

Introdução à Computação Circulatória

Alberto A. Kopiler¹

¹Programa de Engenharia de Sistemas e Computação – PESC/COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Caixa Postal 68.511 – 21.941-972 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

kopiler@cos.ufrj.br

***Abstract.** Since the early years of the computer theory there has been a quest for ideas inspired by nature. Many of these turn out to be successful computing techniques, such as: neural networks, genetic algorithms, evolutionary computing, swarm intelligence, artificial immune systems, ant colony optimization, etc. More recently, IBM introduced the autonomic computing inspired by the human autonomic nervous system. In this context the circulatory computing (CIRCOM) inspired by the human circulatory system is presented as an improvement of the autonomic computing, being more suitable for the characterization of the autonomous properties among other advantages.*

***Resumo.** Desde os primórdios da teoria da computação são buscadas idéias inspiradas na natureza. Muitas vezes elas se transformam em técnicas computacionais de sucesso, como por exemplo: redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, computação evolucionária, inteligência de enxames, sistema imunológico artificial, colônia de formigas, etc. Mais recentemente, a IBM introduziu a computação autônoma inspirada no sistema nervoso autônomo humano. Neste contexto é apresentado o modelo de computação circulatória (CIRCOM), inspirado no sistema circulatório humano e com melhorias em relação à computação autônoma, sendo mais adequado para caracterização das propriedades autônomas, além de outras vantagens.*

1. Introdução

Os sistemas computacionais atuais são muito complexos e frágeis. Muitos dos sistemas atuais, apesar de proverem muitas funcionalidades aos usuários, também estão sujeitos a falhas com efeitos catastróficos, dificuldades de manutenção e repletos de vulnerabilidades a ataques externos [Forbes 2004].

Um objetivo importante da computação é ser capaz de construir sistemas que possam funcionar com altos níveis de autonomia, gerenciar enormes quantidades de dados de forma robusta, configurar a si mesmos automaticamente pelas redes de computadores, reconfigurar a si mesmos quando partes estão danificadas ou destruídas, processar rapidamente grandes quantidades de dados de uma forma maciçamente paralela, aprender a partir de seu ambiente com o mínimo de intervenção humana, e “evoluir” para se adaptar melhor para a tarefa na qual foi projetado [Wooley 2005].

Para isso é apresentada a computação circulatória inspirada em sistemas biológicos, mais precisamente no sistema circulatório humano [Kopiler 2007]. É feita

uma abordagem sistêmica, fazendo uma analogia entre componentes biológicos e componentes computacionais, de forma a gerar mecanismos que possibilitem a construção de um sistema computacional inteligente com autonomia para se manter funcionando de forma permanente, otimizada, protegida, mesmo em condições de stress ou colapso parcial. As bases do modelo proposto são o sistema nervoso circulatório e a computação autônoma. Designa-se este novo modelo de computação circulatória ou CIRCOM – Circulatory Computing.

2. Trabalhos Relacionados

Desde os primórdios da teoria da computação são buscadas idéias inspiradas na natureza que muitas vezes se transformam em técnicas computacionais de sucesso. Como exemplo podem ser citadas as técnicas de: redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, computação evolucionária, inteligência de enxames, sistema imunológico artificial, colônia de formigas, etc [Sterritt 2005].

Em um nível mais metafórico, a IBM recentemente tomou a iniciativa de desenvolver pesquisa em computação inspirada em sistemas biológicos. Mais especificamente, a IBM lançou a idéia de Computação Autônoma em 2001, a partir de um *manifesto* [IBM 2001]. A computação autônoma é inspirada na biologia, mais em particular no sistema nervoso autônomo (SNA) e visa realizar abstrações desejáveis em sistemas computacionais complexos, que possibilitem seu controle. A computação autônoma foi concebida como uma maneira de gerenciar ambientes computacionais distribuídos e cada vez mais complexos, uma vez que abordagens tradicionais de gerenciamento de sistemas estão alcançando seu limite. O sistema nervoso autônomo libera a parte consciente do cérebro de ter que manejar as funções vitais de mais baixo nível. A computação autônoma requer que um sistema seja capaz de se configurar e reconfigurar em condições imprevisíveis (incertas) e que estão constantemente variando, para continuamente otimizar sua operação, para se recuperar de eventos rotineiros ou extraordinários que podem fazer com que algumas partes funcionem mal, de forma análoga ao processo de cura em sistemas biológicos, e para se proteger contra ameaças em seu ambiente (externo). A funcionalidade de autogerenciamento é alcançada através de aspectos chave como autoconfiguração, auto-recuperação, auto-otimização e autoproteção [Kephart and Chess 2003].

Apesar de ser inspirada em sistemas biológicos, a computação autônoma está relacionada ao SNA de uma forma extremamente metafórica. Com isso, mais funcionalidades proporcionadas por outras inspirações biológicas acabaram não sendo nela exploradas.

Outro trabalho relacionado pertinente é a computação pessoal autônoma [Bantz et al. 2003], ou seja, a aplicação da computação autônoma no ambiente de computação pessoal.

O modelo de computação circulatória, apresentado mais adiante, está mais próximo de um sistema biológico, sendo menos metafórico e incorporando mais inspirações biológicas (apoptose, batimento e pulsação cardíaca e inteligência de enxames) e de forma mais consistente que a computação autônoma.

3. Sistema Circulatório

As seguintes características do sistema circulatório humano serviram de inspiração para a computação circulatória:

- a) As células sanguíneas (hemácias, plaquetas e glóbulos brancos) e suas funcionalidades respectivas (fornecimento de recursos, recuperação e proteção);
- b) O sistema circulatório, através de seus vasos, chega diretamente a quase todas as células (exceto aos neurônios);
- c) As hemácias têm um tempo de vida pré-definido ao final do qual elas se autodestroem (apoptose);
- d) Batimento cardíaco;
- e) Pulsação cardíaca;
- f) Sistema de circulação fechado;
- g) Pequena e grande circulação;
- h) Geração distribuída de novas células sanguíneas;
- i) Cooperação entre células sanguíneas na coagulação com sinalização por rastros químicos;
- j) Renovação das células sanguíneas.

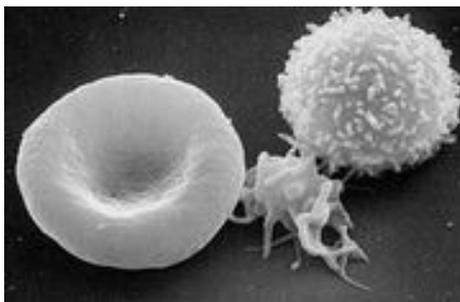


Figura 1. Hemácia, Plaqueta e Glóbulo Branco. Fonte: [Internet 2007a]

4. Computação Circulatória

O contexto onde está inserido o modelo de computação circulatória pode ser visto na Figura 2.

Sistemas Inspirados na Natureza

- Sistemas Inspirados em Sistemas Biológicos
 - Sistemas Inspirados no Organismo Humano
 - Sistemas Baseados no Sistema Nervoso
 - Sistemas Baseados no Sistema Nervoso Autônomo
 - Computação Autônoma**
 - Computação Autônoma Pessoal
 - Sistemas Baseados no Sistema Circulatório
 - Computação Circulatória**

Figura 2 – Breve Taxonomia de Sistemas Biológicos que Inspiram Sistemas Computacionais.

Neste modelo, analogamente à computação autônoma, para alcançar a funcionalidade de autogerenciamento, são utilizadas as propriedades básicas: autoconfiguração, auto-recuperação, auto-otimização e autoproteção [Parashar and Hariri 2005]. Além destas, são acrescentadas as propriedades de auto-ajuste e auto-adaptação. Este conjunto de propriedades autônomas é chamado abreviadamente neste trabalho de conjunto de *auto* propriedades.

Para explicação das propriedades adicionais é necessária a apresentação do gerenciador da computação circulatória e do recurso gerenciado por ele.

Na Figura 3 são mostrados os componentes e as principais interações entre eles para um único gerenciador circulatório e um único recurso gerenciado por ele. O recurso, também chamado de elemento gerenciado, é o que está sendo transformado em um elemento mais autogerenciável. Este pode ser um único sistema (ou mesmo uma aplicação dentro de um sistema), ou pode ser uma coleção de vários sistemas logicamente relacionados. Os sensores provêm uma maneira de se obter dados de medição do recurso, e os atuadores provêm uma forma de modificar o comportamento do recurso. Os gerenciadores circulatórios lêem os dados dos sensores e manipulam os atuadores para fazer com que os recursos se tornem mais autogerenciáveis.

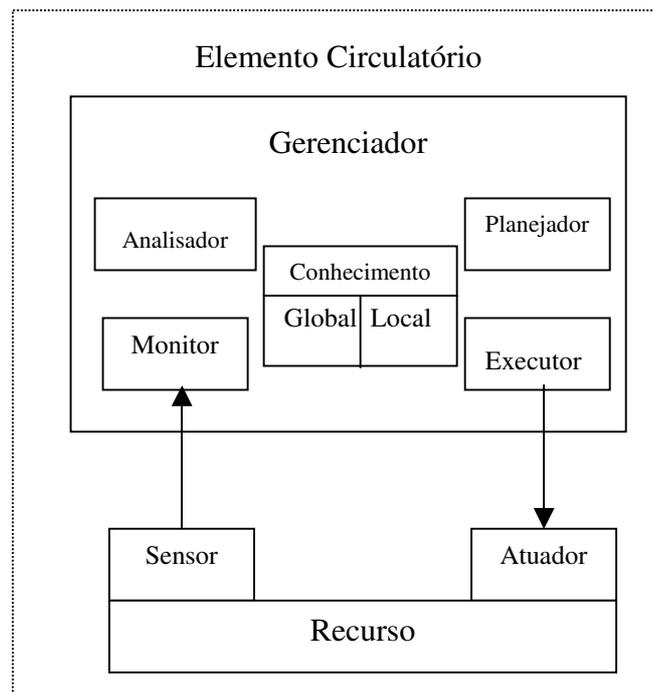


Figura 3 – Gerenciador Circulatório e o Recurso Gerenciado. Adaptado: [Diao, Y. et al. 2005].

O gerenciador circulatório contém componentes para monitorar, analisar, planejar e executar (arquitetura MAPE), e comum a todos eles estão: o conhecimento do ambiente computacional, os acordos de nível de serviço e outras considerações relacionadas. O conjunto formado pelo elemento gerenciador (gerenciador circulatório) e pelo elemento gerenciado (recurso) é denominado elemento circulatório.

A ação de juntar o gerenciador ao recurso é chamada de acoplamento. O acoplamento pode ser classificado como estático ou dinâmico. No acoplamento estático a junção do gerenciador ao recurso é permanente, não podendo ser alterada. No acoplamento dinâmico a junção do gerenciador ao recurso é temporária.

A propriedade de auto-ajuste se refere ao ajuste dos parâmetros do próprio elemento gerenciador, diferenciando-a da propriedade de autoconfiguração que se refere à configuração dos parâmetros do elemento gerenciado (recurso). A propriedade de auto-adaptação se refere à evolução do sistema como um todo, ou seja, a uma nova versão de regras (locais e globais) e parâmetros embutidos no item conhecimento do elemento gerenciador.

As características deste novo modelo, que o diferencia do modelo de computação autônoma, são a inspiração no sistema circulatório humano, a integração e a correlação das *auto* propriedades, a incorporação de inspirações biológicas de forma menos metafórica e o efetivo mapeamento das propriedades principais em elementos biológicos reais, com o objetivo de facilitar a compreensão de sistemas a serem modelados e o acoplamento dinâmico em contraste ao estático.

Por exemplo, no novo modelo a função de auto-otimização é exercida pelas hemácias, a de auto-recuperação pelas plaquetas, a de autoproteção pelos glóbulos brancos. A exceção é a propriedade de autoconfiguração que está presente em cada um destes elementos, não havendo um mapeamento direto desta propriedade.

A idéia principal é a de que o sistema, para atingir o autogerenciamento, cria e delega às células sanguíneas a monitoração, análise e execução das funções associadas às propriedades autônomas. Estas células sanguíneas artificiais (elementos gerenciadores) são distribuídas através da rede de computadores (“sangue”), migrando para os computadores que possuem processos (células ou órgãos) que devem ser gerenciados (elementos gerenciados). As células sanguíneas (plaquetas, glóbulos brancos e hemácias) são os elementos gerenciadores e só são considerados elementos circulatórios no momento que se acoplam ao recurso gerenciado (acoplamento dinâmico). Se não forem necessárias neste momento ou já tiverem cumprido seu papel de gerenciamento, migram para outra máquina, até retornarem para o computador que as deu origem.

Assim como as células sanguíneas, estes elementos gerenciadores têm um tempo de vida prefixado (“data de validade”) ao final do qual se autodestroem. Mas, ao longo de sua “vida” capturam e salvam importantes informações que servirão para a evolução do software do elemento gerenciador das futuras versões de células sanguíneas (auto-adaptação). Estas informações também são úteis para correlação de eventos entre propriedades autônomas, de forma que as medidas a serem tomadas por um elemento gerenciador levem também em consideração o que está sendo executado por outros elementos gerenciadores. Por exemplo, a disponibilização pelo elemento gerenciador de mais recursos computacionais (memória ou processamento) para um elemento gerenciado, pode estar associada a uma necessidade real, mas pode estar associado a um mau funcionamento do sistema (processo em *loop*), ou mesmo a um ataque de um vírus.

4.1. Princípios

Na computação circulatória:

- a) A **hemácia** artificial tem o papel de fornecedor de recursos para o sistema, ou seja, faz a função de auto-otimização dos sistemas computacionais, administrando os recursos necessários para o funcionamento otimizado do sistema (ex: memória, processamento, etc.);
- b) O **glóbulo branco** artificial tem o papel de defensor do sistema, ou seja, faz a função de autoproteção dos sistemas computacionais (de forma preventiva);
- c) A **plaqueta** artificial tem o papel de mantenedora do sistema, ou seja, faz a função de auto-recuperação dos sistemas computacionais (de forma corretiva);
- d) Está disponível mecanismo que permite que estes elementos artificiais se comuniquem (similar a mensagens químicas), funcionando de forma integrada, coordenada, correlacionada e distribuída;
- e) As células sangüíneas artificiais são criadas com tempo de vida pré-determinado ao final do qual se autodestroem (apoptose) [Sterrit and Hinchey 2005];
- f) Está disponível mecanismo que avisa que a célula sangüínea está “viva” (similar ao batimento cardíaco) [Sterrit and Hinchey 2005];
- g) Está disponível mecanismo que informa a “pulsção” da célula sangüínea que ainda está “viva” (similar à medição de frequência cardíaca) [Sterrit and Hinchey 2005], para fins de avaliação de desempenho do elemento;
- h) Cada célula sangüínea é um gerenciador circulatório;
- i) Está disponível mecanismo de *loop* global que permite a auto-adaptação e a criação de novas células sangüíneas e sua distribuição pelo sistema;
- j) Está disponível internamente em cada célula sangüínea mecanismo de *loop* local que permite a monitoração, análise, planejamento e execução de ações;
- k) O funcionamento do sistema é ininterrupto;
- l) São fornecidas estratégias globais a serem seguidas, na forma de regras e parâmetros;
- m) São fornecidas estratégias locais, na forma de regras e parâmetros, a serem seguidas dependentes da função de especialização (autoproteção, auto-recuperação e auto-otimização);
- n) São fornecidas estratégias locais, na forma de regras e parâmetros, a serem seguidas independentes da função de especialização (auto-ajuste e autoconfiguração).

4.2. Elementos

Os elementos principais deste modelo são: coração, células sangüíneas (glóbulos brancos, hemácias e plaquetas) e as vias do sangue (artérias/arteríolas/capilares e veias/vênulas). Os elementos complementares são: a medula óssea, o baço, os outros órgãos e as células. Os elementos adicionais são as células-tronco e os órgãos-tronco.

4.3. Funcionalidades

A seguir, é descrita sucintamente a funcionalidade de cada um dos elementos que compõem o modelo:

- a) **Coração** – Responsável por emitir um sinal de sobrevivência com uma frequência – batimentos por minuto (bpm). No nosso modelo cada elemento autônomo deverá possuir um “coração” indicando se o elemento “está vivo” e um “pulso” indicando seu estado parassimpático (desacelerado) ou simpático (acelerado).
- b) **Hemácias** – Responsáveis pelo controle de recursos do sistema. Servem para a parte monitora do sistema quanto aos recursos e executam a otimização.
- c) **Glóbulos Brancos** – Responsáveis pela proteção do sistema, colhem informações das “células” de todos os órgãos (componentes do sistema) e executam a proteção.
- d) **Plaquetas** – Responsáveis pela monitoração do sistema quanto à necessidade de manutenção do sistema – e executam a recuperação.
- e) **Artérias, arteríolas, capilares** – Assim como no sistema circulatório toda célula do sistema é irrigada pelo sangue, fazendo com o que os glóbulos brancos e as hemácias cheguem a elas, a metáfora de nosso sistema computacional deve ser capaz de ter esta característica. Servem para a comunicação do sistema.
- f) **Veias, vênulas** – Assim como as artérias chegam a todas as células e permitem o retorno do sangue para o coração. Esta característica de ciclo corresponde ao sistema vascular fechado, sendo interessante para a “leitura” das informações colhidas pelos glóbulos brancos, hemácias e plaquetas e pela correlação entre elas.
- g) **Órgãos** – Metáfora para os componentes computacionais que compõem o sistema, exceto o coração, a medula óssea e o baço que têm função específica.
- h) **Medula óssea e baço** – Geram novas células sangüíneas contendo tanto regras globais quanto locais. As regras globais devem estar sintonizadas com a estratégia global definida em alto nível de abstração. A estratégia global pode ser alterada em tempo–real. Conforme o sistema chega a novos níveis de equilíbrio (aprendizagem) as regras locais originais podem ser adaptadas e esta adaptação se refletir na nova geração de células sangüíneas.
- i) **Células** – São as partes que compõem os componentes de software (programas, *threads*, processo ou agente de software).
- j) **Células-tronco** – São células que podem ser diferenciadas para recompor qualquer “órgão” e criar novas células sangüíneas. Podem assumir a funcionalidade de qualquer outra célula do corpo. No nosso modelo corresponde a uma nova versão de um programa, *threads*, processo ou agente de software.
- k) **Órgãos-tronco** – Pode substituir um órgão como um todo ou ser acrescentado com a mesma funcionalidade por redundância ou por necessidade. O paralelo seria com um transplante de órgãos. No nosso modelo corresponde a um componente sobressalente (*spare*) ou a uma nova versão do componente.

4.4. Considerações

Como o escopo de técnicas inspiradas na natureza é muito amplo, mesmo sua restrição ao sistema circulatório, ainda o deixa muito amplo no que diz respeito à gama

de aplicações e conseqüentemente a prova de conceito desta nova técnica. Para tanto é apresentado o seguinte problema: um sistema computacional distribuído possui diversos processos executando em dois ou mais computadores. Conforme são necessários mais recursos (ex: memória, processamento, etc...) estes são fornecidos, por um sistema operacional. Um processo pode demandar mais memória e esta ser fornecida, e então demandar mais memória até provocar a falência do sistema. Esta demanda incontida pode ser provocada não pela necessidade real do processo, mas por outras causas, como por exemplo, a infestação do sistema por vírus ou um mau funcionamento interno do sistema.

A idéia, portanto, é enfatizar o inter-relacionamento das propriedades autônomas, de forma semelhante a que é feita pelas células sanguíneas, mais especificamente ao trabalho cooperativo direto das plaquetas na função de coagulação do sangue e subsidiário das hemácias para satisfazer a mesma função [Internet 2007b]. Ou seja, a decisão de se fornecer mais memória a um determinado processo irá depender do estado de outras variáveis que não estavam sendo correlacionadas anteriormente.

5. Conclusão

Foi apresentada uma proposta baseada na circulação sanguínea para modelagem de autogerenciamento de sistemas complexos. Esta proposta foi baseada em uma metáfora com o sistema circulatório humano, sendo feita uma abstração do mesmo, em que diversos detalhes foram propositadamente omitidos, para simplificação do modelo. O modelo proposto surgiu da influência da computação autônoma e de sua metáfora com o sistema circulatório humano, sendo denominado de Computação Circulatória, em inglês, CIRculatory COMputing, ou "CIRCOM".

Tabela 1. Comparação entre a Computação Autônoma e a Computação Circulatória

	Computação Autônoma	Computação Circulatória
Inspiração Biológica	Fraca	Forte
Fundamentação das propriedades autônomas	Fraca	Forte
Inter-relacionamento das propriedades autônomas	Fraca	Forte
Adaptação	Não apresenta	Forte
Acoplamento	Estático	Dinâmico

Conforme reforçada pela comparação exibida na Tabela 1, as melhorias da computação circulatória em relação ao modelo já existente de computação autônoma são o acréscimo da metáfora do sistema circulatório e das células sanguíneas para

reforçar as *auto* propriedades e de outras inspirações biológicas, como, por exemplo, os batimentos e pulsações do coração, a apoptose e a liberação de substâncias químicas pelas células sanguíneas, que dão ênfase à forma integrada como as *auto* propriedades devem ser analisadas de forma a obter-se, efetivamente, o autogerenciamento. Ou seja, o novo modelo, feito a partir da composição com o modelo autônomo, dá ênfase à necessidade de análise integrada das informações, não ficando restrito à mera apresentação de *auto* propriedades, mas contém explicitamente a orquestração de seus componentes e o fluxo de informação. Conclui-se, portanto, que o modelo de sistema circulatório apresentado é um importante complemento para a computação autônoma.

A ênfase deste artigo foi apresentar de forma geral a computação circulatória e sua estrutura estática. Em artigos futuros sua estrutura dinâmica será detalhada, além de ser explorada a tecnologia de agentes móveis e adaptativos (aprendizagem) para construção de um protótipo para prova de conceito.

Referências

- Bantz, D. F. et al. (2003), “Autonomic Personal Computing”, IBM Systems Journal, vol. 42, no 1, p. 165-176.
- Diao, Y. et al. (2005), “Self-Managing Systems: A Control Theory Foundation”, Proceedings of the 12th IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS 05) .
- Forbes, N. (2004), Imitation of Life: How Biology is Inspiring Computing, MIT Press, Cambridge, MA.
- IBM Corporation (2001), “Autonomic Computing: IBM’s Perspective on the State of Information Technology”, IBM.
- Internet (2007a), <http://www.daviddarling.info/images/platelet.jpg>.
- Internet (2007b), http://pennhealth.com/health_info/animationplayer/clotting.html.
- Kephart, J. O. and Chess, D. M. (2003), “The Vision of Autonomic Computing”, IEEE Computer Society.
- Kopiler, A. A. (2007), Gerenciamento de Infra-estrutura de Sistemas Computacionais Inspirado em sistemas Biológicos, Exame de Qualificação, PESC/COPPE, UFRJ.
- Parashar M. and Hariri, S. (2005), “Autonomic Computing: An Overview”, J.-P. Banâtre et al. (Eds.): UPP 2004, LNCS 3566, p. 247–259, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Sterritt et al. (2005), “A Concise Introduction to Autonomic Computing”, Advanced Engineering Informatics, Elsevier, vol. 19, p. 181-187.
- Sterritt, R. and Hinchey, M. (2005), “From Here to Autonomicity: Self-Managing Agents and the Biological Metaphors that Inspire Them”, Integrated Design and Process Technology, IDPT-2005.
- Wooley, J. et al. (2005), Catalyzing Inquiry at the Interface of Computing and Biology, Washington, DC, USA, National Academic Press.