

Capítulo

7

Redes de Comunicação Inspiradas em Princípios Biológicos

Michele Nogueira, Aravind Kailas, Aldri Santos,
Fernando Gielow, Nicolly Pinto

Abstract

Advances in networking technologies have promoted the development of envisioned network architectures. However, for the practical success of emerging networks, they must address many significant challenges, such as the increasing complexity with large scale networks, their dynamic nature, heterogeneity, decentralized control and infrastructure, and the need for survivability and for fault tolerance. In the last few years, many works in the literature have highlighted similarities between networking and biological systems, and have emphasized the great potential of biologically inspired solutions, which are naturally adaptive, resilient, self-organized and survivable. This short course intends to assist with the understanding of the state-of-the-art in this research field, point out the advantages of bio-inspired networking, and highlight important questions and open research issues, promoting the investigation of this research topic by the scientific community.

Resumo

Os avanços nas tecnologias de comunicação têm suportado o desenvolvimento de arquiteturas para as redes do futuro. Entretanto, a fim de permitir sua aplicação prática, essas redes precisam tratar um conjunto de desafios importantes, tais como o aumento da complexidade proveniente da larga escala, a dinamicidade das redes auto-organizadas, a heterogeneidade das arquiteturas, o controle e a infraestrutura descentralizados, a necessidade de sobrevivência e de tolerância a falhas. Nos últimos anos, diversos trabalhos na literatura vêm apontando as similaridades entre as redes de comunicação e os sistemas biológicos, além de reforçar o grande potencial das soluções inspiradas nesses sistemas, os quais são naturalmente adaptáveis, resilientes, auto-organizados e capazes de sobreviver. Este minicurso visa auxiliar no melhor entendimento do estado da arte nessa área de pesquisa, enfatizar o potencial das redes de comunicação inspiradas em sistemas biológicos, e ressaltar as questões relevantes e os desafios em aberto, motivando a comunidade científica a explorar esse tópico de pesquisa atual e instigante.

7.1. Introdução

Nas últimas décadas, uma evolução expressiva em tecnologias de rede e de comunicação vem sendo observada, assim como seu resultado em diferentes arquiteturas de redes. Um proeminente produto desse desenvolvimento, a Internet, é por si só uma história de sucesso sem precedentes, enfatizando o enorme potencial das redes quando analisamos seu impacto na sociedade, economia e qualidade de vida. Enquanto esse potencial é, no caso da Internet, apenas parcialmente explorado, e continua se espalhando de diferentes maneiras em cada aspecto de nossas vidas; a próxima geração das redes de comunicação está atraindo a atenção e gerando desafios para pesquisadores e engenheiros, desde o projeto de redes de computação quântica à Internet InterPlanetária [Dressler and Akan 2010].

As redes de comunicação da próxima geração são caracterizadas pela invisibilidade e ubiquidade dos serviços, que pretendem ser facilmente acessíveis pelos usuários de maneira transparente, contínua e independente do local [Dobson et al. 2006]. Portanto, o resultado será uma rede pervasiva, estendendo as capacidades da Internet atual. Essa rede pretende adicionar, ao conjunto de dispositivos tradicionais de conexão da Internet, entidades de rede que possuem uma proximidade maior com as pessoas, tais como as redes vestíveis [Ashok and Agrawal 2003], as redes de comunicação molecular embarcada [Atakan and Akan 2007b], as redes auto-organizadas de sensores, terrestres, aéreas, aquáticas e de atuadores [Akyildiz and Kasimoglu 2004, Akyildiz et al. 2005b], e outras que exploram os recursos de comunicação com a ajuda de capacidades cognitivas, como por exemplo as redes de rádio cognitivo [Akyildiz et al. 2006]. Essa visão implica que quase todos os dispositivos e objetos do cotidiano irão ser capazes de se comunicar de forma eficiente e colaborativa, tornando-se um nó da futura rede global pervasiva, como a Internet.

A evolução das tecnologias de rede e de comunicação traz muitas vantagens para o nosso dia-a-dia. Ao mesmo tempo, a complexidade das arquiteturas de rede existentes e das planejadas para o futuro já ultrapassou os limites do que os paradigmas de rede convencionais podem tratar em termos de implantação, gerência e manutenção do funcionamento. As técnicas de auto-organização são necessárias para superar as atuais limitações [Dressler 2007]. De fato, existem muitos desafios significativos que precisam ser reconhecidos e tratados para que ocorram integrações práticas da arquitetura de rede existente e da nova geração, como a crescente complexidade de redes em larga escala, sua natureza dinâmica, as restrições de recursos, as arquiteturas heterogêneas, a ausência ou impraticabilidade de controle e infraestrutura centralizados, a necessidade de sobrevivência e a resolução autônoma de possíveis falhas.

Muitas arquiteturas de comunicação existentes e as da próxima geração não podem ser tratadas de acordo com os paradigmas de redes convencionais, os quais não são capazes de acomodar o tamanho, a heterogeneidade e a complexidade dos novos cenários. Novos paradigmas são necessários para projetar, construir e gerenciar esses sistemas. Entretanto, enquanto os desafios esboçados anteriormente, como escalabilidade, heterogeneidade e complexidade são resultantes da evolução das tecnologias de comunicação nas últimas décadas, eles vêm sendo tratados com sucesso nos sistemas da natureza há bastante tempo. Ao contrário da evolução das tecnologias de comunicação, a evolução natural na Biologia produziu soluções que de fato lidam com muitos desses desafios com elegância e eficiência, ainda muito distantes do que ocorre com as técnicas atuais para redes de comunicação.

Quando observamos com cuidado os sistemas biológicos, percebemos que a dinâmica de muitos desses sistemas e das leis que os governam tem como base um conjunto pequeno e simples de regras genéricas, produzindo padrões colaborativos e efetivos para o gerenciamento de recursos, atribuição de tarefas, diferenciação social, sincronização (ou dessincronização) sem a necessidade de um controle externo. Por exemplo, por meio dessa capacidade, bilhões de células sanguíneas que constituem o sistema imunológico podem defender o organismo de ameaças sem nenhum controle central do cérebro [Timmis et al. 2000]. De modo similar, um organismo inteiro é mantido em um estado de equilíbrio através de uma função principal, a homeostase, para o funcionamento das funções vitais, sem a necessidade de uma unidade biológica central [Camazine et al. 2003]. O processo de atribuição de tarefas nas colônias de insetos tem como base a colaboração e cooperação entre os indivíduos, de tal forma que a tarefa geral seja otimizada com uma inteligência global composta de respostas individuais simples [Bonabeau et al. 1999].

Nesses exemplos, e em geral, como resultado de milhões de anos de evolução, os sistemas e processos biológicos mostram ter características intrínsecas e atraentes para as redes de comunicação, tais como:

- adaptação a várias circunstâncias do ambiente;
- robustez e resiliência em relação a falhas causadas por fatores internos ou externos;
- capacidade de gerenciar comportamentos complexos baseando-se em um conjunto limitado de regras básicas;
- capacidade de aprender e evoluir quando novas condições surgem;
- eficiência em gerenciar recursos limitados com uma aparente inteligência global;
- capacidade de auto-organização de forma distribuída, atingindo colaborativamente um equilíbrio eficiente;
- capacidade de sobreviver apesar de condições severas.

Estas características conduzem a diferentes níveis de inspiração a partir dos sistemas biológicos para a derivação de abordagens e algoritmos distintos em cada camada da pilha de protocolos na construção de redes de comunicação eficientes, robustas e resilientes. Portanto, para promover a evolução nas tecnologias de rede, muitos pesquisadores estão engajados em desenvolver paradigmas inovadores inspirados pelos sistemas biológicos. A razão comum por trás deste esforço é capturar a dinâmica que existe nos sistemas biológicos e entender o seu fundamento com o objetivo de criar novas metodologias e ferramentas para projetar e gerenciar redes de comunicação inerentemente adaptáveis a ambientes dinâmicos, heterogêneos, escaláveis, auto-organizáveis e evolutivos.

Este trabalho apresenta uma visão geral de protocolos de rede bioinspirados e de algoritmos concebidos com base em fontes de inspiração biológicas, imitando as leis e a dinâmica que governam esses sistemas. São deixados de fora do escopo do mesmo, a literatura existente, e bastante abrangente, sobre a comunicação e algoritmos baseados em técnicas evolucionárias, por exemplo algoritmos genéticos, sendo o foco principal os

paradigmas de redes e abordagens inspiradas em sistemas e processos biológicos e as dinâmicas que os governam. Além disso, apesar de existirem muitas aplicações bioinspiradas com sucesso, o principal desafio não é a inspiração ou a aplicação dos conceitos em si, mas sim entender o sistema biológico e seu comportamento, e desenvolver o modelo desse sistema associando-o às soluções técnicas. Portanto, nosso objetivo é prover um melhor entendimento do estado da arte corrente e das questões relevantes de redes de comunicação bioinspiradas e ajudar a comunidade científica brasileira a encontrar sugestões atraentes para futuras atividades neste tópico de pesquisa instigante¹.

7.2. Por que se inspirar na Biologia?

Inicialmente, pode parecer arbitrário procurar na Biologia inspiração para pesquisas em redes de comunicação. Entretanto, essas duas áreas têm uma conexão muito mais forte do que pode parecer. A Internet - a maior rede de computadores, a mais complexa e amplamente utilizada - tem muito em comum com os sistemas biológicos complexos. Ao examinar estruturas e algoritmos comuns utilizados na Internet, podemos encontrar fortes similaridades com os sistemas biológicos. Por exemplo, qualquer um que tenha feito um curso introdutório em redes de computadores é familiarizado com o modelo em camadas da arquitetura da Internet, em que um conjunto de aplicações diversas operam sobre um conjunto menor de protocolos de transporte, os quais por sua vez operam sobre o único protocolo da Internet, o IP (do inglês *Internet Protocol*). O protocolo IP opera sobre um conjunto de protocolos da camada de enlace e meios físicos diversos, os quais podem ser substituídos rapidamente.

Muitos sistemas biológicos possuem uma arquitetura parecida. Por exemplo, as bactérias podem alimentar-se de uma variedade de nutrientes. Todos esses nutrientes possuem partes (ou todos) os componentes necessários para fornecer energia às células da bactéria. Apesar disso, uma bactéria precisa antes metabolizar esses nutrientes para que possam ser utilizados, remontando os blocos nas macromoléculas complexas que elas precisam para sobreviver. Assim como seria impraticável construir uma versão diferente de cada aplicação da Internet para cada tecnologia da camada física, também seria impraticável para uma bactéria usar um processo metabólico diferente para converter cada nutriente em cada macromolécula exigida pelo metabolismo. Ao invés disso, assim como o modelo da Internet, o metabolismo das bactérias converte todos os nutrientes para um pequeno número de substâncias comuns. Essas poucas substâncias são então utilizadas para construir um grande número de macromoléculas complexas necessárias para oferecer energia à célula. Analisando com mais detalhes o modelo da Internet, Csete e Doyle notaram que a forma de organização hierárquica é uma abordagem comum em sistemas complexos [Csete and Doyle 2004].

Observando ainda a pilha de protocolos da Internet, similaridades também existem no nível de protocolos individuais. Por exemplo, na camada de transporte, o Protocolo de Controle de Transmissão (TCP) determina a taxa de transmissão com base em um algoritmo de controle de congestionamento padrão. Esse algoritmo utiliza *feedback* do receptor na forma de confirmações (ACKs) para determinar quando a taxa do transmissor

¹ Este trabalho teve como referências principais “*A survey on Bio-Inspired Networking*” [Dressler and Akan 2010] e “*A Taxonomy of Biologically Inspired Research in Computer Networking*” [Meisel et al. 2010].

deveria ser ajustada. Enquanto o transmissor continuar recebendo os respectivos ACKs (*feedback* positivo), ele aumenta lentamente sua velocidade de transmissão. Quando o transmissor recebe *feedback* negativo, ele reduz rapidamente sua velocidade de transmissão. Agregado a isto, este algoritmo permite que a taxa do transmissor controle continuamente a taxa de envio ideal para o receptor, considerando o estado atual da rede. No campo da Teoria de Controle, esse processo pode ser visto na forma de “*feedback* integral”. Pesquisas demonstram fortes evidências de que as bactérias usam *feedback* integral para controlar sua velocidade e direção de movimento quando estão rastreando a concentração de certas substâncias químicas em seu ambiente [Yi et al. 2000]. Essas similaridades podem ser encontradas em protocolos da Internet e também em protocolos de redes sem fio.

Podemos também encontrar similaridades mais amplas e sistêmicas entre a Internet e os sistemas biológicos. De fato, o modelo hierárquico citado anteriormente faz parte de uma enorme tentativa de desenvolver um modelo teórico unificado para a estrutura de redes em larga escala - biológicas, tecnológicas e de outros tipos. Um modelo particular de redes complexas, chamado de *highly optimized tolerance (HOT)* [Carlson and Doyle 1999], tem se mostrado em concordância com as entidades reais - ambas em sistemas biológicos [Zhou et al. 2002, Tanaka 2005] e na Internet [Doyle et al. 2005]. Os autores do HOT comparam seu modelo com outros modelos populares de redes complexas [Bak et al. 1988, Barabási and Albert 1999], concluindo que o modelo HOT está bem alinhado com as propriedades dos sistemas reais.

As premissas teóricas do modelo HOT elucidam algumas similaridades sistêmicas entre a Internet e os sistemas biológicos. A premissa básica do modelo consiste na necessidade, para qualquer sistema, da existência de uma estrutura interna extremamente organizada e complexa para que possa exibir comportamento externo robusto [Carlson and Doyle 2002]. Ou seja, existe uma inerente troca entre simplicidade estrutural e robustez. Ambos, o corpo humano e a Internet, possuem estruturas internas complexas e extremamente organizadas. O corpo humano possui muitos órgãos e sistemas fisiológicos diferentes, cada um deles com um propósito específico. Um rim não pode servir como um pulmão e vice-versa. A Internet também contém um conjunto de dispositivos especializados. Em seu núcleo, os roteadores de alta velocidade, única e exclusivamente, encaminham os dados de uma forma altamente otimizada. Nas bordas da rede, existe uma extensa gama de dispositivos orientados a aplicação, como *notebooks* e telefones celulares. Um roteador de alta velocidade não seria útil para ler seu *e-mail*, assim como um rim não seria útil oxigenando seu sangue.

Além disso, o modelo HOT assume que sistemas complexos são apenas otimizados para serem robustos contra falhas ou perturbações esperadas. O sistema se torna frágil em relação a falhas ou perturbações inesperadas ou raras. Os humanos, por exemplo, são robustos a vários tipos de mudanças que precisamos tolerar - vivemos em climas como o do Ártico ao deserto do Saara, podemos obter energia de um número enorme de alimentos, e podemos até mesmo sobreviver sem um membro. Apesar disso, uma minúscula mudança em um gene ou exposição a níveis específicos de substâncias tóxicas podem causar falhas massivas no sistema. A Internet foi otimizada para ser robusta a falhas físicas de componentes individuais, e isso tem se provado um sucesso em relação a esse problema. Porém, ainda é frágil a pequenos erros, como um erro no projeto do protocolo (como ocorrido com a ARPAnet [Perlman 2001]) ou um único componente que quebra

alguma regra [Lad et al. 2007].

Em ambos, nos sistemas biológicos e nos de redes, existem projetos simples, porém nestes projetos simples há falta de resiliência mesmo aos erros mais comuns. As bactérias são compostas de apenas uma célula, ao invés de uma complexa e estruturada rede de células como o corpo humano, mas conseguem suportar apenas pequenas mudanças no ambiente externo, como uma pequena mudança na temperatura ou pH. Construir uma rede seguindo uma topologia em estrela na Internet faz com que muitos desafios complicados, como roteamento de pacotes e endereçamento, se tornem trivialmente simples. Apesar disso, uma rede com topologia em estrela se torna totalmente inútil caso exista falha no único nó central.

As evidências sugerem que a mãe natureza e engenheiros da área de redes resolvem problemas semelhantes e também convergem de forma independente para soluções similares. Dessa forma, parece ser razoável que os problemas novos ou persistentes em redes de computadores tenham muito em comum com problemas que a Biologia encontrou e resolveu há tempos atrás. Para pesquisadores da área de redes de computadores, a literatura tem mostrado a importância de observar com atenção os sistemas biológicos, a fim de desenvolver soluções para os problemas nesta área de pesquisa.

7.3. Principais conceitos e desafios

Existem muitos desafios para o avanço das arquiteturas das rede atuais e para a implementação das arquiteturas visionadas para a próxima geração. Em paralelo, alguns problemas similares e suas soluções são encontrados na natureza provenientes da evolução biológica. Nesta seção, as questões fundamentais e mais desafiadoras para comunicação em redes são revistas; comparando-as com seus pares homólogos e suas soluções correspondentes existentes em sistemas biológicos. A maioria dos desafios listados refere-se a problemas em arquiteturas de redes mais recentes, tais como as redes *ad hoc* móveis, as redes de sensores sem fio e as redes sem fio heterogêneas. Isto se deve ao fato de existir um crescente uso da computação ubíqua, concentrando muitas questões importantes nesses tipos de redes. Devido a uma grande quantidade de trabalhos em redes sem fio e móveis, os exemplos de soluções bioinspiradas são apresentados nesta seção, agrupados com base nos desafios comuns e a partir da literatura atual dessas áreas de pesquisa.

Além disso, alguns desafios explorados, tais como a escalabilidade da rede, as arquiteturas heterogêneas e outros, são também barreiras para o desenvolvimento de arquiteturas da Internet do Futuro, incluindo a Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things*) [Welbourne et al. 2009]. Alguns aspectos de segurança, tais como a propagação de *worms* na Internet, são ilustrados e discutidos na Seção 7.4. Enfatiza-se contudo que esta seção não deve ser vista como uma referência completa de desafios de redes, mas como uma lista dos problemas mais comuns na literatura abordados através de soluções bioinspiradas.

Nesta seção, são revistos os principais desafios das arquiteturas atuais de redes e as da próxima geração, os quais resultaram da evolução das tecnologias de comunicação e do aumento da demanda por serviços nessas arquiteturas. O objetivo desta seção não é de explorar os problemas de redes em termos de funcionalidades e algoritmos individualmente em cada camada da pilha de protocolos de comunicação em diversas arquiteturas de rede.

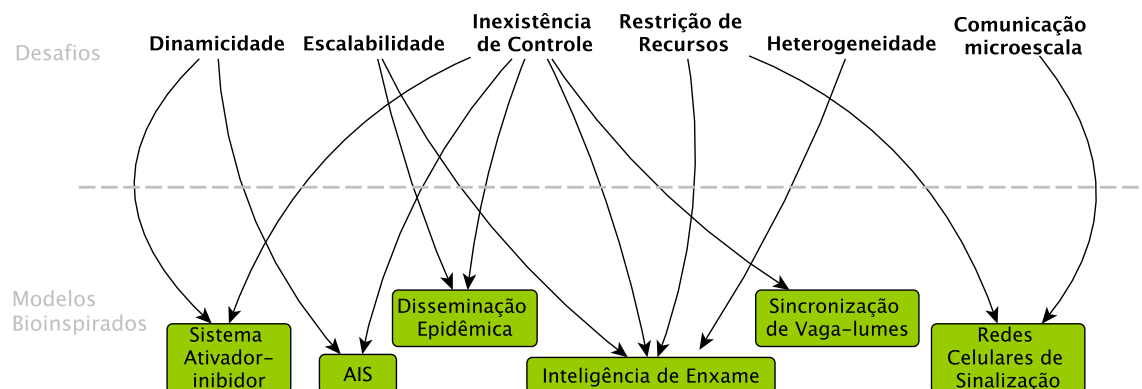


Figura 7.1. Correlação entre os desafios em redes e modelos bioinspirados

Mas sim, ilustrar desafios comuns a diferentes arquiteturas de redes de comunicação que podem ser tratados através de soluções bioinspiradas. Antes de detalhar os desafios, a Figura 7.1 correlaciona cada desafio apresentado nesta seção com os modelos bioinspirados, descritos nas próximas seções.

7.3.1. Escalabilidade

Um dos principais desafios consiste na necessidade de garantir a alta disponibilidade dos serviços em rede independente do seu tamanho total. Os novos sistemas de rede tendem a ser compostos por um grande número de usuários e de dispositivos (nós), ultrapassando em várias ordens de magnitude o tamanho da Internet atual. Por exemplo, as redes de sensores sem fio (RSSF ou WSNs, do inglês *Wireless Sensor Networks*) são geralmente compostas por um grande número de dispositivos, variando entre algumas centenas a várias centenas de milhares de nós [Akyildiz et al. 2002]. Essas redes são capazes de monitorar o ambiente, animais e pessoas e transmitir os dados coletados para uma estação base responsável por recebê-los. A primeira consequência direta dessas redes de grande escala é a enorme quantidade de carga de tráfego a ser transferida ao longo da rede. Isso pode facilmente exceder sua capacidade, e, conseqüentemente, comprometer a confiabilidade da comunicação devido a perda de pacotes por colisões no canal local sem fio, bem como por congestionamento ao longo do percurso entre a origem do tráfego até a estação base [Akan and Akyildiz 2005]. Desta forma, o nível de dificuldade aumenta com o tamanho da rede ao selecionar o conjunto e o número adequado de nós e definir a periodicidade de comunicação confiável, porém eficiente [Atakan and Akan 2006].

Da mesma forma, torna-se mais importante encontrar as rotas ótimas, se possível, a fim de manter a sobrecarga de comunicação em níveis aceitáveis durante a disseminação de uma grande quantidade de informações através de uma rede em larga escala. Conforme a escala da rede cresce, o número de caminhos possíveis, e portanto, o espaço de busca para as rotas ótimas em termos de um critério pré-definido, também aumentam drasticamente. O número de tabelas de roteamento a serem mantidas, e, independentemente de um mecanismo de roteamento específico, a quantidade de tráfego para atualizações das tabelas experimenta o mesmo acréscimo quando a escala da rede cresce.

A implantação, a comunicação efetiva e o gerenciamento de redes de larga escala, por exemplo, as redes de sensores sem fio e as redes móveis *ad hoc*, não podem ser manualmente realizados. Assim, os mecanismos de rede devem ser escaláveis e adaptáveis a variações no tamanho da rede. Felizmente, existem muitos sistemas biológicos que inspiram o desenvolvimento de soluções de comunicação eficazes para redes de larga escala. Por exemplo, como será discutido na Seção 7.4, aqueles sistemas que têm como base a otimização do comportamento global na solução de tarefas complexas individuais através de meios locais, as técnicas de *Ant Colony Optimization* (ACO) [Dorigo et al. 1996] fornecem mecanismos de roteamento eficientes para redes móveis *ad hoc* em larga escala [Di Caro et al. 2005]. Além disso, a disseminação de informações em larga escala pode ser tratada com a ajuda de um modelo de disseminação de epidemias [Vogels et al. 2003, Tsuchiya and Kikuno 2004, Carreras et al. 2006], que é o principal mecanismo de transmissão de vírus sobre grandes populações de organismos. Exemplos semelhantes, como os que serão apresentados na Seção 7.4, mostram que os possíveis efeitos adversos das redes em larga escala podem ser tratados com mecanismos bioinspirados.

7.3.2. Natureza dinâmica

Ao contrário dos primeiros sistemas de comunicação compostos de um par de transmissor/receptor e de um canal de comunicação, os quais são todos estáticos, as arquiteturas de rede existentes e as vislumbradas para o futuro são altamente dinâmicas em relação ao comportamento dos nós, aos padrões de demanda de tráfego e largura de banda, e às condições dos canais e da rede. De acordo com o padrão de mobilidade dos nós, as dimensões da rede e a cobertura de transmissão e os enlaces de comunicação podem rapidamente ser estabelecidos e tornarem-se obsoletos em redes *ad hoc* móveis, do inglês, *Mobile Networks - (MANETs)* [Chlamtac et al. 2003].

Além disso, em conjunto com a mobilidade dos nós e com as mudanças no ambiente como resultado do movimento dos nós, as condições do canal e também a qualidade dos enlaces podem ser altamente dinâmicas. De forma similar, nas aplicações de rastreamento de alvos em redes de sensores, baseando-se no comportamento dos alvos e na área a ser monitorada, a quantidade de tráfego gerada pelos sensores no momento da detecção pode aumentar drasticamente e decair ao longo do tempo. Isso impõe variação na carga da rede, o que pode resultar na utilização ineficiente da capacidade, caso abordagens estáticas sejam empregadas. O acesso dinâmico ao espectro de radiofrequências e a sua gestão em redes de rádio cognitivo é outro importante exemplo em que o comportamento dinâmico dos usuários, suas solicitações por canal de frequência e as demandas por largura de banda específicas para a aplicação impõem desafios significativos ao projeto da rede [Akyildiz et al. 2006]. O objetivo das redes de rádio cognitivo é por si mesmo influenciar no uso dinâmico dos recursos do espectro a fim de maximizar a utilização geral do mesmo.

A lista de exemplos pode ser expandida, o que reforça o fato das técnicas de comunicação precisarem ser adaptáveis à dinâmica de ambientes de rede específicos. Nesta direção, os sistemas biológicos são conhecidos por se adaptarem a várias circunstâncias a fim de sobreviver. Por exemplo, o Sistema Imunológico Artificial, do inglês *Artificial Immune System* (AIS), inspirado pelos princípios e processos do sistema imunológico dos mamíferos [Hofmeyr and Forrest 2000], detecta eficientemente variações na dinâmica do ambiente ou desvios dos padrões esperados pelo sistema. Analogamente, o sistema

ativador-inibidor e a análise do mecanismo de reação-difusão em sistemas biológicos [Henderson et al. 2004] também capturam a dinâmica entre sistemas altamente interativos através de equações diferenciais. Como será explorado na seção 7.4, muitas abordagens bioinspiradas, como no mecanismo ativador-inibidor [Yoshida et al. 2005] e Sistema Imunológico Artificial [Atakan and Akan, Ö.B. 2007], podem ser exploradas para desenvolver técnicas de comunicação as quais se adaptem à variação de condições do ambiente.

7.3.3. Restrição de recursos

A medida que as tecnologias de comunicação se desenvolvem, a demanda gerada sobre essas redes aumenta drasticamente, em termos de serviços oferecidos, qualidade de serviço, incluindo capacidade de largura de banda necessária, e duração de vida da rede. Por exemplo, a Internet possui hoje limitações que a impedem de responder a toda a demanda, uma vez que sua capacidade está praticamente transbordada pelo tráfego criado. Tal situação tem impulsionado o desenvolvimento da Internet da próxima geração [Metcalf 2000].

Da mesma forma, com a crescente demanda por redes sem fio, a forma de alocação tradicional e fixa de bandas no espectro de radiofrequência por meio de licenças tem se tornado insuficiente em acomodar uma vasta gama de requisições de comunicação por ondas de rádio. Consequentemente, as redes de rádio cognitivo com acesso e gerência dinâmica de espectro vêm sendo propostas e planejadas a fim de melhorar a utilização de recursos limitados do espectro [Akyildiz et al. 2006].

Por outro lado, algumas arquiteturas de rede da próxima geração, como a Internet InterPlanetária [Akyildiz et al. 2004] intrinsecamente contêm restrições de recursos relacionadas às suas limitações físicas e estruturais. Mais especificamente, para redes compostas por nós que inerentemente contêm restrições em termos de energia e recursos de comunicação, como as redes de sensores sem fio [Akyildiz et al. 2002], as redes móveis *ad hoc* [Chlamtac et al. 2003], as redes em nano escala e de comunicação molecular [Atakan and Akan 2007b], essas limitações afetam diretamente seu desempenho e requisitam mecanismos inteligentes de alocação de recursos.

Os sistemas biológicos mais uma vez ajudam os pesquisadores ao indicar os mecanismos e novas abordagens para soluções as quais resolvem a troca entre a alta demanda e a limitação de recursos. Por exemplo, no processo de busca por comida [Dorigo et al. 1999], as formigas usam seus recursos limitados individuais para otimizar o comportamento global das colônias a fim de encontrar alimento de modo a aumentar o custo-benefício. Como explicado na Seção 7.4, o comportamento de colônias de formigas no processo de busca por comida inspira muitas técnicas eficientes de redes para gerenciar recursos. Além disso, as redes celulares de sinalização e suas contrapartes artificiais representam e capturam a dinâmica das interações que contribuem para a função principal de uma célula viva. Assim, esse mecanismo também pode esclarecer importantes vias para obter técnicas eficientes de comunicação para recursos limitados de redes de comunicação em escala nano e molecular.

7.3.4. Inexistência de infraestrutura

Com o aumento significativo nas dimensões das redes, tanto espacialmente, quanto em número de nós, o controle centralizado da comunicação torna-se impraticável. Por outro

lado, algumas redes são, por definição, livres de infraestrutura, tais como as redes *ad hoc* sem fio [Chlamtac et al. 2003], as redes tolerantes a atrasos (do inglês, *Delay Tolerant Networks – DTNs*) [Akyildiz et al. 2004], as redes de sensores sem fio [Akyildiz et al. 2002]. Algumas têm uma arquitetura de sistema heterogênea, distribuída e não-unificada, tais como redes de rádio cognitivo [Akyildiz et al. 2006], e redes *mesh* sem fio [Akyildiz et al. 2005a]. Estes ambientes de rede necessitam de comunicação distribuída e de algoritmos de rede, os quais possam funcionar efetivamente sem ajuda alguma de uma unidade central.

Em paralelo, as redes de comunicação estão sujeitas a falhas tanto por mau funcionamento dos dispositivos, quanto por mau uso de sua capacidade. Alguns dispositivos em certas áreas inóspitas, por exemplo, podem ficar sem bateria; ou em alguns casos os dispositivos podem ficar sobrecarregados causando forte congestionamento e bloqueando as conexões. Na maioria dos casos, espera-se que as redes continuem funcionando sem interrupções, mesmo na presença dessas falhas potenciais. Considerando sua natureza dinâmica, a falta de infraestrutura e a impraticabilidade de controle de comunicação centralizado, essas redes devem ser capazes de se reorganizar e se manter funcionando a fim de prosseguir com sua operação independente de suas condições. Assim, as redes de comunicação existentes e as previstas para a nova geração devem ser capazes de se auto-organizar, evoluir e sobreviver.

A fim de suprir essas necessidades, as redes devem ser equipadas com um conjunto de algoritmos inteligentes e processos similares aos sistemas biológicos. De fato, as ferramentas inerentes a esses sistemas se mostram como soluções promissoras para esses desafios. Por exemplo, um mecanismo de disseminação de epidemias poderia ser adaptado para propagar eficientemente informações em redes altamente particionadas e para roteamento oportunista em ambientes de rede tolerantes a atrasos [Carreras et al. 2006]. As colônias de formigas, e em geral colônias de insetos, que realizam tarefas globais sem o controle de uma entidade centralizada, também podem inspirar o projeto de técnicas de comunicação para ambientes de rede sem infraestrutura [Atakan and Akan 2007a]. Além disso, os princípios de sincronização de vagalumes [Richmond 1930] podem ser aplicados para projetar protocolos de sincronização de tempo bem como protocolos de comunicação que precisam de sincronismo. Os sistemas do tipo ativador-inibidor poderiam ser explorados para o controle distribuído de períodos de detecção e ciclo de trabalho de redes de sensores para rastreamento de alvos [Dressler 2008b, Dressler 2008a]. O comportamento autônomo de Sistemas Imunológicos Artificiais pode ser um bom modelo para o projeto de algoritmos efetivos na comunicação autônoma e não vigiada em redes de sensores [Atakan and Akan, Ö.B. 2007]. Desta maneira, como discutido na seção 7.4 em detalhes, as potenciais deficiências decorrentes da falta de infraestrutura e requisitos para a comunicação autônoma em vários ambientes de rede poderiam ser resolvidas através da cuidadosa exploração dos sistemas biológicos.

7.3.5. Arquiteturas heterogêneas

Outro aspecto crítico das redes de comunicação está relacionado à sua heterogeneidade e seu comportamento complexo, emergente da gama dos diversos elementos da rede e grande número de interações entre eles. Os sistemas de comunicação da próxima geração são previstos como sendo compostos por uma grande quantidade de dispositivos que

se diferenciam por sua capacidade de comunicação, armazenamento e processamento. Exemplos desses variam desde dispositivos de identificação de rádio frequência (do inglês, *Radio Frequency Identification - RFID*) e simples sensores até veículos equipados com dispositivos de acesso à rede sem fio.

A Internet das Coisas ilustra uma das arquiteturas de rede emergentes e desafiadoras. Ela é definida como uma visão de uma rede de objetos que estende as capacidades da Internet para nosso cotidiano, transformando nosso ambiente em uma rede sem fio em larga escala composta por objetos identificados de forma única. Um dos principais problemas de pesquisa para a implantação das IoTs consiste no alto nível de heterogeneidade em relação aos tipos de nós, variando desde aplicações inteligentes para ambientes domésticos até mesmo a bens de consumo, como um iogurte, identificados com etiquetas RFID [Welbourne et al. 2009].

Da mesma forma, as redes de rádio cognitivo implicam no desenvolvimento de novas técnicas de comunicação para garantir a coexistência de diferentes sistemas de comunicação sem fio ao sobrepor faixas de espectro com o objetivo de maximizar a utilização do mesmo. Também espera-se que redes em malha sem fio e a tecnologia WiMAX sejam compostas por dispositivos e algoritmos heterogêneos [Akyildiz et al. 2005a]. As redes de sensores e atuadores (SANETs) incorporaram em suas arquiteturas nós de sensores heterogêneos e nós agentes altamente capazes [Akyildiz and Kasimoglu 2004, Dressler 2007]; e redes veiculares *ad hoc* (VANETs) [Boukerche et al. 2008] exibem níveis significantes de heterogeneidade em termos de tecnologias de comunicação sem fio utilizadas e padrões de mobilidade de veículos *ad hoc*.

Tal heterogeneidade e assimetria em termos de capacidade, dispositivos de comunicação e técnicas utilizadas, precisam ser compreendidos, modelados e efetivamente gerenciados, a fim de permitir a realização de novas redes de comunicação heterogêneas. Os diferentes níveis de heterogeneidade também são observados em sistemas biológicos. Por exemplo, em muitos sistemas biológicos, apesar dos distúrbios externos, um estado interno estável é mantido através da colaboração entre um conjunto heterogêneo de dispositivos e mecanismos, como o sistema nervoso, o sistema endócrino e o sistema imunológico. Essa funcionalidade é chamada homeostase, e o comportamento coletivo da homeostase [Neal and Timmis 2005] pode ser aplicado para projetar técnicas de comunicação para redes com arquiteturas heterogêneas. Por outro lado, as colônias de insetos são compostas por indivíduos com diferentes capacidades e habilidades que respondem a certos estímulos do ambiente. Apesar dessa inerente heterogeneidade, as colônias conseguem otimizar globalmente a alocação de tarefas e o processo de seleção através de sua inteligência coletiva [Bonabeau et al. 1999]. Uma abordagem semelhante pode ser utilizada para realizar alocação de tarefas e seleção em redes de sensores e atuadores (SANETs) [Labella et al. 2004, Labella and Dressler 2006], para compartilhamento do espectro em redes de rádio cognitivo [Atakan and Akan 2007a], assim como para roteamento usando múltiplos caminhos em redes sobrepostas [Leibnitz et al. 2006b, Leibnitz et al. 2006a].

7.3.6. Comunicação no nível micro

Com os avanços em micro e nanotecnologia, os dispositivos eletro-mecânicos tiveram sua escala reduzida para níveis microscópicos e nanoscópicos. Consequentemente, existem

muitos sistemas e dispositivos micro (MEMS) e nano-eleto-mecânicos (NEMS) com uma vasta gama de aplicações. Desta forma, as capacidades de comunicação em níveis micro e até mesmo nano tornam-se imperativas a fim de que esses dispositivos cooperem e possam colaborativamente realizar tarefas complexas que não podem ser concluídas individualmente. Desta forma, as nanoredes podem ser definidas como redes compostas por nano-dispositivos, isto é, nano-dispositivos comunicando cooperativamente uns com os outros e compartilhando informações a fim de atingir um objetivo em comum [Akyildiz et al. 2008].

Enquanto os requisitos de redes e comunicação para essas escalas parecem ser semelhantes do ponto de vista funcional, existem diferenças significantes na comunicação nos níveis micro e nano. As dimensões dos nano-dispositivos tornam as tecnologias de comunicação convencionais, como ondas eletromagnéticas, acústicas, inaplicáveis nesses níveis, devido ao tamanho da antena e limitações de canal. Além disso, o meio de comunicação e características dos canais também mostram importante desvio dos casos convencionais devido às leis da física que governam essas escalas. A ideia principal para nano-dispositivos, nano-comunicação e nano-redes também vem sendo inspirada por processos e sistemas biológicos. Por isso, é concebível que as soluções para os desafios da comunicação em níveis micro e nano possam também ser desenvolvidas inspirando-se em estruturas biológicas e mecanismos de comunicação existentes.

De fato, muitas entidades biológicas nos organismos possuem estrutura similar a dos nano-dispositivos. Por exemplo, toda célula viva possui a capacidade de perceber o ambiente, recebendo sinais externos ao realizar certas tarefas em nano escala. Mais importante, baseando-se em transmissão e recepção de moléculas, as células de um organismo vivo podem estabelecer uma rede celular de sinalização [Alberts et al. 1994], através da qual elas podem se comunicar para realizar tarefas mais complexas e vitais, por exemplo, as respostas do sistema imunológico. Portanto, como será exposto na seção 7.5 em detalhes, a inspiração proveniente das redes celulares de sinalização, e conseqüentemente da comunicação molecular [Nakano et al. 2005], oferece importantes direções para a pesquisa e abordagens promissoras para o projeto de soluções para comunicação e redes em escalas micro e nano.

7.4. Modelos biológicos como fonte de inspiração

Esta seção tem como objetivo introduzir a área emergente de redes de comunicação bioinspiradas. Apresentamos a abordagem geral aplicada nessas redes, através da discussão sobre as estruturas e técnicas biológicas relevantes para redes de comunicação, a modelagem dos sistemas e suas propriedades e, finalmente, a elaboração de soluções. Esta seção classifica as abordagens biologicamente inspiradas para redes, e é complementada por exemplos específicos apresentados com mais detalhes na Seção 7.5. Os algoritmos bioinspirados podem ser utilizados efetivamente para problemas de otimização, de exploração e mapeamento, e de reconhecimento de padrões. Com base em uma série de exemplos selecionados, mostramos as vantagens das abordagens bioinspiradas, as quais motivam a sua aplicação em uma ampla gama de problemas.

Como este trabalho se concentra em abordagens recentes em comunicação bioinspirada, nós explicitamente excluímos o domínio amplo de algoritmos evolutivos, que

são aplicados com sucesso a problemas de otimização em muitas áreas da ciência da computação e de engenharias. Como observação adicional, deve notar-se que a auto-organização (massiva) em sistemas distribuídos também não é considerada em detalhes no nosso escopo. Entretanto, muitos exemplos discutidos também fornecem soluções para este problema [Dressler 2007].

7.4.1. Abordagens de modelagem

Antes de apresentar os modelos biológicos específicos explorados no desenvolvimento e implementação de soluções de rede bioinspiradas, introduzimos brevemente a abordagem geral da modelagem aplicada. As primeiras abordagens de modelagem datam da década de 1970 [Eigen and Schuster 1979, Ashby 1962]. Desde então, um grande número de soluções técnicas que imitam princípios biológicos correspondentes têm sido desenvolvidos e publicados. As arquiteturas de redes inspiradas em princípios biológicos, que mostram a aplicação da abordagem de modelagem completa, são descritas em [Wang and Suda 2000, Suzuki and Suda 2002]. Tais arquiteturas podem ser vistas como catalisadores ou promotores de muitas outras investigações na última década. Um trabalho mais recente deste tipo de arquitetura mostra que ainda há espaço para pesquisas e melhorias [Lee et al. 2007].

Investigando muitos trabalhos e propostas dos últimos anos, percebe-se que alguns destes podem ser entendidos como tentativas de apresentar soluções técnicas com algumas similaridades com suas inspirações biológicas, sem realmente investigar as principais vantagens e objetivos dos sistemas biológicos. Muitos métodos e técnicas são realmente bioinspirados, por seguirem os princípios que foram estudados na natureza, gerando efeitos positivos se aplicados em sistemas técnicos. Três passos podem ser identificados como base necessária para o desenvolvimento de métodos bioinspirados:

1. **Identificação de analogias** - quais estruturas e métodos parecem ser semelhantes;
2. **Compreensão** - modelagem detalhada do comportamento biológico real;
3. **Engenharia** - simplificação do modelo e ajuste para aplicações técnicas.

Estes princípios primários para investigar e explorar inspirações biológicas estão ilustrados na Figura 7.2. Em primeiro lugar, as analogias entre os sistemas biológicos e os técnicos (como a computação ou sistemas de rede) devem ser identificadas. É particularmente necessário que todos os princípios biológicos sejam compreendidos adequadamente, o que muitas vezes ainda não é o caso na Biologia. Em segundo lugar, devem ser criados modelos correspondentes ao comportamento biológico. Estes modelos serão posteriormente utilizados para desenvolver uma solução técnica. A tradução de modelos biológicos para o modelo que representa os sistemas técnicos bioinspirados é um passo de engenharia. Em terceiro e último lugar, o modelo deve ser simplificado e ajustado para a aplicação técnica. Como observação, deve ser mencionado que os biólogos já olham para sistemas bioinspirados para saber mais sobre os padrões de comportamento na natureza [Webb 2000]. Assim, o circuito é fechado a partir de aplicações técnicas para sistemas biológicos.

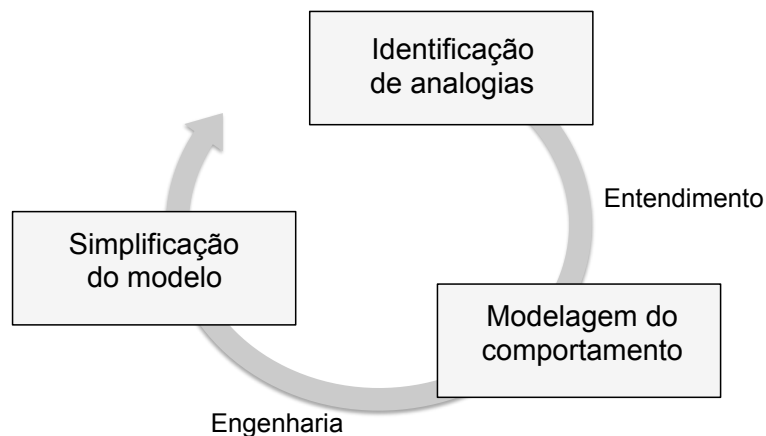


Figura 7.2. Engenharia para desenvolvimento de soluções bioinspiradas

7.4.2. Classificação e categorização

Basicamente, as aplicações de soluções bioinspiradas para problemas relacionados à computação e à comunicação podem ser classificados nos seguintes domínios:

- A *computação bioinspirada* representa uma classe de algoritmos que focam em computação eficiente, por exemplo, para otimização de processos ou reconhecimento de padrões.
- Os *sistemas bioinspirados* constituem um conjunto de arquiteturas para sistemas massivamente distribuídos e colaborativos, como sistemas de sensoriamento e exploração.
- As *redes bioinspiradas* formam uma classe de estratégias para o estabelecimento de redes de comunicação eficientes e escaláveis dentro de condições indeterminadas, como para organização autônoma de sistemas distribuídos.

Observando através de princípios biológicos, diversos domínios de aplicações de redes podem ser distinguidos. A Tabela 7.1 resume os domínios biológicos que são detalhados na Seção 7.5, juntamente com alguns exemplos específicos aplicados com sucesso em redes. Além destes algoritmos específicos que imitam os mecanismos e os comportamentos biológicos, a organização geral de sistemas biológicos, isto é, a estrutura de corpos até o nível de órgãos e células, pode ser utilizada como inspiração para desenvolver sistemas técnicos escaláveis e auto-organizáveis em determinadas redes de computadores. Arcabouços de controle respectivos e arquiteturas bioinspiradas completas foram investigadas em [Wang and Suda 2000, Lee et al. 2007].

A Figura 7.3 ilustra outra propriedade interessante de diversos mecanismos biológicos de comunicação e coordenação. Ao estudar estas técnicas no nível micro, isto é, em nível celular ou de caminhos de estímulos entre células, outros mecanismos similares podem ser identificados quando comparados a estudos no nível macro, isto é, na coordenação entre pessoas em um grupo ou mesmo no globo. Em resumo, muitos modelos são

Princípios Biológicos	Campos de aplicação em redes	Referências
Inteligência de Enxames e Insetos Sociais	Busca distribuída e otimização; roteamento de redes de computadores, especialmente em MANETs, WSNs, e redes <i>overlay</i> ; alocação de tarefas e recursos.	[Bonabeau et al. 1999];[Dorigo et al. 1996];[Di Caro et al. 2005];[Dorigo et al. 1999];[Labella et al. 2004];[Labella and Dressler 2006];[Leibnitz et al. 2006b];[Leibnitz et al. 2006a];[Ma and Krings 2009]; [Farooq 2008];[Lee and Suzuki 2009];[Di Caro and Dorigo 1998];[Wang et al. 2009];[Michlmayr 2007];[Forestiero et al. 2007];
Sincronização de Vaga-lumes	Sincronização de relógio totalmente distribuída e robusta.	[Richmond 1930];[Mirollo and Strogatz 1990];[Tyrrell et al. 2006];[Tyrrell et al. 2007];[Tyrrell and Auer 2007];[Wakamiya and Murata 2005];[Babaoglu et al. 2007];
Sistema Ativador e Inibidor	Auto-organização de sistemas autônomos; coordenação distribuída; adaptação contínua dos parâmetros do sistema em ambientes altamente dinâmicos.	[Henderson et al. 2004];[Yoshida et al. 2005];[Dressler 2008b];[Dressler 2008a];[Turing 1952];[Hyodo et al. 2007];[Neglia and Reina 2007];
Sistema Imunológico Artificial	Segurança de rede: detecção de anomalias e mau comportamento.	[Timmis et al. 2000];[Atakan and Akan 2006];[Hofmeyr and Forrest 2000];[Neal and Timmis 2005];[Carlson and Doyle 2002];[Kephart 1994];[Hofmeyr 1999];[Stepney et al. 2005];[Le Boudec 2004];
Disseminação Epidêmica	Distribuição de conteúdo nas redes de computadores (por exemplo nas DTNs); redes <i>overlay</i> ; análise de propagação de vírus e <i>worms</i> na Internet.	[Vogels et al. 2003];[Tsuchiya and Kikuno 2004];[Carreras et al. 2006];[Zou et al. 2005];[Vojnovic and Ganesh 2008];[Kleinberg 2007];[Khelil et al. 2002];[Shah et al. 2005];[Hayashi et al. 2006];[Ahi et al. 2006]; [Zhang et al. 2007];[Okuyama et al. 2006];[Pappas et al. 2009];[Kesidis et al. 2008];
Redes Celulares de Sinalização	Coordenação e controle em sistemas massivamente distribuídos; programação de redes de sensores e atuadores operacionais centralizados.	[Dressler 2008a];[Alberts et al. 1994];[Weng et al. 1999];[Pawson 1995];[Kruger and Dressler 2005];[Milo et al. 2002];[Decraene et al. 2006]; [Dressler 2007];[Dressler et al. 2009];[Tschudin 2003];[Tschudin and Yamamoto 2004];[Yamamoto et al. 2007];[Petrocchi 2006];

Tabela 7.1. Princípios biológicos e suas aplicações na área de Redes de Computadores

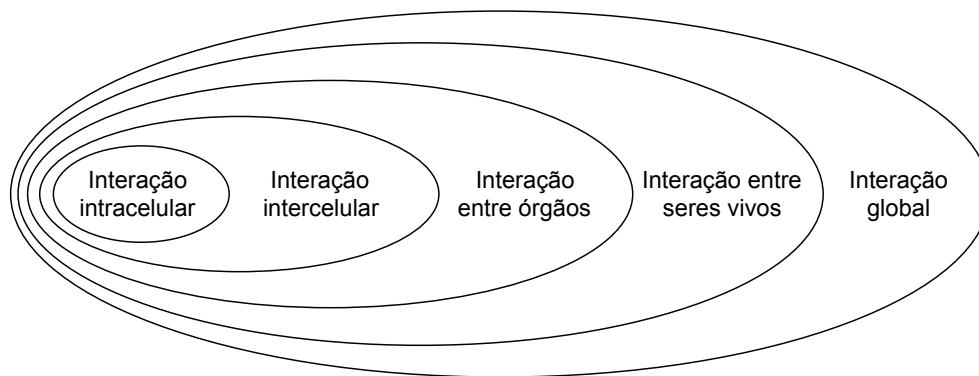


Figura 7.3. Níveis de hierarquia para inspiração em sistemas biológicos

similares nos níveis micro e macro. Eles se aproveitam de mecanismos de comunicação e coordenação similares.

Este nível de similaridade tem vantagens. Primeiro, a modelagem correta de aspectos de comunicação específicos pode frequentemente ser feita utilizando modelos de outros domínios. Por exemplo, a difusão de proteínas para células vizinhas pode ser descrita com um modelo de comunicação similar, como o alastre epidêmico de vírus entre diferentes pessoas. Os modelos matemáticos são frequentemente os mesmos. Pelo outro lado, tal similaridade requer cuidado especial ao selecionar o modelo biológico como fonte correta para inspiração na solução de um problema técnico. Se os modelos não casam perfeitamente, a solução técnica pode ser limitada em sua funcionalidade ou eficiência.

7.5. Aplicação das abordagens bioinspiradas nas redes de comunicação

Essa seção introduz o estado da arte atual em redes bioinspiradas, abordando exemplos aplicados a diferentes paradigmas de rede. A lista de trabalhos abordados não tem a intenção de ser exaustiva no escopo de redes bioinspiradas. No entanto, os trabalhos selecionados são descritos em detalhes e representam técnicas e métodos que apresentam claros benefícios ao campo de redes de comunicação. Ao longo do texto, a modelagem e os princípios dos fenômenos biológicos e a sua aplicação no contexto de redes são destacados.

7.5.1. Inteligência de enxames e insetos sociais

Os princípios de coordenação estudados no campo de inteligência de enxames, especialmente aqueles relacionados aos insetos, proporcionam diversas ideias com relação à coordenação distribuída na Natureza [Bonabeau et al. 1999]. Em muitos casos, a comunicação direta entre insetos é explorada, como no caso da dança das abelhas [Farooq 2008], contudo, a comunicação entre insetos através da mudança do ambiente é tão fascinante quanto útil para coordenar sistemas massivamente distribuídos. Por exemplo, Ma e Krings estudaram sistemas de comunicação quimiosensora em diversas populações de formiga, mariposa e besouro [Ma and Krings 2009]. A diferença entre uma “rede sem fio” de insetos e uma rede de sensores sem fio projetada é que ao invés de codificar as mensagens com frequências de rádio, os insetos utilizam semioquímicos (também conhecidos como infoquímicos). Exemplos de aplicações da dança das abelhas vão desde algoritmos de roteamento até sistemas de detecção de intrusão [Farooq 2008]. Um outro exemplo típico

é a comunicação entre as formigas para busca de comida (forrageamento) colaborativa. A seguir é abordada a Otimização baseada em Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* - ACO) e sua aplicação em protocolos de roteamento, de alocação de tarefas e de busca em redes par-a-par.

Otimização baseada em Colônia de Formigas

A Otimização baseada em Colônia de Formigas (ACO) é talvez o ramo de algoritmos com base em inteligência de enxames mais analisado. Em geral, a inteligência de enxames tem como base a observação do comportamento coletivo de sistemas auto-organizados e descentralizados, tais como as colônias de formigas, os cardumes de peixes, os bandos de pássaros e os enxames de abelhas [Bonabeau et al. 1999]. Tais sistemas são compostos tipicamente de uma população de agentes simples, interagindo localmente entre si e com o ambiente.

Na maioria dos casos, os algoritmos baseados em inteligência de enxames são inspirados no comportamento do forrageamento das formigas [Bonabeau et al. 1999]. As formigas são capazes de resolver de uma forma simples as tarefas complexas e são “grandes mestres” na busca e exploração de alimentos. A interação entre as formigas é indireta, e ocorre através da modificação do ambiente, por meio da criação de trilhas de feromônios para a eficiência do forrageamento.

A ACO é de fato baseada nos princípios do processo de forrageamento de formigas². Conforme ilustrado na Figura 7.4, na ACO, as formigas desempenham uma busca aleatória (*random walk*) por alimento, conforme mostrado na fase 1 da figura. A volta da formiga ao ninho é marcada com uma trilha de feromônios, pela qual as formigas retornam ao ninho, mostrado na fase 2 da figura. Ao retornar, uma ampla trilha de feromônio é produzida, apontando o caminho para a fonte de alimento encontrada. Mais tarde, outras formigas são recrutadas para seguir a trilha de feromônios de menor caminho até o alimento, como mostra a fase 3 da figura. Dessa forma, elas se comunicam baseando-se nas mudanças do ambiente (trilha de feromônio), fazendo o uso da estigmergia, uma comunicação indireta que ocorre através da modificação do ambiente, para gerenciamento e colaboração.

Em [Dorigo et al. 1996, Dorigo et al. 1999], o algoritmo completo de ACO pode ser encontrado. O aspecto mais importante desse algoritmo é a *probabilidade de transição* $p_{i,j}$ para uma formiga k se movimentar de i para j . Essa probabilidade representa a informação de roteamento para o processo de exploração

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \times [\eta_{il}]^\beta} & \text{se } j \in J_i^k, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

Cada movimento depende dos seguintes parâmetros:

²Outros métodos de forrageamento, como o da bactéria *Escherichia coli*, também foram utilizados como inspiração para a comunicação eficiente em redes *ad hoc*. Um exemplo é um protocolo para a coleta de dados em redes veiculares [Lee and Suzuki 2009].

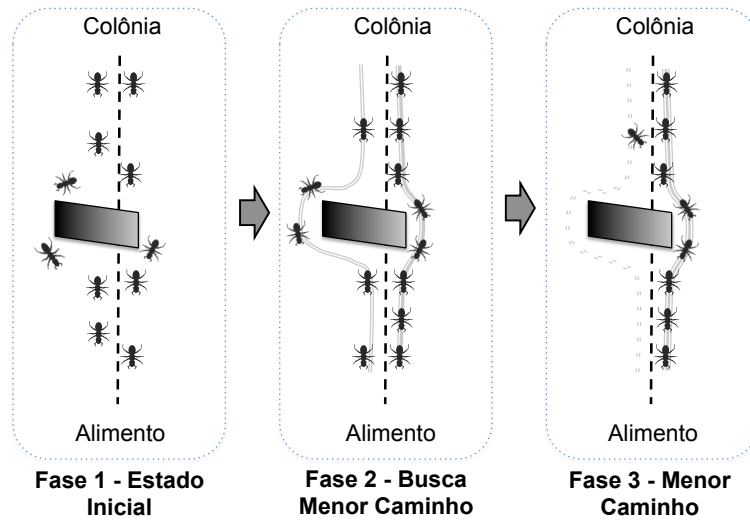


Figura 7.4. Forrageamento de formigas

- J_i^k é a lista dos nós que ainda não foram visitados, isto é, ao explorar J_i^k , uma formiga k pode evitar visitar um nó i mais de uma vez.
- η_{ij} é a visibilidade de j quando está em i , isto é, o inverso da distância.
- τ_{ij} é o nível de feromônio na aresta (i, j) , isto é, a conveniência de escolher o nó j estando atualmente no nó i .
- α e β são parâmetros ajustáveis que controlam o peso relativo da intensidade da trilha τ_{ij} e a visibilidade de η_{ij} , respectivamente.

Após completar uma volta, cada formiga k libera uma quantidade $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ de feromônio em cada aresta (i, j) , de acordo com a regra a seguir, em que $T^k(t)$ é a volta realizada pela formiga k na interação t ; $L^k(t)$ é o comprimento e Q é um parâmetro (que influencia fracamente no resultado final)

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L^k(t) & \text{se } (i, j) \in T^k(t), \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2)$$

O esquema de forrageamento das formigas considera relevante a dinâmica do ambiente. O feromônio evapora devagar, e dessa forma, se as formigas não obtiverem sucesso no forrageamento, a trilha de feromônios se dissolve e as formigas podem continuar o processo de busca. Além disso, a aleatoriedade também é um forte fator para o sucesso do forrageamento. Algumas formigas continuam a busca aleatória por alimento, e esse comportamento adaptativo leva à uma estratégia ótima de busca e exploração.

Esse efeito é obtido pela regra de atualização de feromônio, em que $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$. O enfraquecimento é implementado na forma de um coeficiente ρ sendo $0 \leq \rho < 1$.

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \times \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (3)$$

De acordo com [Dorigo et al. 1996], o número total de formigas m é um parâmetro importante do algoritmo. A presença de formigas em excesso poderia reforçar rapidamente trilhas subótimas e ocasionar uma convergência precoce às soluções ruins, enquanto que a escassez de formigas não produziria feromônio suficiente para atingir o comportamento colaborativo desejado. Desta forma, a taxa de enfraquecimento precisa ser cuidadosamente controlada. A seguir, discutiremos uma seleção de aplicações em redes que baseiam-se nos principais conceitos de ACO.

Roteamento

Provavelmente os melhores exemplos de ACO em redes sejam os protocolos de roteamento AntNet [Di Caro and Dorigo 1998] e AntHocNet [Di Caro et al. 2005]. Ambos os protocolos seguem os conceitos do roteamento de formigas. Os chamados agentes são utilizados concorrentemente para explorar a rede e trocar as informações coletadas da mesma forma que as formigas exploram o ambiente. A comunicação entre agentes é indireta (estigmergia) e é mediada pela própria rede.

O protocolo AntNet fornece uma abordagem de roteamento pró-ativa que baseia-se na ideia de lançamento periódico de agentes móveis na direção de nós escolhidos aleatoriamente. O objetivo principal desses exploradores é encontrar o caminho de custo mínimo, isto é, o caminho mais curto entre a origem e o destino, e atualizar as entradas de roteamento relacionadas a esse caminho na rede. Seguindo o algoritmo ACO, as *formigas dianteiras* procuram randomicamente pelo destino utilizando uma política estocástica gulosa. Após localizar o destino, os agentes se tornam *formigas retrógradas*, que viajam para casa seguindo o mesmo caminho utilizado para exploração. Dessa forma, todas as tabelas de roteamento dos nós no caminho são atualizadas com a informação de roteamento mais recente sobre o nó destino. Para evitar o congestionamento da rede, o protocolo AntNet mantém a probabilidade p_d de criar agentes para a exploração considerando as condições de tráfego no momento.

As tabelas de roteamento utilizadas pelos protocolos AntNet e AntHocNet são representadas por \mathcal{T}_k , que define a política probabilística do roteamento adotada no momento pelo nó k . Para cada destino d e para cada vizinho n , \mathcal{T}_k armazena um valor probabilístico P_{nd} , que expressa a qualidade (conveniência) de escolher n como o próximo salto em direção ao destino d . As probabilidades de saída são restritas por $\sum_{n \in \mathcal{N}_k} P_{nd} = 1$.

Similar ao protocolo AntNet, o protocolo AntHocNet [Di Caro et al. 2005] é inspirado no algoritmo de Otimização baseado em Colônia de Formigas (ACO) e empregado no contexto de redes *ad hoc*. O protocolo AntHocNet cria caminhos sob demanda, somente quando são necessários, e no início de uma sessão. Por isso, o protocolo AntHocNet representa uma abordagem de roteamento reativa. Outro protocolo de roteamento, chamado HOPNET [Wang et al. 2009], foi criado com base em formigas pulando entre chamadas “zonas”, e melhora a escalabilidade quando comparado ao AntHocNet. Ele consiste na descoberta pró-ativa de rotas dentro da vizinhança de um nó, e na comunicação reativa

entre as vizinhanças.

Outro trabalho a mencionar no domínio de roteamento é o roteamento auto-adaptativo multicaminhos para redes em camadas [Leibnitz et al. 2006b] [Leibnitz et al. 2006a]. Novamente, nesse protocolo a aleatoriedade é explorada para encontrar soluções ótimas na seleção de caminhos na rede. Mesmo que essa abordagem foque em respostas adaptativas dos atratores, eles podem ser comparados às formigas exploradoras e às decisões de roteamento probabilísticas.

Alocação de tarefas

Com base nos mesmos conceitos, foi investigada a integração de alocação de tarefas e roteamento em redes de sensores e atuadores (*Sensor and Actuator Networks* - SANETs) [Labella et al. 2004] [Labella and Dressler 2006]. A arquitetura proposta é baseada totalmente em decisões probabilísticas. Durante o tempo de vida da SANET, todos os nós mantêm e adaptam a probabilidade $P(i)$ de executar uma tarefa i de um dado conjunto. Estratégias de reforço são exploradas para otimizar o comportamento do sistema como um todo. Deve-se mencionar que a abordagem de alocação de tarefas e roteamento integrados representa uma solução tipicamente entre camadas (*cross-layer*). A camada de aplicação e a camada de rede são ambas responsáveis por operar a SANET inteira.

A seleção de tarefas é desempenhada pelos nós de acordo com um esquema probabilístico. Assume-se que todos os agentes sabem antecipadamente a lista de possíveis tarefas $T_{agent} = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ que eles podem executar. Cada agente k associa uma tarefa $i \in T_{agent}$ com um número real τ_{ij}^k , que está representando o nível de feromônio. A heterogeneidade é inerentemente suportada, portanto, a lista de tarefas de diferentes agentes será diferente. A probabilidade de escolher uma tarefa $P(i)$ pode ser agora calculada por (com $\beta \geq 1$ utilizado para melhorar a exploração de soluções boas):

$$P(i) = \frac{(\tau_i^k)^{\beta_{task}}}{\sum_{j \in T_{agent}} (\tau_j)^{\beta_{task}}} \quad (4)$$

Todos os agentes inicializam seus níveis de feromônio em $\tau_i^k = \tau_{init}$. Depois dessa etapa, o nível de feromônio é atualizado de acordo com as tarefas desempenhadas:

$$\tau_i^k = \begin{cases} \min(\tau_{max}, \tau_i^k + \Delta\tau) & \text{se a tarefa } i \text{ foi executada com sucesso,} \\ \max(\tau_{min}, \tau_i^k - \Delta\tau) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

O roteamento é realizado de forma similar às técnicas propostas nos protocolos AntNet e AntHocNet, com uma diferença importante. Para suportar a comunicação específica da tarefa, a tabela de roteamento é estendida para cobrir probabilidades de encaminhamento diferentes para as tarefas definidas, ou seja, um parâmetro de classe c é adicionado para cada entrada de roteamento para o destino d . Dessa forma, a probabilidade de encaminhamento é denotada por ${}_c\mathbf{R}_{nd}$. Isso permite o aproveitamento de caminhos

de comunicação específicos para as tarefas. Essa técnica pode também ser utilizada para apoiar prioridades de mensagens diferentes no processo de roteamento.

Busca em redes par-a-par

A busca em redes par-a-par (*peer-to-peer* - P2P) é usualmente realizada por meio de tabelas de pesquisa, centralizadas ou descentralizadas. Entretanto, os esforços para encontrar dados em redes par-a-par descentralizadas e desestruturadas pode facilmente se tornar um fator dominante. O uso de abordagens que se baseiam em formigas nesse contexto pode resolver alguns problemas típicos.

Uma abordagem para busca auto-organizada em redes par-a-par foi proposta em [Michlmayr 2007]. O algoritmo resultante é tipicamente uma abordagem baseada em formigas para pesquisar rotas em redes par-a-par. Ele é baseado nos resultados obtidos dos estudos do dilema do bandido multi armado, isto é, o protocolo considera o melhor momento de investigar uma informação disponível e explorar a rede explicitamente em busca de uma informação nova e melhor. Dessa forma, ele explora os melhores resultados conhecidos até o momento para a seleção de caminhos, ou pode também explorar um caminho que ainda não é conhecido como o melhor de forma a possivelmente encontrar uma solução otimizada para o problema. Se obtiver sucesso, isso irá aumentar o desempenho do sistema.

De forma parecida, Antares [Lee and Suzuki 2009], que também é um sistema de informação inspirado em formigas para grades auto-estruturadas em redes par-a-par, mantém informações em um sistema distribuído. Antares usa agentes para gerenciar o armazenamento e a replicação dos dados. Esses agentes seguem novamente os conceitos da Otimização baseada em Colônia de Formigas (ACO), ao computar probabilidades de pegar e largar de forma otimizada.

7.5.2. Sincronização de vaga-lumes

A sincronização precisa em sistemas massivamente distribuídos é uma questão complexa e difícil de atingir. Recentemente, novos modelos para sincronização de relógios foram propostos, inspirados nos princípios de sincronização dos vaga-lumes. Nesse contexto, experimentos biológicos preliminares foram conduzidos por Richmond, que também descobriu o modelo matemático por trás da sincronização dos vaga-lumes [Richmond 1930].

Basicamente, o modelo de sincronização de vaga-lumes tem como base osciladores de pulso acoplados [Mirollo and Strogatz 1990]. Nesse modelo cada oscilador, representando um vaga-lume, envia uma mensagem de sincronização para os seus vizinhos, como ilustrado na Figura 7.5. Assume-se que o tempo de propagação dessa mensagem é nulo, ou seja, quando o oscilador envia a mensagem, esta é imediatamente recebida pelos osciladores vizinhos. Uma vez que um oscilador vizinho recebe a mensagem de sincronização, ele ajusta o seu relógio interno, e ao longo do tempo, todos os osciladores convergem.

O modelo mais simples para o pulsar sincronizado dos osciladores tem como base

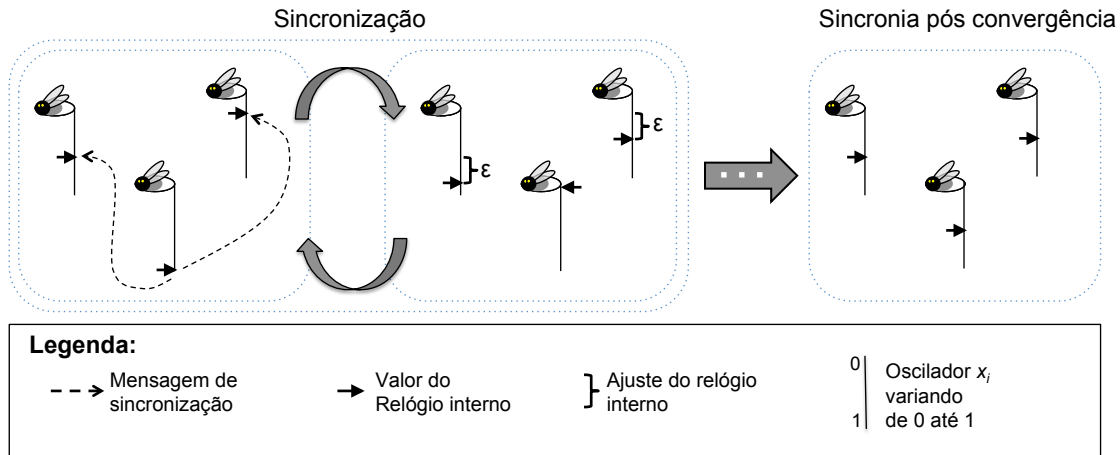


Figura 7.5. Sincronização dos vaga-lumes

uma população de osciladores idênticos. Uma variável local x_i é integrada de zero à um e o oscilador pulsa quando $x_i = 1$. Depois, o x_i retorna a zero.

$$\frac{dx_i}{dt} = S_0 - \gamma x_i \quad (6)$$

Assume-se que múltiplos osciladores interagem na forma de um simples pulso acoplado: quando um dado oscilador pulsa, ele influencia os demais osciladores a ajustar seus próprios osciladores positivamente em uma quantidade fixa ϵ , ou os leva até o limite para pulsar, aquele que for menor.

$$x_i(t) = 1 \Rightarrow \forall j \neq i : x_j(t^+) = \min(1, x_j(t) + \epsilon). \quad (7)$$

Como resultado, para quase todas as condições iniciais de populações, o pulsar evolui para um estado no qual todos os osciladores pulsam de forma sincronizada.

Esse conceito de sincronização auto-organizada de relógios foi aplicada com sucesso para sincronização em redes *ad hoc* [Tyrrell et al. 2006, Tyrrell et al. 2007]. Usando uma função linear de incremento de fase ϕ_i , o pulso local de um nó é controlado. Quando ϕ_i atinge um limite ϕ_{th} , o oscilador local pulsa. Por um período T , essa condição pode ser descrita como:

$$\frac{d\phi_i(t)}{dt} = \frac{\phi_{th}}{T} \quad (8)$$

Quando utilizados osciladores idênticos, a fase pode ser controlada de acordo com a Equação 7. Esforços adicionais são necessários para compensar o atraso na transmissão em redes *ad hoc* e de sensores. Isso pode ser feito selecionando valores apropriados para ϵ . Em particular, a mudança de fase é atualizada dinamicamente de acordo com o atraso na transmissão estimado.

A aplicação geral dessa técnica de sincronização de relógio para redes sem fio é discutida em [Tyrrell and Auer 2007]. O principal resultado é a identificação do chamado

“problema de surdez”, isto é, o problema em que os nós não conseguem receber nem transmitir simultaneamente. Isso pode ser resolvido dividindo o ciclo de sincronização em duas partes, uma para a escuta do pulso de outros nós e uma para a fase local de atualização e ação de pulsar. Isso pode ser facilmente alcançado ao dobrar o período original T para $2T$.

Além dessas aplicações, a coleta de dados baseado em sincronização para redes de sensores sem fio também foi abordada nesse contexto em [Wakamiya and Murata 2005]. A ideia é otimizar a eficiência energética para coleta periódica de dados em RSSFs. Na abordagem descrita, uma rede de sensores centrada em estação base consiste de sensores dispostos de forma concêntrica. A sincronização de vaga-lumes é utilizada para distribuir estímulos para os sensores monitorarem o ambiente e transmitirem os dados coletados para a estação base. Finalmente, um completo sensoriamento auto-organizado e coordenado é alcançado.

Um esquema de sincronização similar foi proposto para aplicação em redes em camadas [Babaoglu et al. 2007]. De forma a endereçar o problema de sincronização em redes P2P como um resultado da dinâmica da rede, das falhas e da escala, a sincronização de relógio baseada em vaga-lumes foi aplicada como uma robusta e escalável sincronização por pulso.

7.5.3. Sistemas ativador-inibidor

A base para a exploração das características dos sistemas ativador-inibidor em sistemas técnicos é a análise de mecanismos de reação-difusão. Nos anos 50, a base química da morfogênese foi analisada [Turing 1952]. Os mecanismos por trás da reação e difusão em um anel de células foram descritos com sucesso na forma de equações diferenciais. Assumindo que para as concentrações X e Y as reações químicas tendem a aumentar X a uma taxa de $f(X, Y)$ e Y a uma taxa de $g(X, Y)$, as mudanças de X e Y devido a difusão também consideram o comportamento do sistema inteiro, isto é, todas as N células vizinhas. Dessa forma, a taxa de tais reações químicas podem ser descritas pelas equações diferenciais $2N$ [Turing 1952] (em que $r = 1, \dots, N$, μ é a constante de difusão para X e ν é a constante de difusão para Y):

$$\begin{aligned}\frac{dX_r}{dt} &= f(X_r, Y_r) + \mu(X_{r+1} - 2X_r + X_{r-1}), \\ \frac{dY_r}{dt} &= g(X_r, Y_r) + \nu(X_{r+1} - 2X_r + X_{r-1}).\end{aligned}\tag{9}$$

Para aplicações em geral (independente da forma do padrão gerado ou da estrutura dos sistemas que interagem), esse conjunto de equações diferenciais pode ser escrito como (com F e G sendo funções não lineares para reações (químicas), D_u e D_v sendo as taxas de difusão dos ativadores e dos inibidores e ∇^2 sendo o operador Laplaciano):

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= f(u, v) - D_u \nabla^2 u, \\ \frac{dv}{dt} &= g(u, v) - D_v \nabla^2 v.\end{aligned}\tag{10}$$

Uma aplicação direta da fórmula de Turing é descrita em [Henderson et al. 2004]. Nessa abordagem, o padrão de formação da reação-difusão é utilizado para apoiar tarefas de alto-nível em redes de sensores, por exemplo, os padrões de liga-desliga para sensores em cenários de incêndios em florestas foram investigados. Como principal resultado, formas diferentes foram detectadas, tais como manchas e padrões em anel, que podem ser exploradas para atividades de alto nível, tais como guiar o movimento dos robôs em direção à origem do incêndio.

Em [Hyodo et al. 2007] são descritos novos experimentos e considerações na geração de padrões com base na reação-difusão em redes de sensores. Novamente, mecanismos de controle com base em reação-difusão foram investigados. De forma similar, o controle cooperativo pode ser alcançado utilizando as equações de reação-difusão, e aplicado para sistemas de vigilância [Yoshida et al. 2005].

Como pode ser visto em outras abordagens mencionadas, coordenação e controle são os principais campos de aplicação de mecanismos ativador-inibidor. A seguir, outras duas soluções são descritas, e focam na coordenação de atividades de sensoriamento em WSNs para atingir um melhor desempenho energético, isto é, maximizar o *tempo de vida de rede* [Dietrich and Dressler 2009].

Em [Neglia and Reina 2007], alguns modelos de formação de padrões são utilizados para coordenar ciclos de liga-desliga em nós sensores. Nele, permite-se que os sensores controlem seus próprios sensores e rádio. Contudo, a rede precisa continuar transmitindo dados dos sensores de forma multissalto para um ou mais agregadores, e o ciclo de liga-desliga dos nós não pode afetar a comunicação. De forma a atingir esse objetivo, o campo dos sensores opera como uma aproximação discreta, em tempo e espaço, do sistema de equação (10). Cada sensor armazena seus próprios valores de ativadores e inibidores e os difunde na rede a cada s segundos. Usando os dados recebidos, os nós vizinhos reavaliam as equações de reação-difusão. Os sensores que possuem um valor relacionado ao estado ativado que exceda um dado limite se torna ativo ligando o circuito de sensoriamento. Como mostra em [Neglia and Reina 2007], o desempenho do sistema atinge resultados surpreendentes.

De forma similar, o controle distribuído de períodos de processamento é investigado em [Dressler 2008b, Dressler 2008a]. Usando o sistema de programação de Redes de Sensores baseadas em Regras (*Rule-based Sensor Network - (RSN)*) [Dressler 2007], uma rede de sensores é configurada como um alvo de rastreamento. Nesse exemplo, o ciclo de tarefas é controlado por um sistema ativador-inibidor que considera a eficiência das observações locais e os resultados dos nós vizinhos. Ao explorar a informação transmitida em direção ao agregador, cada nó pode estimar a necessidade de mais medições locais e adequadamente atualizar seu período de coleta local.

7.5.4. Sistema Imunológico Artificial

O termo Sistema Imunológico Artificial do inglês *Artificial Immune System* (AIS) refere-se a sistemas adaptativos inspirados por estudos experimentais e teóricos da área de imunologia, e tem como objetivo a resolução de problemas [de Castro 2002]. O objetivo de um AIS, que é inspirado nos princípios e processos do sistema imunológico dos mamíferos [Hofmeyr and Forrest 2000], é detectar eficientemente mudanças no ambiente ou desvios

do comportamento padrão do sistema, no contexto de problemas complexos.

O papel do sistema imunológico mamífero pode ser sintetizado como segue: ele protege o corpo de infecções e busca continuamente por patógenos invasores, por exemplo, proteínas exógenas. Os algoritmos baseados em AIS tipicamente exploram as características de auto-aprendizado e memorização do sistema imunológico. O sistema imunológico é, na sua forma mais simples, uma cascata de detecção e adaptação, culminando em um sistema que é notavelmente efetivo. Na natureza, duas respostas imunológicas foram identificadas. A primeira é o lançamento de uma resposta a patógenos invasores levando à uma resposta não específica (usando leucócitos). Em contrapartida, a segunda resposta imunológica relembra encontros passados, isto é, representa a memória imunológica. Ela permite uma resposta mais rápida da segunda vez mostrando uma resposta bastante específica (usando linfócitos B e linfócitos T).

Um AIS consiste basicamente de três partes, que trabalham no processo de engenharia imunológica [de Castro 2002]:

- *Representação* dos componentes do sistema, isto é, o mapeamento dos componentes técnicos para antígenos e anticorpos.
- Medições de *afinidades*, ou seja, mecanismos para avaliar as interações (por exemplo, padrões de estímulos e funções de adequação) e os seus respectivos antígenos e anticorpos.
- *Processos de adaptação* para incorporar a dinâmica do sistema, isto é, seleção genética.

Um primeiro AIS foi desenvolvido por Kephart [Kephart 1994], e abordagens preliminares mostrando o sucesso da aplicação de tais AISs em sistemas de computação de comunicação foram apresentados em [Hofmeyr and Forrest 2000] [Hofmeyr 1999]. Nessa época, alguns *frameworks* foram disponibilizados. Focando na fase de engenharia de um AIS, de Castro e Timmis [de Castro 2002] propuseram um *framework* de engenharia imunológica. Um *framework* conceitual similar para Sistemas Imunológicos Artificiais para aplicação genérica em redes foi apresentado em [Stepney et al. 2005]. Mais uma vez, os três passos para o desenvolvimento do *framework* foram enfatizados: representação, seleção e medição de afinidades apropriadas e o desenvolvimento de algoritmos imunológicos. Nesse *framework*, as cadeias de Markov foram utilizadas para descrever a dinâmica do sistema.

A análise dos dados e a anomalia na detecção são domínios típicos de aplicação [de Castro 2002]. O escopo completo de um AIS é bastante amplo. Exemplos de aplicações que foram desenvolvidas com base no AIS são detecção de falhas e anomalias, mineração de dados (por exemplo, aprendizagem de máquina, reconhecimento de padrões), sistemas baseados em agentes, controle e robótica. O trabalho pioneiro de Timmis e seus colegas precisa ser mencionado como quem conceitualmente analisou o AIS e aplicou-o em vários campos de problemas [Stepney et al. 2005] [Timmis et al. 2000] [Neal and Timmis 2005].

Uma aplicação de seleção de nó e taxas distribuídas baseadas em um sistema imunológico foi proposta em [Atakan and Akan 2006]. As redes de sensores e suas

características, em particular sua taxa de transmissão, são modeladas como antígenos e anticorpos. O algoritmo de nó distribuído e a taxa de seleção (*Distributed Node and Rate Selection* - (DNRS)) para monitorar e relatar eventos é obtido com a estimulação de linfócitos B, ou seja, uma seleção de nós apropriada. Esse estímulo depende das seguintes influências: (1) a afinidade entre o nó sensor (linfócito B) e a fonte do evento (patógeno), (2) a afinidade entre o nó sensor e sua vizinhança não- correlata (linfócitos B estimulados), e (3) a afinidade entre o nó sensor e seus nós vizinhos relacionados (linfócitos B supressores). Assim, esse algoritmo explora também um esquema ativador-inibidor para otimizar a medição de afinidade em um AIS.

Um Sistema Imunológico Artificial para detecção de má-conduta em redes *ad hoc* móveis é descrito em [Le Boudec 2004]. Em particular, um AIS foi desenvolvido para detectar má-conduta no protocolo de roteamento DSR (*Dynamic Source Routing*), um protocolo de roteamento reativo típico de MANETs. Para a representação de eventos de roteamento, foram utilizadas letras do alfabeto, por exemplo, “A = RREQ enviado” ou “E = RREQ recebido”. Os anticorpos são representados pelas sequência de eventos de roteamento recebidos. Então, uma função de correspondência pode ser definida usando as sequências de letras, por exemplo, “Gene 1 = #E na sequência” (consulte [Le Boudec 2004] para maiores detalhes). Assim, o Sistema Imunológico Artificial (AIS) é utilizado para identificar um nó como “suspeito” se o antígeno corresponde com algum anticorpo. Além disso, um nó é classificado como malcomportado se a probabilidade de que o nó seja suspeito, estimado sobre um número grande o suficiente de conjunto de dados, esteja acima de um limite.

7.5.5. Disseminação epidêmica

A disseminação epidêmica é frequentemente utilizada como uma analogia para entender a disseminação de informação em redes sem fio *ad hoc*. A disseminação de informação nesse contexto pode se referir à distribuição de partículas de informação (como geralmente fornecido por técnicas de roteamento *ad hoc*) [Vogels et al. 2003] [Carreras et al. 2006], ou à disseminação de vírus pela Internet [Zou et al. 2005] [Vojnovic and Ganesh 2008] ou em dispositivos móveis [Kleinberg 2007]. Os modelos biológicos de transmissão de vírus fornecem formas para avaliar tais ameaças emergentes e para entender a epidemia como um mecanismo de comunicação para propósitos gerais (Figura 7.6).

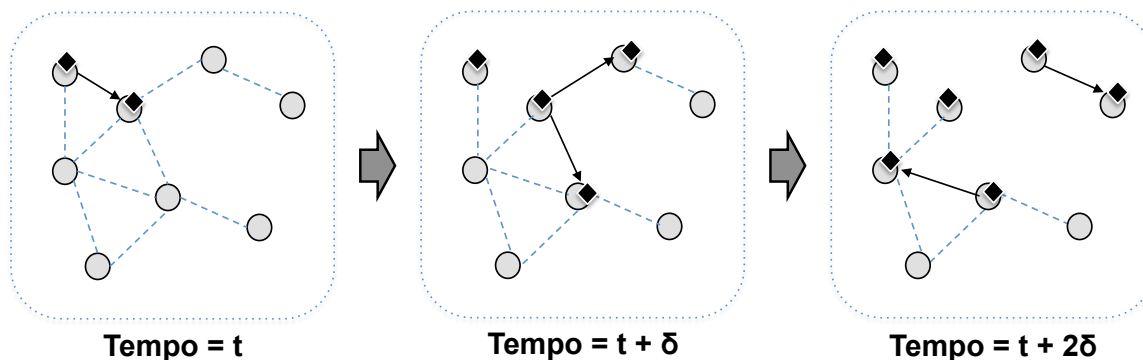


Figura 7.6. Modelo epidêmico de transmissão de mensagens

Vários modelos matemáticos de redes que se baseiam em vários pontos no nível conceitual foram investigados. De um lado estão os modelos de rede que refletem fortemente eventos espaciais, com os nós posicionados de forma fixa em duas dimensões, cada um conectado com um pequeno número de outros nós em uma pequena distância. De outro lado estão as redes livres de escala (*scale-free networks*), que são essencialmente não limitadas pela proximidade física, e no qual o número de contatos por nós pode se espalhar amplamente. A principal diferença está na disseminação epidêmica. Em redes livres de escala, a epidemia pode persistir em níveis baixos arbitrariamente, enquanto que em modelos simples de duas dimensões um nível mínimo de virulência é necessário para prevenir que a epidemia morra rápido [Kleinberg 2007].

O modelo de sistema para a disseminação epidêmica baseia-se na população, ou seja, no número de nós que representam a rede. Entidades de informação são trocadas entre os nós usando um algoritmo de difusão. Assume-se que todas as transmissões são atômicas, isto é, não existe divisão durante a difusão. Depois, todos os nós podem ser separados em dois grupos: nós suscetíveis, $S(t)$ descreve esse conjunto no tempo t , e nós infectados, $I(t)$ [Khelil et al. 2002]. O algoritmo de difusão é então um processo que converte nós suscetíveis em infectados com uma taxa $\alpha = \frac{\beta_x}{N}I(t)$, em que β é a probabilidade de transmissão da informação, isto é, a probabilidade de infecção, x descreve o número de contatos entre os nós suscetíveis, e N é o número total de nós. A taxa de infecção pode então ser descrita como:

$$\frac{dI}{dt} = \alpha \times S(t) = \frac{\beta_x}{N}I(t) \times S(t). \quad (11)$$

A medição da corretude dos nós é chamada de *centralidade de autovetor (eigenvector centrality)*. Considere um modelo gráfico da topologia da rede, sendo que A é a matriz adjacente. A centralidade de autovetor de um nó i é definida sendo proporcional à soma das centralidades de autovetores dos vizinhos de i , no qual e representa o vetor com a pontuação de centralidade dos nós. Indicando o contrário, e é o autovetor de A relativo ao autovalor k :

$$e_i = \frac{A \times e}{\lambda} \quad (12)$$

Dependendo das particularidades do cenário da aplicação, a taxa de cura, isto é, a taxa não-negativa de conversão de nós infectados, também precisa ser considerada nessa equação.

Existe um amplo raio de aplicações para a disseminação epidêmica em redes de computadores. Primeiramente, o foco é no roteamento em redes *ad hoc* móveis, com interesse crescente em roteamento oportunístico [Shah et al. 2005], no qual as mensagens são enviadas entre os dispositivos que tenham proximidade física, com o objetivo de eventualmente alcançar o destinatário específico.

Por exemplo, o entendimento da difusão de epidemias em redes móveis altamente particionadas foi estudado em [Carreras et al. 2006]. O principal campo de aplicação desse trabalho foi o uso da disseminação epidêmica em DTNs. Como conclusão, o artigo

destaca a possibilidade de medir a importância de um nó no processo de disseminação da epidemia pela centralidade de autovetor do nó. Regiões, como definida pela regra de “subida íngreme”, são *clusters* da rede em que espera-se que a difusão seja relativamente rápida e previsível. Além do mais, os nós os quais as ligações conectam regiões distintas têm um papel importante (menos rápido, menos previsível) na disseminação de uma região para outra.

As características de disseminação epidêmica de informação foram cuidadosamente modeladas para investigar características inerentes [Hayashi et al. 2006]. Por exemplo, a gerência de filas tem um papel importante e um enfileiramento probabilístico em etapas foi proposto como uma solução [Ahi et al. 2006]. Modelos detalhados foram construídos para estudar o impacto do desempenho de disseminação epidêmica [Zhang et al. 2007]. Enquanto que modelos de Markov levam a previsões de desempenho bem precisas, a solução numérica se torna impraticável se o número de nós é grande. Em [Zhang et al. 2007], um *framework* baseado em equações diferenciais comuns é apresentado e fornece escalabilidade apropriada conforme o número de nós aumenta. Essa abordagem permite a derivação de fórmulas fechadas para as métricas de desempenho enquanto obtém resultados correspondentes comparado aos modelos de Markov.

Nesse ponto de vista, o poder de epidemias para comunicação robusta em redes de larga escala foi investigado por numerosas abordagens [Vogels et al. 2003, Tsuchiya and Kikuno 2004, Okuyama et al. 2006]. O resultado interessante é que a topologia da rede tem um papel importante enquanto a epidemia pode ser aplicada para melhorar a robustez e a eficiência. Em particular, a propriedade livre de escala deve ser garantida de forma a superar possíveis problemas com transmissões que desaparecem muito rapidamente.

Um problema ligeiramente diferente (e solução) foi abordado em [Pappas et al. 2009]. A questão era se o problema de determinar a correta infraestrutura para a coleta de informação pode ser vista como uma variação do problema de projeto da rede - incluindo restrições tais como eficiência energética e redundância. Como o problema geral é NP-difícil, os autores propuseram uma heurística baseada no sistema circulatório dos mamíferos, que resultou em uma solução melhor ao problema do projeto do que as alternativas disponíveis no estado da arte. A abordagem resultante do sistema circulatório para redes de sensores sem fio é bastante similar às abordagens epidêmicas mesmo que somente a comunicação entre organismos seja utilizada como analogia.

Apesar das soluções de roteamento eficientes, a aplicação à segurança da rede é provavelmente o aspecto mais importante de modelos epidêmicos. A difusão de *worms* na Internet tem sido estudada recentemente com resultados relevantes [Vojnovic and Ganesh 2008, Kesidis et al. 2008, Zou et al. 2005].

7.5.6. Redes de sinalização celular

O termo sinalização descreve as interações de sinalização entre moléculas [Weng et al. 1999]. Tal comunicação, também chamada de caminhos de sinalização [Alberts et al. 1994] [Pawson 1995], é um exemplo de comunicação específica e eficiente. A sinalização celular ocorre em vários níveis e de múltiplas formas, conforme ilustra a Figura 7.7.

Brevemente, as interações celulares podem ser vistas como processos de duas

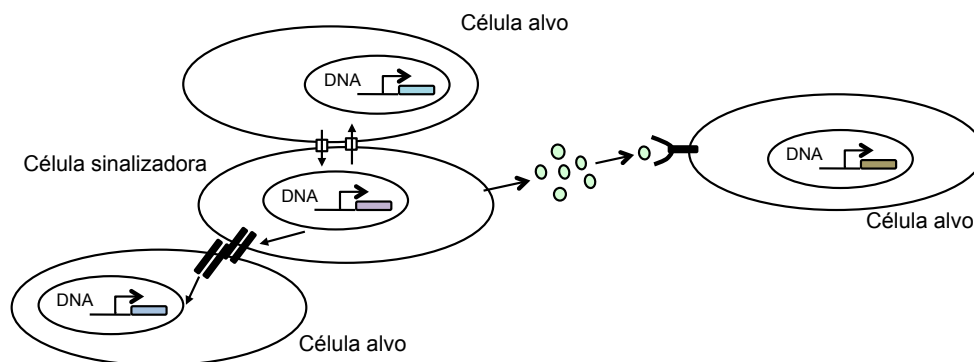


Figura 7.7. Processo de sinalização entre moléculas [Dressler and Akan 2010]

etapas. Inicialmente, uma molécula extracelular se liga à um receptor específico em uma célula alvo, convertendo o receptor inativo para um estado ativo. Em seguida, o receptor estimula caminhos bioquímicos intracelulares ocasionando uma resposta celular [Pawson 1995]. Em geral, pode-se distinguir duas técnicas de sinalização celular [Kruger and Dressler 2005], como descrito a seguir.

Sinalização intracelular - o sinal da fonte extracelular é transferido através da membrana celular. Dentro da célula alvo, cascatas de sinalização complexas são envolvidas na transferência da informação (transdução do sinal), que finalmente resulta na manifestação de um gene ou na alteração da atividade enzimática, e então, define a resposta celular.

Sinalização intercelular - células podem se comunicar através de moléculas na superfície celular. Nesse processo, a superfície celular de uma célula ou mesmo uma molécula solúvel, que é liberada por uma célula, se liga diretamente à uma molécula receptora específica em uma outra célula. Moléculas solúveis tais como hormônios podem também ser transportados através do sangue para lugares distantes.

Um desafio importante para a Biologia é entender o funcionamento das células vivas através do estudo da sua dinâmica e das suas interações. De forma a descobrir os princípios do projeto estrutural de tais redes de sinalização, motivos de rede foram definidos como padrões de interconexões correndo em redes complexas em um número que fosse significativamente maior do que aqueles em redes randômicas [Milo et al. 2002].

Algumas abordagens têm sido discutidas utilizando redes de sinalização artificiais. A maioria desses trabalhos está almejando esquemas de programação para sistemas massivamente distribuídos tais como redes de sensores. A seguir, duas das abordagens de mais sucesso serão introduzidas: RSN e *Fraglets*. Outra abordagem está na execução paralela da construção de se-então utilizando redes artificiais de sinalização celular com sistemas de classificação molecular [Decraene et al. 2006].

Redes de sensores baseadas em regras

As redes de sensores baseadas em regras, do inglês *Rule-based Sensor Networks* - (RSN) é um esquema de programação leve para SANETs [Dressler 2007] [Dressler et al. 2009]. Ele é baseado na arquitetura de encaminhamento, agregação e processamento de mensagens

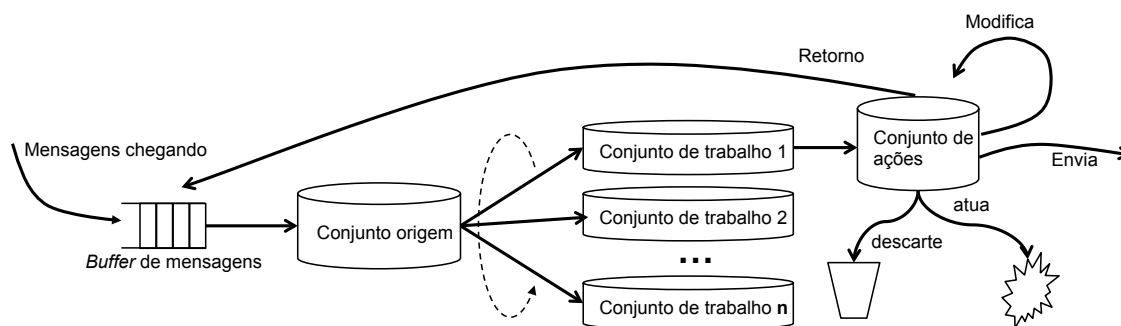


Figura 7.8. Comportamento de um único nó na rede RSN [Dressler and Akan 2010]

centrada em dados, isto é, usando mensagens auto-descritivas ao invés de endereços únicos em toda a rede. Foi mostrado que as RSNs podem superar outros protocolos de SANET para o sensoriamento distribuído e pré-processamento de dados centrados em rede em duas dimensões: (a) reatividade da rede, isto é, o tempo de resposta de atuadores controlados pela rede pode ser reduzido, e (b) *overhead* de comunicação, isto é, a utilização de banda nos canais de transmissão sem fio foi melhorada.

A Figura 7.8 ilustra o comportamento de um nó da rede de sensores baseada em regras. Após receber uma mensagem, ela é armazenada em um *buffer* de mensagens. O interpretador de regras ou é iniciado periodicamente (após um Δt fixo) ou após o recebimento de uma nova mensagem. Um sistema de regras flexível e extensível é utilizado para avaliar as mensagens recebidas e fornecer a base para o esquema de programação. A reação específica nos dados recebidos é alcançada através de sequências de atributo-ação na forma de *se ATRIBUTO, então {AÇÃO}*.

Primeiro, todas as mensagens que correspondem ao atributo são armazenadas nos chamados grupos de trabalho. Finalmente, a ação especificada é executada em todas as mensagens do grupo. Usando tais conjuntos-regras, pode ser modelado um comportamento dinâmico e complexo. Exemplos são aplicações de monitoramento de eventos em redes de sensores ou rastreamentos de alvos sob restrições energéticas. Em sistemas biológicos, tal comportamento pode ser modelado (ou estudado) utilizando redes de sinalização e padrões repetitivos.

O período Δt para a execução de uma RSN foi identificado como um parâmetro chave para o controle da reatividade em relação ao desempenho energético de toda a Rede de Sensores baseada em Regras (RSN). Basicamente, a duração das mensagens armazenadas no nó local introduz um atraso artificial por salto. O valor ótimo de Δt afeta a qualidade da agregação com relação ao processamento das mensagens em tempo real. Um sistema ativador-inibidor foi aplicado com sucesso para resolver esse problema [Dressler 2008a] (consulte a Seção 4.3).

Fraglets

Um modelo de execução metabólica para protocolos de comunicação foi nomeado *Fraglets* [Tschudin 2003]. Similar às RSNs, esse modelo também tem como base o conceito

de comunicação centrada em dados. Além disso, a execução se baseia na unificação de código e de dados, caracterizando uma única unidade chamada “*fraglets*” que são tanto operandos como operadores. Os *fraglets* têm vínculos com métodos formais assim como com a biologia molecular. A nível de teoria, os *fraglets* pertencem à linha de sistemas de reescrita de termos. Em particular, os *fraglets* são cadeias de símbolos $[s_1 : s_2 : \dots fim]$ que representam dados e/ou lógica, onde *fim* é uma sequência de símbolos (possivelmente vazio). Cada nó na rede tem um lugar para armazenar os *fraglets* quando chegam. O nó examina continuamente o armazenamento de *fraglets* e identifica quais *fraglets* precisam ser processados. Ações simples levam a transformações de um único *fraglet*. Ações mais complexas combinam dois *fraglets*. Se muitas ações são possíveis de uma vez só, o sistema escolhe uma ação aleatoriamente, remove atómicamente do armazenamento o *fraglet* envolvido, processa, e coloca o resultado potencial de volta no armazenamento [Tschudin 2003].

A Tabela 7.2 lista algumas das regras típicas de transformação e reação de *fraglets* em eventos selecionados.

Operação	Entrada	Saída
Regras de Transformação		
nul	$[nul : fim]$	- (<i>fraglet</i> é removido)
dup	$[dup : t : u : fim]$	$[t : u : u : fim]$
split	$[split : t : \dots : * : fim]$	$[t : \dots], [fim]$
send	$A[send : B : fim]$	$B[fim]$
Regras de Reação		
match	$[match : s : fim_1]$,	$[fim_1 : fim_2]$
(fundir)	$[s : fim_2]$	
matchP	$[matchP : s : fim_1]$	$[fim_1 : fim_2]$
(persistir)	$[s : fim_2]$	$[matchP : s : fim_1]$

Tabela 7.2. Regras de transformação e reação típicas de *fraglets*, onde * é a posição do marcadores para separar os *fraglets* e $x[\dots]$ especifica o lugar onde o *fraglet* é armazenado.

Usando o sistema de *fraglets*, operações centradas em rede podem ser especificadas para serem executadas por nós participantes após o recebimento de um *fraglet* específico. Um exemplo simples de programação de *fraglet* é o protocolo de entrega confirmada (*confirmed-delivery* - (CDP)) que transfere os *fraglets* recebidos $[cdp : dado]$ de A a B, com confirmação de recebimento a cada pacote [Tschudin 2003]:

$$A[matchP : cdp : send : B : deliver],$$

$$B[matchP : deliver : split : send : A : ack : *].$$

Pesquisas adicionais em *fraglets* foram conduzidas focando resiliência e robustez

Grupo	Áreas de atuação	Bioinspiração
Uni. de Tecnologia de Chemnitz	Localização e mapeamento	Mecanismos neurais
Autonomous Learning Laboratory	redes de probabilidade, RSSFs	Aprendizado biológico, redes neurais
Computational Intelligence Group	RSSFs, redes <i>ad hoc</i>	Bactérias, redes neurais, Inteligência de Enxames
Preetam Ghosh	RSSFs, redes complexas	Topologias biológicas
Non-Standard Computation	redes auto-organizáveis	Formações celulares
Intelligent Systems and Networks	RSSFs, Redes <i>ad hoc</i>	Redes neurais

Tabela 7.3. Grupos de pesquisa em redes bioinspiradas

[Tschudin and Yamamoto 2004], programas de auto-modificação e auto-replicação utilizando *fraglets* [Yamamoto et al. 2007], e a extensibilidade do sistema de *fraglets*, por exemplo, primitivas criptográficas foram adicionadas para fornecer medidas de segurança para os sistemas de *fraglets* [Petrocchi 2006].

7.6. Grupos, projetos e eventos científicos da área

Nesta seção, apresentamos uma visão geral dos grupos de pesquisa e dos projetos existentes no campo de redes de comunicação bioinspirada. Enfatizamos as técnicas bioinspiradas utilizadas nos projetos, assim como as aplicações e os principais problemas tratados pelos grupos. Por fim, apresentamos os principais veículos de divulgação científica relacionados às redes de comunicação bioinspiradas. Na Tabela 7.3, descrevemos brevemente os grupos de pesquisa, e em seguida, apresentamos o resumo dos projetos na Tabela 7.4, a fim de facilitar consultas posteriores. Finalizamos, a seção apresentando a Tabela 7.5 com uma lista dos principais veículos de divulgação científica na área, incluindo os principais eventos e periódicos.

Grupos de pesquisa

A Universidade de Tecnologia de Chemnitz [Che] possui diversos projetos nas áreas de localização de veículos, veículos aéreos e reconhecimento espacial. Eles dão foco ao problema de localização e mapeamento em tempo real (*SLAM - Simultaneous localization and mapping*), empregando em suas soluções mecanismos baseados em redes neurais. Além disso, também trabalham com simulações de robôs e sensores.

O laboratório *Autonomous Learning Laboratory* (ALL) [ALL], da Universidade de Massachusetts Amherst, conduz pesquisa interdisciplinar a cerca de aprendizado de máquina e modelos computacionais de aprendizado biológico. Os objetivos a longo prazo do laboratório são desenvolver agentes artificiais mais capazes e melhorar o entendimento do aprendizado biológico e sua base neural. Eles possuem publicações nas áreas de redes de probabilidade e RSSFs, utilizando-se de aprendizado biológico e redes neurais.

O grupo *Computational Intelligence Group* [CIG], da Universidade de Kent, conduz pesquisas interdisciplinares entre a ciência da computação e os domínios da biociência e cognição. Para isso, as pesquisas do laboratório envolvem a aplicação de simulações computacionais na biologia e medicina, sistemas biológicos e bioinformática, e computação bioinspirada. Eles possuem publicações nas áreas de RSSFs e de redes *ad hoc*, envolvendo inspiração em comunidades de bactérias, redes neurais, e inteligência de enxames.

Nome do Projeto	Financiador	Área de pesquisa	URL
ANA	EU FET	Arquiteturas e princípios de redes autônomas	http://www.anaproject.org/
BioNet	NSF, DARPA	Arquiteturas de redes bioinspiradas para planejamento e implementação de aplicação de rede escaláveis, adaptativas e capazes de sobreviver	http://netresearch.ics.uci.edu/bionet/
BIONETS	EU FET	Evolução de serviços bioinspirados para a era pervasiva	http://www.bionets.eu/
CASCADAS	EU FET	Comunicações autônomas e que consideram o contexto, e serviços dinamicamente adaptáveis	http://www.cascadasproject.org/
ECagents	EU FET	Agentes comunicantes interagindo diretamente com o mundo físico	http://ecagents.istc.cnr.it/
Haggle	EU FET	Comunicações autônomas e localizadas	http://www.haggleproject.org/
MC	NSF, DARPA	Comunicação molecular como solução para comunicação entre nano-máquinas	http://netresearch.ics.uci.edu/mc/
Swarmanoid	EU FET	Projeto, implementação e controle de um novo sistema robótico distribuído	http://www.swarmanoid.org/
Swarm-bots	EU FET	Projeto e implementação de objetos auto-organizáveis e auto-montáveis	http://www.swarmbots.org/
WASP	EU IP	Auto-organização de nós e serviços e Redes de Sensores sem fio (WSNs)	http://www.waspproject.org/

Tabela 7.4. Projetos de pesquisa aplicando técnicas bioinspiradas em redes (Tabela atualizada a partir de [Dressler and Akan 2010])

O grupo liderado por Preetam Ghosh [PG], da Universidade de Virginia Commonwealth, tem interesses nas áreas gerais de modelagem e simulação de redes complexas, com foco nas redes biológicas e computação distribuída. Suas pesquisas envolvem RSSFs, redes complexas e são normalmente inspiradas em topologias biológicas, como as redes reguladoras de genes.

O NSC (*Non-Stantard Computation*) [NSC], da Universidade de York, pesquisa sobre abordagens computacionais inspiradas na realidade, ou seja, que buscam suas inspirações no mundo natural (biologia, química, física). Seus tópicos de pesquisa em redes envolvem as redes auto-organizáveis, baseando-se biologicamente em estruturas de formações celulares.

O grupo *Intelligent Systems and Networks* [ISN], do Imperial College de Londres atua na área de redes e realiza pesquisas interdisciplinares. Eles visam o estudo teórico e prático de protocolos e agentes que melhorem a qualidade de serviço e a resiliência de redes cabeadas e sem fio. O grupo possui publicações nas áreas de RSSFs e redes *ad hoc*, e seus pesquisadores se inspiram em redes neurais para aprendizado.

Projetos e veículos de divulgação científica na área

Como forma de ilustrar pesquisas que vêm sendo realizadas através de projetos financiados no mundo inteiro, a Tabela 7.4 resume alguns projetos encontrados na literatura como forma de motivar demais pesquisadores. Essa tabela não pretende ser exaustiva, mas sim ilustrar os projetos existentes. Em geral, estes vêm sendo (ou foram) financiados por

agências de fomento norteamericanas e européias. Para finalizar, a Tabela 7.5 registra os principais veículos de divulgação científica na área.

Veículos de divulgação científica		URL
Conferências e workshops		
Bionetics	International Conference on Bio inspired Models of Network, Information and Computing Systems	www.bionetics.org/
Biowire	Workshop on Bio-inspired Design of Wireless Networks and Self-Organising Networks	www.usukita.org/?q=node/225
EvoCOMNET	European Workshop on Nature-inspired Techniques for Telecommunications and other Parallel and Distributed Systems	www.evostar.org/
Bionetworks	Workshop on Socially and Biologically Inspired Wired and Wireless Networks (juntamente com IEEE MASS 2007)	www.san.ee.ic.ac.uk/bionets07/
BLISS	The 2008 ECSIS Symposium on Bio-inspired, Learning, and Intelligent Systems for Security	www.see.ed.ac.uk/bliss08/
BADS	International Workshop on Bio-Inspired Algorithms for Distributed Systems (juntamente com IEEE ICAC 2009)	www.bads.icar.cnr.it/
Journals e edições especiais		
ICST	Transactions on Bio-Engineering and Bio-inspired Systems	www.icst.org/
Journal of Bio-Inspired Computation Research (JBICR)		www.ripublication.com/jbicr.htm
Inderscience International Journal of Bio-Inspired Computation (IJ-BIC)		www.inderscience.com/ijbic
Elsevier Ad Hoc Networks	Special Issue on Bio-inspired Computing and Communication in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks	www.elsevier.com/locate/ahoc
IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)	Special Issue on Bio-inspired Networking	www.jsac.ucsd.edu/
Springer Transactions on Computational Systems Biology (TCSB)	Special Issue on Biosciences and Bio-inspired Information Technologies	www.springer.com/series/7322
Springer Soft Computing	Special Issue on Distributed Bio-inspired Algorithms	www.springer.com/engineering/journal/500
Springer Swarm Intelligence	Special Issue Swarm Intelligence for Telecommunications Networks	www.springer.com/computer/artificial/journal/11721
Inderscience International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems (IAACS)	Special Issue on Bio-inspired Wireless Networks	www.inderscience.com/ijaacs

Tabela 7.5. Veículos de divulgação científica na área

7.7. Considerações finais e direções futuras

Este trabalho ressaltou as similaridades entre os desafios existentes em redes de comunicação e a Biologia. Dentre os desafios, aqueles relacionados ao desenvolvimento das redes da próxima geração foram elucidados, tais como o aumento da complexidade proveniente da larga escala, a dinamicidade das redes auto-organizadas, a heterogeneidade das arquiteturas, o controle e a infraestrutura descentralizados, a necessidade de sobrevivência e de

tolerância a falhas. As técnicas bioinspiradas, cujas aplicações consistem em problemas relacionados a esses desafios, foram descritas e associadas aos mesmos. A metodologia de desenvolvimento de técnicas bioinspiradas, que tem como base a modelagem de sistemas biológicos, foi apresentada, enfatizando suas vantagens para as redes de comunicação e para a Biologia.

Conhecendo o potencial das técnicas bioinspiradas para as redes de comunicação, um conjunto delas foi selecionado e descrito, contemplando aquelas inspiradas na inteligência de enxames e insetos sociais, na sincronização de vaga-lumes, em sistemas ativador-inibidor, no sistema imunológico artificial, na disseminação epidêmica e na sinalização celular. Para cada técnica apresentada, suas aplicações em redes de comunicação foram detalhadas e exemplificadas. Este trabalho finalizou com a listagem dos principais grupos científicos na área, projetos e veículos de divulgação científica.

Direções futuras

Apesar da existência de muitos trabalhos aplicando técnicas bioinspiradas, muito espaço para pesquisa e evolução nesse tema ainda pode ser observado quando focamos a área de redes de comunicação. Melhorias em termos das analogias entre sistemas computacionais e sistemas biológicos ainda são necessárias. A criação de modelos que auxiliem não apenas em soluções para redes de comunicação, mas também para entender o comportamento dos sistemas biológicos é um requisito para a evolução desse campo de pesquisa e suas aplicações. No Brasil, percebemos poucos pesquisadores aplicando técnicas bioinspiradas em redes de comunicação. Dentre esses, a minoria tem esse tema como foco de suas pesquisas ou se preocupam com a criação de modelos inspirados na Biologia. Outra observação consiste na grande maioria dos grupos aplicarem técnicas bioinspiradas mais tradicionais e evolucionárias, como redes neurais e inteligência de enxames. Neste minicurso tentamos enfatizar o potencial existente em redes bioinspiradas fora da aplicação comum desse tipo de técnica.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo programa Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologias Digitais para Informação e Comunicação (CTIC) da Rede Nacional de Pesquisa (RNP) do Brasil.

O desenvolvimento deste trabalho não teria sido possível sem a assistência de todos os membros do grupo de pesquisa BioNet (www.bionet.ufpr.br), em especial, o auxílio de Elisa Mannes.

Referências

[ALL] Autonomous Learning Laboratory. <http://all.cs.umass.edu/index.shtml>. [Online; acessado 27-fevereiro-2013].

[CIG] Computational Intelligence Group. <http://www.cs.kent.ac.uk/research/groups/compint/index.html>. [Online; acessado 27-fevereiro-2013].

[ISN] Intelligent Systems and Networks. <http://www3.imperial.ac.uk/IntelliSysNetworks>. [Online; acessado 27-fevereiro-2013].

- [NSC] Non-Standard Computation (NSC). <http://www.cs.york.ac.uk/research/research-groups/nsc/>. [Online; acessado 27-fevereiro-2013].
- [PG] Preetam Ghosh. http://www.people.vcu.edu/~pghosh/index_files/Page426.html. [Online; acessado 27-fevereiro-2013].
- [Che] Universidade de Tecnologia de Chemnitz. <http://www.tu-chemnitz.de/etit/proaut/forschung/index.html.en>. [Online; acessado 27-fevereiro-2013].
- [Ahi et al. 2006] Ahi, E., Çağlar, M., and Özkasap, O. (2006). Stepwise probabilistic buffering for epidemic information dissemination. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*.
- [Akan and Akyildiz 2005] Akan, O. and Akyildiz, I. (2005). Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13(5):1003 – 1016.
- [Akyildiz et al. 2004] Akyildiz, I., Akan, Ö., Chen, C., Fang, J., and Su, W. (2004). The state of the art in interplanetary internet. *IEEE Communications Magazine*, 42(7):108 – 118.
- [Akyildiz et al. 2002] Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393 – 422.
- [Akyildiz et al. 2005a] Akyildiz, I., Wang, X., and Wang, W. (2005a). Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks*, 47(4):445 – 487.
- [Akyildiz et al. 2008] Akyildiz, I. F., Brunetti, F., and Blázquez, C. (2008). Nanonetworks: A new communication paradigm. *Computer Networks*, 52(12):2260 – 2279.
- [Akyildiz and Kasimoglu 2004] Akyildiz, I. F. and Kasimoglu, I. H. (2004). Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2(4):351 – 367.
- [Akyildiz et al. 2006] Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., and Mohanty, S. (2006). Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 50(13):2127 – 2159.
- [Akyildiz et al. 2005b] Akyildiz, I. F., Pompili, D., and Melodia, T. (2005b). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3):257 – 279.
- [Alberts et al. 1994] Alberts, B., Bray, D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., and Watson, J. D. (1994). *Molecular Biology of the Cell*. Garland Science.
- [Ashby 1962] Ashby, W. R. (1962). Principles of the self-organizing system. *Principles of Self-organization: Transactions of the University of Illinois Symposium*, pages 255 – 278.
- [Ashok and Agrawal 2003] Ashok, R. L. and Agrawal, D. (2003). Next-generation wearable networks. *Computer*, 36(11):31 – 39.
- [Atakan and Akan, Ö.B. 2007] Atakan, B. and Akan, Ö.B. (2007). Immune system-based energy efficient and reliable communication in wireless sensor networks. In *Advances in Biologically Inspired Information Systems: Models, Methods, and Tools*, volume 69 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 187 – 207. Springer.
- [Atakan and Akan 2007a] Atakan, B. and Akan, O. (2007a). Biologically-inspired spectrum sharing in cognitive radio networks. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 43 – 48.

- [Atakan and Akan 2006] Atakan, B. and Akan, O. B. (2006). Immune system based distributed node and rate selection in wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 1 – 8.
- [Atakan and Akan 2007b] Atakan, B. and Akan, O. B. (2007b). An information theoretical approach for molecular communication. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 33 – 40.
- [Babaoglu et al. 2007] Babaoglu, O., Binci, T., Jelasity, M., and Montresor, A. (2007). Firefly-inspired heartbeat synchronization in overlay networks. In *Proceedings of the International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO)*, pages 77 – 86.
- [Bak et al. 1988] Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1988). Self-organized criticality. *Phys. Rev. A*, 38:364–374.
- [Barabási and Albert 1999] Barabási, A.-L. and Albert, R. (1999). Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439):509 – 512.
- [Bonabeau et al. 1999] Bonabeau, M., Dorigo, M., and Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press.
- [Boukerche et al. 2008] Boukerche, A., Oliveira, H., Nakamura, E., and Loureiro, A. (2008). Vehicular ad hoc networks: A new challenge for localization-based systems. *Computer Communications*, 31(12):2838 – 2849.
- [Camazine et al. 2003] Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N., Sneyd, J., G., T., and Bonabeau, E. (2003). *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press.
- [Carlson and Doyle 1999] Carlson, J. M. and Doyle, J. (1999). Highly optimized tolerance: A mechanism for power laws in designed systems. *Physical Review E*, 60:1412 – 1427.
- [Carlson and Doyle 2002] Carlson, J. M. and Doyle, J. (2002). Complexity and Robustness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99:2538 – 2545.
- [Carreras et al. 2006] Carreras, I., Miorandi, D., Canright, G. S., and Engo-Monsen, K. (2006). Understanding the spread of epidemics in highly partitioned mobile networks. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 1 – 8.
- [Chlamtac et al. 2003] Chlamtac, I., Conti, M., and Liu, J. J.-N. (2003). Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges. *Ad Hoc Networks*, 1(1):13–64.
- [Csete and Doyle 2004] Csete, M. and Doyle, J. (2004). Bow ties, metabolism and disease. *Trends in Biotechnology*, 22(9):446 – 450.
- [de Castro 2002] de Castro, L. N. (2002). *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*. Springer-Verlag, London.
- [Decraene et al. 2006] Decraene, J., Mitchell, G., and McMullin, B. (2006). Evolving artificial cell signaling networks using molecular classifier systems. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 1 – 8.

- [Di Caro and Dorigo 1998] Di Caro, G. and Dorigo, M. (1998). Antnet: Distributed stigmergetic control for communications networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 9:317 – 365.
- [Di Caro et al. 2005] Di Caro, G., Ducatelle, F., and Gambardella, L. (2005). Anthocnet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks. *European Transactions on Telecommunications*, 16(5):443 – 455.
- [Dietrich and Dressler 2009] Dietrich, I. and Dressler, F. (2009). On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 5(1):5:1 – 5:39.
- [Dobson et al. 2006] Dobson, S., Denazis, S., Fernández, A., Gäiti, D., Gelenbe, E., Massacci, F., Nixon, P., Saffre, F., Schmidt, N., and Zambonelli, F. (2006). A survey of autonomic communications. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 1(2):223 – 259.
- [Dorigo et al. 1999] Dorigo, M., Di Caro, G., and Gambardella, L. (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, 5(2):137 – 172.
- [Dorigo et al. 1996] Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(1):29 – 41.
- [Doyle et al. 2005] Doyle, J. C., Alderson, D. L., Li, L., Low, S., Roughan, M., Shalunov, S., Tanaka, R., and Willinger, W. (2005). The "robust yet fragile" nature of the Internet. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(41):14497 – 14502.
- [Dressler 2007] Dressler, F. (2007). *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*. John Wiley & Sons.
- [Dressler 2008a] Dressler, F. (2008a). Bio-inspired feedback loops for self-organized event detection in sanets. In *Proceedings of the International Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS)*, pages 256 – 261.
- [Dressler 2008b] Dressler, F. (2008b). Self-organized event detection in sensor networks using bio-inspired promoters and inhibitors. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 10:1 – 10:8.
- [Dressler and Akan 2010] Dressler, F. and Akan, Ö. B. (2010). A survey on bio-inspired networking. *Computer Networks*, 54(6):881–900.
- [Dressler et al. 2009] Dressler, F., Dietrich, I., German, R., and Kruger, B. (2009). A rule-based system for programming self-organized sensor and actor networks. *Computer Networks*, 53(10):1737 – 1750.
- [Eigen and Schuster 1979] Eigen, M. and Schuster, P. (1979). *The Hypercycle: A Principle of Natural Self Organization*. Springer.
- [Farooq 2008] Farooq, M. (2008). *Bee-Inspired Protocol Engineering: From Nature to Networks*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1 edition.
- [Forestiero et al. 2007] Forestiero, A., Mastroianni, C., and Spezzano, G. (2007). Antares: an ant-inspired p2p information system for a self-structured grid. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 151 – 158.

- [Hayashi et al. 2006] Hayashi, H., Hara, T., and Nishio, S. (2006). On updated data dissemination exploiting an epidemic model in ad hoc networks. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 3853:306 – 321.
- [Henderson et al. 2004] Henderson, T. C., Venkataraman, R., and Choikim, G. (2004). Reaction-diffusion patterns in smart sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, (ICRA)*, pages 654 – 658.
- [Hofmeyr and Forrest 2000] Hofmeyr, S. and Forrest, S. (2000). Architecture for an artificial immune system. *Evolutionary Computation*, 8(4):443 – 473.
- [Hofmeyr 1999] Hofmeyr, S. A. (1999). *An immunological model of distributed detection and its application to computer security*. PhD thesis.
- [Hyodo et al. 2007] Hyodo, K., Wakamiya, N., Nakaguchi, E., Murata, M., Kubo, Y., and Yanagihara, K. (2007). Experiments and considerations on reaction-diffusion based pattern generation in a wireless sensor network. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*., pages 1 – 6.
- [Kephart 1994] Kephart, J. O. (1994). A biologically inspired immune system for computers. In *Proceedings of the International Workshop on Synthesis and Simulation of Living Systems*, pages 130 – 139.
- [Kesidis et al. 2008] Kesidis, G., Hamadeh, I., Jin, Y., Jiwasurat, S., and Vojnović, M. (2008). A model of the spread of randomly scanning internet worms that saturate access links. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 18(2):6:1 – 6:14.
- [Khelil et al. 2002] Khelil, A., Becker, C., Tian, J., and Rothermel, K. (2002). An epidemic model for information diffusion in manets. In *Proceedings of the ACM International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pages 54 – 60.
- [Kleinberg 2007] Kleinberg, J. (2007). Computing: The wireless epidemic. *Nature*, 449(7160):287 – 288.
- [Kruger and Dressler 2005] Kruger, B. and Dressler, F. (2005). Molecular Processes as a Basis for Autonomous Networking. *Transactions on Advances Research: Issues in Computer Science and Engineering*, 1(1):43 – 50.
- [Labella et al. 2004] Labella, T. H., Dorigo, M., and Deneubourg, J.-L. (2004). Self-organised task allocation in a group of robots. In *Proceedings of the International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS)*, pages 389 – 398.
- [Labella and Dressler 2006] Labella, T. H. and Dressler, F. (2006). A bio-inspired architecture for division of labour in sanets. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 1 – 8.
- [Lad et al. 2007] Lad, M., Oliveira, R., Zhang, B., and Zhang, L. (2007). Understanding resiliency of internet topology against prefix hijack attacks. In *Proceedings of the IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*, pages 368 – 377.
- [Le Boudec 2004] Le Boudec, J.-Y. (2004). An Artificial Immune System Approach to Misbehavior Detection in Mobile Ad-Hoc Networks. In *Proceedings of the International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT)*, pages 96 – 111.

- [Lee and Suzuki 2009] Lee, C. and Suzuki, J. (2009). An immunologically-inspired autonomic framework for self-organizing and evolvable network applications. *ACM Trans. Auton. Adapt. Syst.*, 4(4):22:1–22:34.
- [Lee et al. 2007] Lee, C., Wada, H., and Suzuki, J. (2007). Towards a biologically-inspired architecture for self-regulatory and evolvable network applications. In *Advances in Biologically Inspired Information Systems*, volume 69 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 21 – 45. Springer.
- [Leibnitz et al. 2006a] Leibnitz, K., Wakamiya, N., and Murata, M. (2006a). Biologically inspired self-adaptive multi-path routing in overlay networks. *Communications of the ACM*, 49(3):63 – 67.
- [Leibnitz et al. 2006b] Leibnitz, K., Wakamiya, N., and Murata, M. (2006b). Resilient multi-path routing based on a biological attractor selection scheme. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 3853:48 – 63.
- [Ma and Krings 2009] Ma, Z. S. and Krings, A. W. (2009). Insect sensory systems inspired computing and communications. *Ad Hoc Networks*, 7(4):742 – 755.
- [Meisel et al. 2010] Meisel, M., Pappas, V., and Zhang, L. (2010). A taxonomy of biologically inspired research in computer networking. *Comput. Netw.*, 54(6):901–916.
- [Metcalfe 2000] Metcalfe, B. (2000). The next-generation internet. *IEEE Internet Computing*, 4(1):58 – 59.
- [Michlmayr 2007] Michlmayr, E. (2007). Self-organization for search in peer-to-peer networks. *Studies in Computational Intelligence*, 69:247 – 266.
- [Milo et al. 2002] Milo, R., Shen-Orr, S., Itzkovitz, S., Kashtan, N., Chklovskii, D., and Alon, U. (2002). Network motifs: Simple building blocks of complex networks. *Science*, 298(5594):824 – 827.
- [Mirollo and Strogatz 1990] Mirollo, R. E. and Strogatz, S. H. (1990). Synchronization of pulse-coupled biological oscillators. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 50(6):1645–1662.
- [Nakano et al. 2005] Nakano, T., Suda, T., Moore, M., Egashira, R., Enomoto, A., and Arima, K. (2005). Molecular communication for nanomachines using intercellular calcium signaling. In *Proceedings of the IEEE Conference on Nanotechnology*, volume 2, pages 478 – 481.
- [Neal and Timmis 2005] Neal, M. and Timmis, J. (2005). Once More Unto the Breach: Towards Artificial Homeostasis? In *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, pages 340–365.
- [Neglia and Reina 2007] Neglia, G. and Reina, G. (2007). Evaluating activator-inhibitor mechanisms for sensors coordination. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 129 – 133.
- [Okuyama et al. 2006] Okuyama, T., Tsuchiya, T., and Kikuno, T. (2006). Improving the robustness of epidemic communication in scale-free networks. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 3853:294 – 305.
- [Pappas et al. 2009] Pappas, V., Verma, D., Ko, B.-J., and Swami, A. (2009). A circulatory system approach for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 7(4):706 – 724.

- [Pawson 1995] Pawson, T. (1995). Protein modules and signalling networks. *Nature*, 373(6515):573 – 580.
- [Perlman 2001] Perlman, R. (2001). Myths, missteps, and folklore in protocol design. In *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*.
- [Petrocchi 2006] Petrocchi, M. (2006). Crypto-fraglets: Networking, biology and security. In *Proceedings of the Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems*, pages 1 – 5.
- [Richmond 1930] Richmond, C. A. (1930). Fireflies flashing in unison. *Science*, 71:537 – 538.
- [Shah et al. 2005] Shah, R., Wietholter, S., Wolisz, A., and Rabaey, J. (2005). When does opportunistic routing make sense? In *Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom)*, pages 350 – 356.
- [Stepney et al. 2005] Stepney, S., Smith, R. E., Timmis, J., Tyrrell, A. M., Neal, M. J., and Hone, A. N. W. (2005). Conceptual frameworks for artificial immune systems. *International Journal of Unconventional Computing*, 1(3):315 – 338.
- [Suzuki and Suda 2002] Suzuki, J. and Suda, T. (2002). Adaptive behavior selection of autonomous objects in the bio-networking architecture. *1st Annual Symposium on Autonomous Intelligent Networks and Systems*.
- [Tanaka 2005] Tanaka, R. (2005). Scale-rich metabolic networks. *Physical Review Letters*, 94.
- [Timmis et al. 2000] Timmis, J., Neal, M., and Hunt, J. (2000). An artificial immune system for data analysis. *Biosystems*, 55:143 – 150.
- [Tschudin 2003] Tschudin, C. (2003). Fraglets - a metabolic execution model for communication protocols. In *Proceedings of the Annual Symposium on Autonomous Intelligent Networks and Systems (AINS)*.
- [Tschudin and Yamamoto 2004] Tschudin, C. and Yamamoto, L. (2004). A metabolic approach to protocol resilience. In *Proceedings of the IFIP International Workshop on Autonomic Communication (WAC)*, pages 2 – 5.
- [Tsuchiya and Kikuno 2004] Tsuchiya, T. and Kikuno, T. (2004). An adaptive mechanism for epidemic communication. In *Proceedings of the International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (BioADIT)*, volume 3141 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 306 – 316.
- [Turing 1952] Turing, A. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Royal Society of London*, 237:37.
- [Tyrrell and Auer 2007] Tyrrell, A. and Auer, G. (2007). Imposing a reference timing onto firefly synchronization in wireless networks. In *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pages 222 – 226.
- [Tyrrell et al. 2006] Tyrrell, A., Auer, G., and Bettstetter, C. (2006). Fireflies as role models for synchronization in ad hoc networks. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*.
- [Tyrrell et al. 2007] Tyrrell, A., Auer, G., and Bettstetter, C. (2007). Biologically inspired synchronization for wireless networks. *Studies in Computational Intelligence*, 69:47 – 62.

- [Vogels et al. 2003] Vogels, W., Van Renesse, R., and Birman, K. (2003). The power of epidemics: Robust communication for large-scale distributed systems. In *Computer Communication Review*, volume 33, pages 131–135.
- [Vojnovic and Ganesh 2008] Vojnovic, M. and Ganesh, A. (2008). On the race of worms, alerts, and patches. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(5):1066 – 1079.
- [Wakamiya and Murata 2005] Wakamiya, N. and Murata, M. (2005). Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks. *IEICE Transactions*, 88-B(3):873 – 881.
- [Wang et al. 2009] Wang, J., Osagie, E., Thulasiraman, P., and Thulasiraman, R. K. (2009). Hopnet: A hybrid ant colony optimization routing algorithm for mobile ad hoc network. *Ad Hoc Networks*, 7(4):690 – 705.
- [Wang and Suda 2000] Wang, M. and Suda, T. (2000). The bio-networking architecture: A biologically inspired approach to the design of scalable, adaptive, and survivable/available network applications. Technical report.
- [Webb 2000] Webb, B. (2000). What does robotics offer animal behaviour? *Animal Behaviour*, 60(5):545 – 558.
- [Welbourne et al. 2009] Welbourne, E., Battle, L., Cole, G., Gould, K., Rector, K., Raymer, S., Balazinska, M., and Borriello, G. (2009). Building the internet of things using RFID: The RFID ecosystem experience. *IEEE Internet Computing*, 13(3):48 – 55.
- [Weng et al. 1999] Weng, G., Bhalla, U., and Iyengar, R. (1999). Complexity in biological signaling systems. *Science*, 284(5411):92 – 96.
- [Yamamoto et al. 2007] Yamamoto, L., Schreckling, D., and Meyer, T. (2007). Self-replicating and self-modifying programs in fraglets. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)*, pages 159 – 167.
- [Yi et al. 2000] Yi, T. M., Huang, Y., Simon, M. I., and Doyle, J. (2000). Robust perfect adaptation in bacterial chemotaxis through integral feedback control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9):4649 – 53.
- [Yoshida et al. 2005] Yoshida, A., Aoki, K., and Araki, S. (2005). Cooperative control based on reaction-diffusion equation for surveillance system. In *Proceedings of the International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems (KES)*, volume 3683, pages 533 – 539.
- [Zhang et al. 2007] Zhang, X., Neglia, G., Kurose, J., and Towsley, D. (2007). Performance modeling of epidemic routing. *Computer Networks*, 51(10):2867 – 2891.
- [Zhou et al. 2002] Zhou, T., Carlson, J. M., and Doyle, J. (2002). Mutation, specialization, and hypersensitivity in highly optimized tolerance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(4):2049–2054.
- [Zou et al. 2005] Zou, C., Gong, W., Towsley, D., and Gao, L. (2005). The monitoring and early detection of internet worms. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13(5):961 – 974.