

# Engenharia Sistémica na Engenharia Ambiental

Hermínio Duarte-Ramos  
Dr. Eng. Elect. (FCT/UNL)  
Grupo de Engenharia Sistémica (DEE)

## 1. Introdução

Nos últimos anos têm sido desenvolvidas diversas metodologias e instrumentos de análise dos sistemas complexos, inclusivamente de larga escala, dentro do âmbito científico da Sistémica e com ênfase tecnológico na Engenharia Sistémica. Essa inovação metodológica e instrumental permite tratar a complexidade dos sistemas ecológicos com crescente rigor. Por isso, propõe-se que a Engenharia de Ambiente considere os mecanismos sistémicos da realidade concreta pela teorização e tecnicidade da realidade conceptual inerente à Sistémica Ecológica.

Esta proposta constituiu a tese de uma comunicação apresentada em Lisboa no 4º Encontro Nacional sobre Qualidade do Ambiente, no dia 6 de Abril. Consta no volume I das respectivas actas com o título "A Sistémica Ecológica na Engenharia dos Sistemas Ambientais".

Mas a apresentação ao vivo, suscitou alguma discussão, que justifica aqui algumas breves palavras de complemento, ao mesmo tempo que se prossegue o objectivo de difundir o conhecimento e significado da Engenharia Sistémica no mundo moderno, particularmente na área do ambiente. Tudo isto porque estamos convencidos da dualidade intrínseca da realidade, que objectivamos em realidade concreta e conceptual [1], de maneira por ventura mais científica mas muito menos poética que o dizer de Fernando Pessoa [2]: "Ninguém supôs que ao pé de mim estivesse sempre outro, que afinal era eu".

## 2. Ecossistema

Vem de 1935 o conceito de **ecossistema**, impresso por Transley para

referir o conjunto "biocenose + biótopo", onde o primeiro termo designa a população de espécies animais e vegetais que vive no meio traduzido pelo segundo termo (Fig. 1).

Hoje este conceito é vulgar, encontrando-se definido e desenvolvido desde a educação secundária no âmbito das ciências do 7º ano de escolaridade. Recordar-se aqui, no entanto, a título exemplificativo da estrutura dos sistemas.

los de entrada (exemplo: radiações solares), que originam modificações comportamentais dos organismos vivos (exemplo: plancton) e do próprio meio interno do ecossistema (exemplo: oceanos), donde resultam influências mútuas (entre biocenose e biótopo) que determinam um certo efeito (exemplo: regime termodinâmico) com acção sobre o meio externo (exemplo: clima planetário).

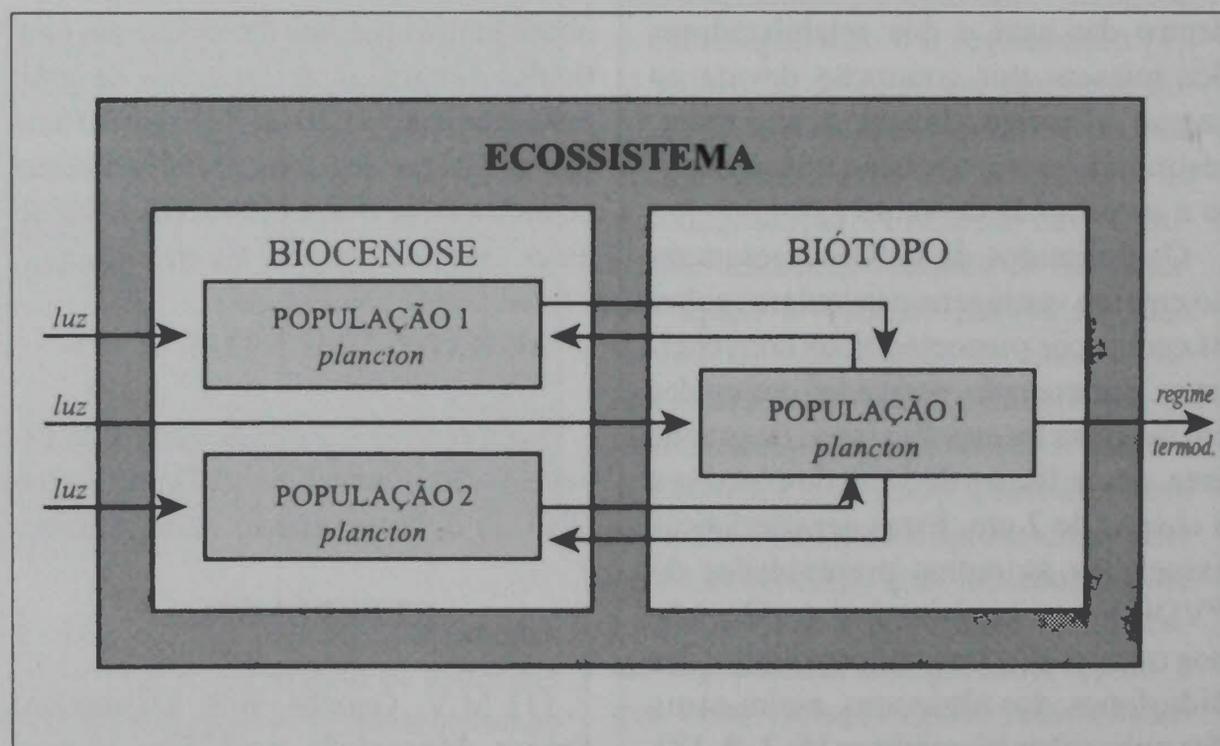


Fig. 1- Esquema geral de ecossistema (exemplo do efeito climático pela luz solar incidente nos oceanos).

Sob o ponto de vista sistémico, o sinal + indicado na descrição anterior significa uma rede de interações entre espécies (comportamento estrutural do ecossistema quanto ao subsistema biocenose, como seja, a competição, controlo demográfico, etc) e entre as populações e o meio fisico-químico (comportamento estrutural do ecossistema quanto a interacção do subsistema biocenose com o subsistema biótopo). As relações externas com o universo envolvente podem ser estímulo

Este modelo funcional, expurgado de particularidades naturalmente existentes, projecta-se aqui como exemplo do conceito sistémico, numa feição simplificadora da aparente complexidade da realidade concreta. Para uma análise quantitativa, que interessa à Engenharia de Ambiente, fica por fazer a caracterização dos respectivos atributos estruturais, tanto na representação das funções de transferência dos subsistemas, como no carácter dos sinais interactivos.

### 3. Ecologia e Sistémica

É claro que os ecossistemas são identificáveis em qualquer escala espacial, desde os microscópicos nichos ecológicos até aos sistemas de larga escala, inclusivamente à dimensão planetária.

A Ecologia selecciona, no conjunto de múltiplos componentes materiais da realidade concreta, os aspectos locais que interessam à sua formulação específica e efectua as análises pertinentes. Tal é o ponto de vista da **Ecologia de Sistemas**: aplicação das metodologias ecológicas aos respectivos ecossistemas,

como a Física, a Química ou a Biologia. Por sua vez, a Sistémica integra esta realidade conceptual nos seus próprios instrumentos, donde resulta uma nova conceptualidade para actuar tecnologicamente sobre a realidade concreta, por hipótese num primado de conservação da Natureza.

### 4. Características Sistémicas dos Ecossistemas

A Sistémica Ecológica orienta-se sobretudo pelos **mecanismos sistémicos** de "interconexão" dos componentes do

tação espacial dos sistemas (autonomia) mal se deixa recortar do meio externo, não só quanto ao percurso dos ciclos de operação, como também no que diz respeito à evolução diacrónica dos ecossistemas na sua deriva espiralada ao longo do eixo histórico (com origem, duração de vida e morte).

Este carácter complexo dos sistemas ecológicos deve-se à necessidade da respectiva sobrevivência ambiental exigir um certo grau de **diversidade**, que contemple uma apreciável heterogeneidade de espécies (diversidade específica), desde pequenas bactérias a grandes vertebrados (diversidade fisiológica), modos diferenciados de reacção intrínseca (diversidade comportamental) e múltiplas estratégias de ordenamento (diversidade demográfica). Na verdade, um ecossistema homogéneo não consegue sobreviver: a sua evolução para o declínio e extinção será fatal. Além disso, os sistemas vivos naturais dispõem de uma certa diversidade redundante, superior à exigida na sua manutenção, permitindo a adaptação de equilíbrio do ecossistema na sua evolução, conforme afirmou Ashby na chamada "lei da diversidade requerida": *"Para controlar um sistema é necessária uma diversidade de controlo pelo menos igual à diversidade própria do sistema"*.

De qualquer maneira, a diversidade deve ser organizada, para que a **controlabilidade** dos ecossistemas, à custa da regulação da distribuição das espécies (não apenas em competição antagónica), evite atingir um excesso de entropia que conduza o sistema à instabilidade. Da facto, a evolução histórica dos sistemas ambientais revela que a estrutura hierárquica, em todos os níveis de integração, é o tipo de organização mais estável. Já em 1968 dizia Margalef [3]: *"Não se obtém um ecossistema misturando os animais de um jardim zoológico"*. Na consolidação ecológica intervém um processo natural de estratificação das estruturas estáveis, com eliminação das que se apresentam instáveis, donde se formam configurações hierarquizadas.

Em tal competição revela-se decisiva a utilização de energia. Observe-se no entanto que a **energética ecológica** exerce duas funções: uma parte da ener-

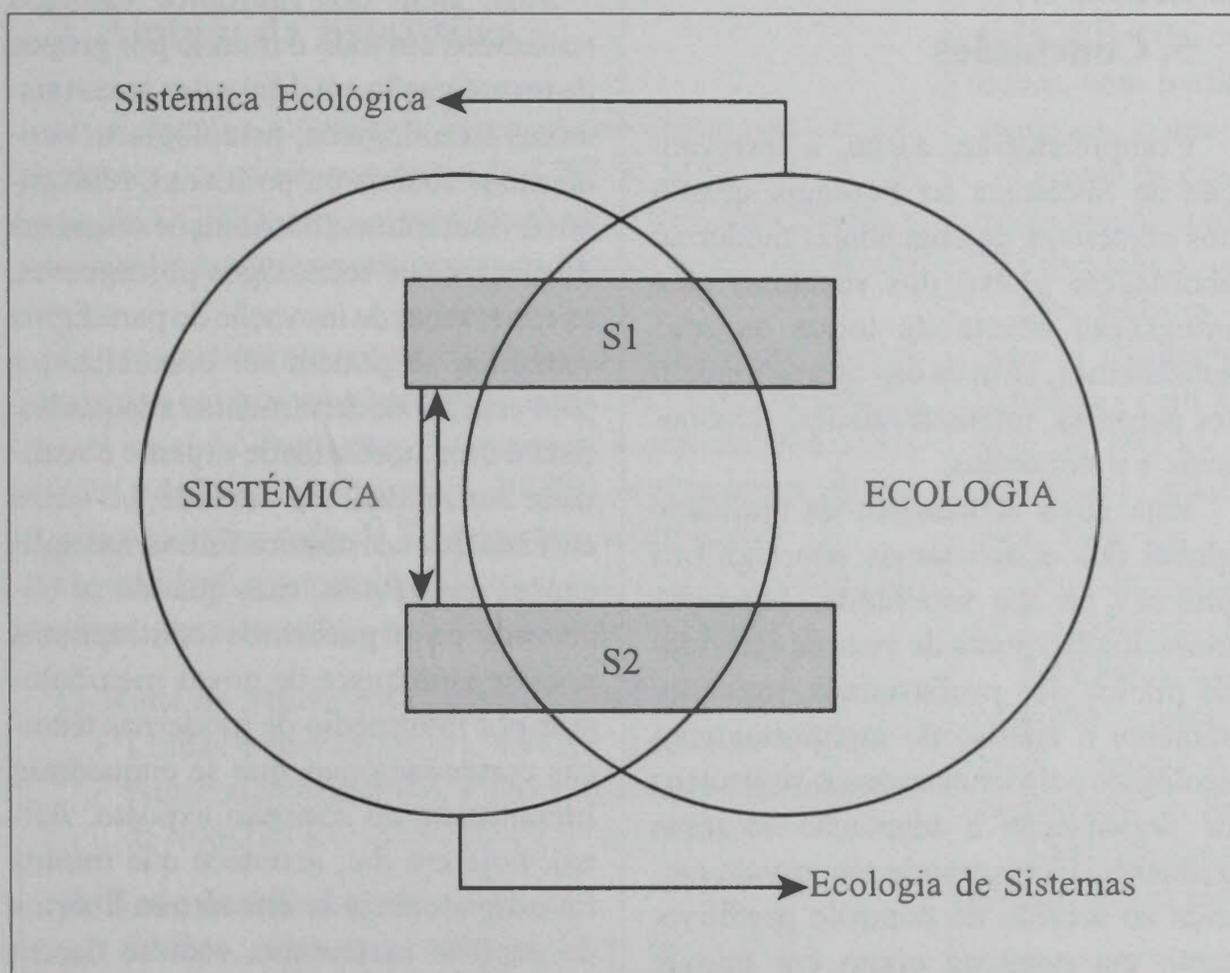


Fig. 2 - Distinção entre Sistémica Ecológica e Ecologia de Sistemas (exemplo: dois sistemas S1 e S2).

considerados como sistemas fechados e por conseguinte independentes uns dos outros (Fig. 2).

Outro modo de encarar a conceptualização da realidade material assenta no paradigma sistémico. De facto, na **Sistémica Ecológica** é a ideia fundamental da sistémica que se aplica aos ecossistemas. Agora a observação dos sistemas ecológicos faz-se com instrumentos sistémicos e segundo princípios sistémicos, considerando os sistemas abertos e portanto interactuantes (Fig. 2).

Nestes casos, a Ecologia analisa aspectos ecológicos particularmente interessantes, utilizando metodologias desenvolvidas por diferentes áreas cientí-

ficadas, como a Física, a Química ou a Biologia. Por sua vez, a Sistémica integra esta realidade conceptual nos seus próprios instrumentos, donde resulta uma nova conceptualidade para actuar tecnologicamente sobre a realidade concreta, por hipótese num primado de conservação da Natureza.

Neste sentido, os ecossistemas exibem geralmente elevada **complexidade**, ao contrário do que acontece na generalidade dos sistemas tecnológicos. Mostra-se mais difícil individualizar os seus parâmetros estruturais (acronia), não se apresenta fácil discernir como se interligam as partes constituintes (interactividade), nem sempre são nítidos os próprios objectivos e funções Globais (teleonomia) e a delimitação

gia armazena-se temporariamente na biomassa, sob a forma de ligações químicas; mas outra parte, dita "energia covariante", por variar o sistema em fase, auxilia o controlo das diversas componentes participantes na síntese orgânica, marcando o ritmo correcto das interacções. Por exemplo, a energia de deslocação e mistura dos fluidos da atmosfera e hidrosfera provoca uma turbulência exigível à preservação da vida local.

A **transfêrencia de energia** constitui um aspecto fundamental, expresso pelo chamado "3º princípio da Energética", que demonstramos genericamente em 1988 [4], seguindo a sua descoberta experimental em 1956 por Lotka na biologia: "*Os sistemas abertos evoluem idealmente com uma transferência energética cuja potência máxima se situa à volta da eficiência de 50%*". Os ecossistemas lotkianos, portanto, são naturalmente muito dissipativos no respectivo processo de competição, aliás em concordância com a lei da diversidade requerida.

Um sistema dissipativo só se mantém desde que seja percorrido por um determinado fluxo de energia covariante, que mantenha a realização hierárquica, muitas vezes de geometria fractal, fragmentada sucessivamente por auto-similaridade, durante a sua evolução para afastamento de qualquer processo homogêneo indiciador de declínio e extinção. Há aqui uma estratégia de ocupação do espaço ao longo do tempo com carácter fractal, que justifica a diversidade do ecossistema no seu desenvolvimento evolutivo. Parece, pois, que a "dinâmica caótica" pode fornecer importantes interpretações sistémicas do equilíbrio de ecossistemas no cenário das suas flutuações.

De todas estas especificidades resulta o enriquecimento da realidade conceptual para aplicação á realidade concreta, ou seja, a definição da Tecnologia dos sistemas ambientais na intersecção da Ciência com a Sociedade. É questão básica da moderna educação, a todos os níveis escolares, que não pode deixar de ser revelada no processo da educação universitária, onde o ensino e aprendizagem formativa de profissionais competentes resulta da consolidação da aprendizagem de conhecimen-

tos pela investigação. Os Engenheiros de Ambiente, para além da perspectiva sistémica que possam receber na sua formação tradicional, devem saber usar **ferramentas sistémicas**, elaboradas pela Engenharia Sistémica, para manipulação da complexidade dos ecossistemas. Tudo começa, portanto, pela investigação e desenvolvimento desses instrumentos sistémicos de aplicação nos sistemas ambientais, desde o tradicional manancial dos modelos de equações diferenciais até ás modernas axiomáticas de inteligência artificial, passando pelas estruturas periciais e de outros paradigmas multimédia.

### 5. Conclusões

Compreende-se, assim, a intervenção da Sistémica na Ecologia quanto aos objectivos da engenharia moderna: abordagem global dos sistemas, pela integração aberta de todos os seus subsistemas, através das correspondentes acronias, interactividades, teleonomias e autonomias.

Esta nova abordagem da realidade global dos ecossistemas não significa imersão na sua totalidade, aspiração utópica sob o ponto de vista da actividade prática dos profissionais, mas tão-somente a análise do comportamento ecológico pelos mecanismos sistémicos de organização e adaptação ao meio ambiente. Corresponde em grande medida ao sentido do controlo preditivo, tanto em pequena como em grande escala, que procura preservar a Natureza.

Obviamente que daí decorrem consequências tecnológicas importantes para o conteúdo da Engenharia. Tradicionalmente, aos Engenheiros de Ambiente compete utilizar instrumentos ecológicos, disponibilizados por várias ciências e tecnologias. Mas hoje em dia acresce também a inserção dessas ferramentas nas metodologias sistémicas, consoante o nível dimensional, com novos raciocínios de observação e constatação em apreensões imediatas, dedução e indução para generalizações lineares, analogia e abdução nas generalizações transversais, abdução e adução em verificações testemunhais, iteração e recursão nos processos de regulação e controlo

evolutivo nos casos de controlo dos ecossistemas mais ou menos complexos e com afectação tecnológica.

A moderna Engenharia de Ambiente não pode deixar de integrar a Engenharia Sistémica nas suas componentes tecnológicas, quer na actividade de investigação científica e na prática do desenvolvimento tecnológico, quer no planeamento curricular dos cursos superiores, sobretudo nos programas e projectos de mestrado e doutoramento. Eis a tese que permitirá acompanhar eficazmente as tendências universais da conceptualidade científica e tecnológica no âmbito dos sistemas ambientais.

Para além dos múltiplos esforços realizados em todo o mundo por grupos de investigação em diferentes áreas (sistemas tecnológicos, psicológicos, económicos sociais ou políticos), relevando obviamente as contribuições esparsas de cientistas e tecnólogos portugueses, as esperanças de inovação do paradigma sistémico só podem ser concretizadas pela criação de ferramentas adequadas. Esta é uma necessidade urgente à realidade conceptual. Na verdade, há quem entenda que a sistémica falhou nas aplicações ambientais, mas quando se observam os argumentos contrapostos nota-se uma busca de novas metodologias por intermédio de modernas técnicas computacionais que se enquadram literalmente no conceito exposto. Afinal, hoje em dia, acontece que muitos investigadores já se encontram libertos do espírito carteseano, sem se darem conta, e questionam a inserção dos seus modos de pensar e de agir no fértil paradigma em desenvolvimento.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. DUARTE-RAMOS, *Engenharia Sistémica na Engenharia Electrotécnica*, Electricidade 302, Jul./Ago. 1993
- [2] F. PESSOA, *O Livro do Desassossego*, Europa-América, Lisboa, 1986.
- [3] R. MARGALEF, *Perspectives in ecological Theory*, University of Chicago Press, 1968.
- [4] H. DUARTE-RAMOS, *Potência e eficiência na transferência de energia*, Electricidade 243, Março 1988, p. 97-110.