um determinado produto e ser competitivo no mercado internacional, se não existir uma cadeia de produção organizada. Nações que não conseguem ter inter organização dos sistemas de produção eficiente ("cluster") estarão em desvantagem competitiva e se limitarão a ser exportadores de "commodities" ou de produtos naturais. Nota-se que há uma correlação muito forte entre os sistemas ecológicos e os sistemas de produção. Assim sendo, o estudo da organização de sistemas ecológicos, com base na Ecologia Industrial pode servir para construir modelos otimizados e sustentáveis de produção (com maior eficiência, menor desperdício e em benéficos ao meio ambiente).

Comentários Finais

Sistemas naturais e de produção, em todas as escalas, se organizam obedecendo o Princípio da Potência Máxima. Sugere-se que um melhor entendimento dos processos de otimização e de sustentabilidade dos sistemas da ecossfera pode servir para aprimorar os sistemas de produção. A Ecologia Industrial oferece a sustentação teórica para este fim. Com base na teoria de sistemas e na termodinâmica, esta nova abordagem contribui para que se atinja o desenvolvimento sustentável nas escalas locais, regionais e globais. Sob esta perspectiva, a Ecologia Industrial é mais que uma descrição das possíveis ligações entre os elementos de um sistema. Um estudo com base nos princípios da Ecologia Industrial pode servir de guia para a evolução dos sistemas industriais para atingir um estado de sustentabilidade de longo prazo. A Ecologia Industrial tem o objetivo de tornar o sistema produtivo ambientalmente benigno e sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP (processo No 95/09333-2) e da Vice-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UNIP.

Referências bibliográficas

- Darwin, C., (1988). "The origin of species", Londres, Penguin.
- Erkman, S., (1997), "Industrial ecology: an historical view", J. Cleaner Prod., Vol.5, pg. 1-10.
- Furtado, J.S., 1997. "Comunicação ambiental - Produção Limpa", Boletim Fundação Vanzolini, São Paulo, (5), n.30, julho/agosto, p. 18.
- Giannetti, B. F., Almeida, C.M.V.B. e Bonilla S. H., 2003a. "Implementação de Eco-Tecnologias Rumo à Ecologia Industrial", RAE-eletrônica, volume 2, número 1, jan-jun.
- Giannetti, B. F., Almeida, C.M.V.B. e Bonilla S. H., 2003b. "Developing eco-technologies: a

possibility to minimize environmental impact in Southern Brazil”, *Journal of Cleaner Production*, no prelo.

Leipert, L., (1999). "L'economia e il suo rapporto com la natura". In: Tiezzi, E., Marchettini, N., "Che cos'è lo sviluppo sostenibile? - Le basi scientifiche della sostenibilità e i guasti del pensiero único", Roma, Donzelli Editore, p. 17.

López-Castillo, A., (1995). "Possible applications and speculations on theory of evolution", *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, (67), supl.3, p. 347-353.

Lotka, A.J., (1922). "A contribution to the energetics of evolution". In: "Proceedings of National Academic of Sciences", (8), p. 147-155.

Nicolis, G. e Prigogine, I., (1977). "Self-organization in non-equilibrium systems", Nova Iorque, Wiley.

Odum, H.T. e Odum, E.C., (1994). "Computer minimodels and simulation exercises for science and social science", Gainesville, University of Florida, p.19.

Odum, H.T. e Pinkerton, R.C., (1955). "Time speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems", *American Scientist*, (43), p. 331-343.

Odum, H.T., (1983). "Maximum power and efficiency: a rebuttal", *Ecological Modelling*, (20), p. 71-82.

Porter, M.E., (1990). "The competitive advantage of nations", Nova Iorque, Free Press.

Santos, M., (1999). "Classe média passa por metamorfose", *Jornal do Comercio*, Recife, edição do dia 17 de outubro (seção Brasil).

Tibbs, H. (1992), "Industrial Ecology, An Environmental Agenda for Industry", *Whole Earth Review*, 77, 4-19.

Tiezzi, E. e Marchettini, N., (1999). "L'economia e il suo rapporto com la natura". "Che cos'è lo sviluppo sostenibile? - Le basi scientifiche della sostenibilità e i guasti del pensiero único", Roma, Donzelli Editore, p. 93-97.

Womack, J.P., (1991). "The machine that changed the world", Nova Iorque, Harper Collins.