

PLANO DE TRABALHO PARA PROJETO DE PESQUISA

**“PiramidNet - Redes Neurais Modulares e Hierárquicas:  
Fundamentos e Aplicações em Robótica”**

Mauro Roisenberg  
mauro@inf.ufsc.br

Departamento de Informática e de Estatística  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC

## **Sumário**

1. Contexto e motivação
2. Estado da arte
3. Principais resultados de pesquisa anterior e impacto na carreira do coordenador
4. Objetivos Gerais
5. Objetivos Específicos
6. Metodologia
7. Cronograma
8. Orçamento detalhado
9. Referências bibliográficas

## **Palavras-chave**

- Inteligência Computacional
- Redes Neurais
- Aprendizado
- Arquiteturas de Redes Neurais
- Emergência da Inteligência
- Agentes Autônomos

## 1. Contexto e motivação

As áreas de robótica e inteligência computacional são áreas que se encontram hoje em dia experimentando grande desenvolvimento dentro da informática. A robótica tem sido requisito fundamental em inúmeras aplicações nos dias de hoje. Entre elas podemos citar: o transporte de peças e ferramentas nos ambientes industriais, escavação e transporte de minérios em minas subterrâneas, exploração submarina, manutenção de equipamentos petrolíferos a grandes profundidades, exploração espacial, investigação de vulcões, construção e manutenção de estradas, vigilância, etc [2] [8] [12] [13] [14].

Entretanto as técnicas de computação tradicionalmente utilizadas raramente se aplicam em aplicações industriais e robóticas.

A inteligência computacional é uma das técnicas que mais se prestam para desenvolver aplicações dotadas de alto grau de inteligência e robustez e que operam em ambientes dinâmicos e hostis, como é o caso da robótica. No entanto, entre as várias abordagens atualmente englobadas pela inteligência computacional, nem todas se prestam para implementação de agentes inteligentes nestas áreas de aplicação, como é o caso, por exemplo, das técnicas da abordagem simbólica. Por outro lado, seres vivos, sejam eles mamíferos, aves, insetos ou mesmo vermes, apresentam uma capacidade de operação e adaptação no mundo real bastante superior aos agentes inteligentes artificialmente desenvolvidos.

Porque procurar na Natureza, em especial nos fenômenos biológicos, os paradigmas para o desenvolvimento de sistemas computacionais mais eficazes e capazes de resolver os problemas propostos?

A motivação para tomar esta inspiração biológica vem da suposição que a Natureza, com seus mecanismos, buscou resolver um problema de otimização [8]. A idéia cada vez mais aceita hoje em dia, é de que a Natureza procura um ótimo. Pesquisadores com Rashevsky[21] e Rosen[28] têm procurado mostrar como os fenômenos biológicos obedecem a leis perfeitamente expressas de forma matemática, bem com a importância dos conceitos de otimização em biologia.

Se a Natureza é fonte de inspiração, então é natural que as Redes Neurais Artificiais sejam as ferramentas utilizadas para implementar a inteligência e o controle dos sistemas robóticos, uma vez que elas são o correspondente modelo computacional do sistema nervoso, que dá inteligência e determina o comportamento dos seres vivos.

As Redes Neurais Artificiais têm se mostrado uma excelente ferramenta para resolver uma série de classes de problemas. Entretanto, segundo alguns pesquisadores, quando utilizadas em aplicações grandes e complexas, problemas de escalabilidade começam a ocorrer. De modo a tentar resolver este problema de escalabilidade, podemos novamente utilizar a Natureza como inspiração. Na biologia, o processo evolutivo desenvolveu estruturas modulares nos cérebros dos seres vivos, que os tornam capazes de realizar tarefas muito complexas, como por exemplo, sobreviver e se reproduzir em ambientes muitas vezes hostis e dinâmicos.

Este projeto propõe que a inspiração biológica pode ser a fonte de mecanismos e soluções que, uma vez entendidos e implementados no ambiente computacional, permitirão entender, projetar e construir Redes Neurais Artificiais em Estruturas

Modulares e Hierárquicas, capazes de serem aplicadas em robôs, a fim de desenvolver agentes inteligentes com alto grau de autonomia e utilidade [27].

## **2. Estado da arte**

Agentes Autônomos (AAs) são sistemas que possuem uma interação duradoura com um ambiente dinâmico externo, estando normalmente instalados fisicamente em mecanismos. Eles são dotados de rodas ou outros meios de locomoção e sensores e projetados para funcionarem por longos períodos de tempo, operando em um ciclo que envolve a aquisição de informações do ambiente e a geração de dados de saída. Na sua interação com o ambiente externo, os AAs podem influenciar a dinâmica deste ambiente, porém dificilmente podem controlá-lo completamente [15]. A operação destes sistemas envolve principalmente problemas navegacionais, tais como fugir de obstáculos, vagar no ambiente sem esbarrar em objetos, atingir uma posição determinada, etc [2] [12].

Nas suas aplicações mais comuns, os agentes operam no mundo real, ou seja, em ambientes chamados "Ambientes Abertos". Um Ambiente Aberto é aquele que não é cem por cento conhecido, podendo apresentar obstáculos e eventos imprevisíveis. A operação dos AAs nestes ambientes está associada a uma série de problemas. Em primeiro lugar é impossível descrever completamente o ambiente e os obstáculos que o agente irá encontrar; os ambientes abertos apresentam constantemente eventos e situações imprevisíveis que podem levar a replanejamentos e novas ações. Desenvolver Agentes Autônomos capazes de realizar suas tarefas operando em ambientes abertos, dinâmicos e desestruturados, de maneira autônoma, tem sido um desafio para muitos pesquisadores de áreas como Robótica e Inteligência Artificial [2] [12] [13] [17] [18] [19].

Os AAs desenvolvidos por estes pesquisadores apresentam uma performance de operação em tempo-real no mundo real infinitamente inferior quando comparada à dos organismos biológicos. Assim, se os mecanismos utilizados pela Natureza foram capazes de desenvolver sistemas (os animais) que apresentam uma extraordinária performance de operação e sobrevivência, parece interessante e promissor tentar estudar e utilizar estes mecanismos naturais a fim de desenvolver modelos que, assim como os animais, funcionariam muito bem no mundo real. Nesta área, conhecida de maneira geral como Vida Artificial ("Artificial Life"), encontram-se diversos pesquisadores trabalhando em diferentes aspectos desta abordagem [2] [7] [20] [29], entre outros. A corrente de pensamento destes autores parece ver em um modesto inseto, no lugar das habilidades simbólicas de um especialista, o melhor protótipo para o que eles consideram como inteligência [11].

Um elemento fundamental para a sobrevivência é a capacidade de apresentar e selecionar de maneira adequada, uma grande variedade de comportamentos. A implementação um comportamento utilizando-se Redes Neurais Artificiais é tarefa relativamente bem conhecida. Entretanto, quando se faz necessário dotar um sistema de uma grande variedade de comportamentos em uma estrutura neural única, o problema de escalabilidade começa a aparecer, tornando-se tarefa extremamente complexa. A melhor solução então, parece ser a mesma utilizada pela Natureza, e que poderia ser resumida pela frase: "Dividir para Conquistar", o que nos conduz para a aplicação da modularização e hierarquização, já utilizada em outras arquiteturas de controle de robôs,

tais como a arquitetura de subsunção ("subsumption architecture") proposta por Brooks [13][14]. O desafio neste caso, é aplicar este princípio às Redes Neurais Artificiais.

Esta modularização pode ser dividida em duas partes distintas, que são modularização repetitiva e modularização diferenciada. Onde, a modularização repetitiva refere-se ao uso do mesmo tipo de módulo em tempos distintos e a modularização diferenciada ao uso de módulos distintos para a organização de um todo.

Nosso cérebro trabalha com esta modularização, pois, vários os processos podem ser estar sendo executados em paralelo e de maneira hierárquica. Por exemplo, se alguém está escrevendo um livro seja manuscrito ou digitado, ele trabalha com as mãos, mas, as idéias estão sendo processadas pelo cérebro. Isto significa que conforme as idéias vão aparecendo, o cérebro "dá" o comando para o centro motor mover as mãos e escrever as letras. São praticamente dois processos distintos que estão sendo executados em paralelo.

Imagine que além de se estar escrevendo um livro, estamos escutando uma música. Parece algo fácil, mas, os processos que estão em execução já não são dois. Agora estamos processando idéias, organizando-as, digitando-as e ao mesmo tempo estamos tendo a percepção musical e também o possível entendimento da mesma. Passando então à execução de vários processos simultâneos. Podemos também acrescentar outros processos que poderiam estar sendo executados durante todos estes anteriormente citados.

O estudo desta modularização leva a percepção de que existirão casos onde serão usados os mesmos módulos para executar processos diferentes em tempos distintos. E existirão casos em que um mesmo processo estará sendo executado por módulos diferentes, em diferentes regiões do cérebro ao mesmo tempo.

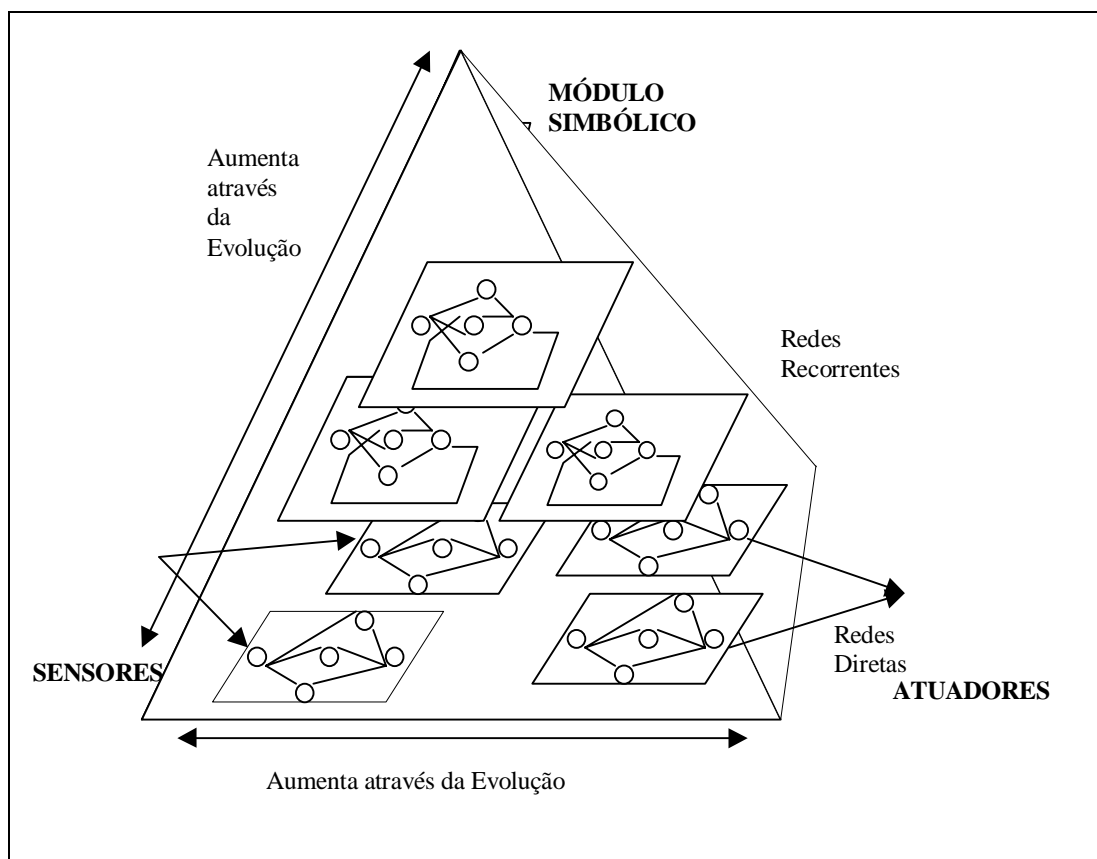
Estes sistemas modulares, no cérebro, podem ser de dois tipos, sendo eles vertical e horizontal. A estrutura horizontal é encontrada onde os processos são executados estruturas modulares de neurônios na mesma camada hierárquica. Este estágio pode, por exemplo, ser identificado no sistema visual primário, onde simples características de imagens visuais como linhas e arcos são representados em neurônios simples que estão na mesma camada. Estas características são combinadas e são representados através de neurônios em camadas subseqüentes para formar então imagens complexas que são interpretadas pelo córtex.

A estrutura vertical se dá na existência, para todos os níveis do cérebro primata, de caminhos múltiplos de processos paralelos e esta estrutura permite o processo separado de tipos diferentes de informação.

"Um bom exemplo pode, mais uma vez, ser achado no sistema visual, onde diferentes aspectos de incentivos visuais como forma, colorido, movimento e posição, é processado em paralelo através dos sistemas neurais anatomicamente separados, organizados no caminho magno celular e parvo celular. Estruturas convergentes integram estes processos de informação visual separadamente no mais alto nível hierárquico para produzir uma percepção unitária" [10].

Pode-se dizer que uma vantagem funcional importante da separação anatômica das diferentes funções seja a minimização da interferência mútua entre os processos simultâneos e execução de tarefas diferentes, necessárias para executar habilidades complexas como, por exemplo, dirigir um carro. Algumas tarefas são processadas em módulos separados e não se interferem. Outras tarefas requerem processos simultâneos em únicos módulos e são desta forma difíceis de se executar em paralelo

Esta organização modular nos dá inspiração para o desenvolvimento de trabalhos computacionais, pois, esta organização foi um dos modos que a natureza encontrou para dar inteligência aos seres vivos. A proposta deste trabalho será baseada na estrutura horizontal e vertical da organização modular (Figura 1), onde, existem neurônios formando linhas (horizontal) e colunas (vertical), e como esta estrutura interage na emergência de comportamentos.



**Figura 1- Diagrama esquemático de uma Rede Neural Hierárquica.**

### **3. Principais resultados de pesquisa anterior e impacto na carreira do coordenador**

O pesquisador terminou em agosto de 1998 seu doutoramento no Grupo de Pesquisas em Engenharia Biomédica - GPEB - do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC [27].

Durante seu doutoramento o pesquisador investigou a utilização mecanismos naturais para a implementação de agentes autônomos inteligentes. Primeiramente podemos considerar que os Algoritmos Evolucionários fornecem o modelo computacional que

simula, mesmo que de maneira simplista, os processos naturais de reprodução, mutação e seleção que simulam a evolução de estruturas individuais no processo de busca por indivíduos mais aptos a sobreviverem e agirem em um dado ambiente [8] [22] [23] [24] [25] [26]. Quanto à questão de modelagem de aspectos do comportamento dos animais, a abordagem Conexionista é considerada e utilizada para simular aspectos comportamentais na implementação de Agentes Autônomos [9].

Em 1999, o pesquisador foi contemplado com o FUNPESQUISA'99, com o projeto intitulado: "BIOBOTS - Inspiração Biológica e a Emergência da Inteligência em Agentes Autônomos", e que serviu de base para elaboração deste projeto.

Os objetivos do primeiro projeto foram:

- Criar a necessária infra-estrutura para o estudo de fenômenos biológicos e sua recriação no ambiente computacional, tornando-os acessíveis a novas formas de manipulação experimental e testes.
- Geração de protótipos utilizando os paradigmas computacionais recriados a partir de hipóteses e evidências obtidos do estudo dos paradigmas biológicos.

Deste modo, um simulador de robô, chamado Khepera, de domínio público, foi transferido para o computador e realizou-se o trabalho para portá-lo para a nossa plataforma computacional. Sendo que não houve maiores dificuldades nesta etapa. Após esta etapa, procedeu-se o estudo do software de simulação sendo que o módulo de controle original foi substituído pelas estratégias de controle elaboradas pela equipe. Nesta etapa elaborou-se uma rede neural artificial do tipo "feedforward" com aprendizado "off-line" para dotar o robô do comportamento de andar no ambiente simulado evitando obstáculos. Diversas estratégias para a obtenção do comportamento foram testadas e o comportamento emergente destas estratégias foi observado.

Esta etapa inicial foi extremamente interessante no sentido adquirirmos experiência e de podermos verificar na prática o funcionamento do simulador. Entretanto, como o comportamento obtido através destas estratégias se mostrava bastante limitado, passou-se então a implementação de estratégias capazes de gerar comportamentos mais complexos e interessantes. Passou-se então a uma segunda etapa, qual seja, a de estudar a organização do sistema nervoso de seres vivos. Baseado nestes estudos surgiu a idéia inicial de utilizarmos uma estratégia hierárquica de controle para gerar comportamentos, utilizando-se uma arquitetura de rede neural artificial hierárquica. Este tema é extremamente novo e servirá de guia para a dissertação de mestrado do aluno Flávio de Almeida e Silva. Os primeiros resultados obtidos parecem ser extremamente promissores e geraram um artigo, intitulado: "Redes Neurais Hierárquicas para implementação de Comportamentos em Agentes Autônomos", aprovado para apresentação no Congresso Brasileiro de Automática - CBA'2000, promovido pela Sociedade Brasileira de Automática.

O ambiente simulado, entretanto é bastante simplificado e surge então a necessidade de se dispor de um equipamento real para desenvolvimento e teste das experiências. O que se deseja, neste novo projeto é desenvolver estas idéias, buscando uma fundamentação maior e a realização de mais experimentações com a arquitetura hierárquica de rede neural, preferencialmente num ambiente real, bem como o desenvolvimento de ferramentas específicas para o aprendizado destas redes.

#### **4. Objetivos Gerais**

- O objetivo principal deste trabalho está relacionado com o desenvolvimento de agentes autônomos com alto grau de inteligência e autonomia. Pretende-se obter isto através do estudo, desenvolvimento e da utilização de redes neurais hierárquicas capazes gerar e de controlar os comportamentos de agentes autônomos.
- A proposta então, será o desenvolvimento de uma arquitetura de redes neurais hierárquicas onde as redes neurais dos níveis inferiores são responsáveis pela implementação do repertório de comportamentos básicos do AA, enquanto as redes dos níveis superiores da hierarquia fazem a tarefa de seleção e coordenação dos comportamentos básicos, fazendo emergir um comportamento mais complexo e inteligente.

#### **5. Objetivos Específicos**

Pretende-se, ao longo de dois anos executar os objetivos gerais do projeto de pesquisa. Para isto, alguns tópicos a serem investigados e desenvolvidos neste período são:

- Verificar a existência de uma hierarquia no SNC, observando como é determinada a hierarquia dos comportamentos nos seres vivos;
- Uma vez verificada e entendida esta hierarquia, mostrar que ela é determinada por uma modularização, isto é, que a hierarquia se dá através de sistemas modulares independentes mas interconectados
- Disponibilizar um ambiente com a infra-estrutura necessária para que se possa desenvolver e implementar os estudos e idéias propostas pelo projeto de pesquisa.
- Investigar e desenvolver técnicas para a geração automática dos módulos da estrutura neural hierárquica.
- Investigar e desenvolver esquemas de aprendizado biologicamente compatíveis para os diferentes módulos da estrutura.
- Desenvolvimento de agentes que possam ir continua e progressivamente aprendendo, mesmo durante o período de operação, de modo que possam se adaptar a novas situações e mudanças no ambiente.
- Investigar a possibilidade de se implementar processamento simbólico nos níveis superiores da hierarquia e tentar fazer emergir aspectos de comportamento racional em agentes autônomos inteligentes.

#### **6. Metodologia**

##### **6.1 Escolha da classe de problemas e implementação do ambiente-alvo**

Para a pesquisa, será fundamental a disponibilização de um ambiente-alvo real onde as idéias propostas possam ser testadas. Para disponibilização deste ambiente, a metodologia empregada será a de primeiramente desenvolver o ambiente de experimentação, integrando os diversos softwares e ferramentas já disponíveis e que serão adquiridos.



Pretende-se com os recursos deste projeto então adquirir dois kits de robótica simples do tipo Robotics Invention System da LEGO, onde as ferramentas e estruturas desenvolvidas poderão ser testadas. A seguir apresenta-se uma descrição do kit que pretende-se instalar no ambiente do projeto:

“Robotics Invention System - LEGO Mindstorms

Descrição: O LEGO MindStorms é um revolucionário conjunto de robótica para consumo, que permite a você criar suas invenções usando as peças LEGO que incluem os famosos blocos de montar, engrenagens, motores, sensores, polias e a nova interface RCX™. O RCX é um microprocessador que atua como cérebro do seu robô. A programação do robô é feita no PC usando o programa RCX Code (já incluso no kit - versão em inglês) ou o ROBOLAB (adquirido à parte - versão educacional em português).

Uma vez disponível o ambiente, em seguida se procederá ao estudo e implementação, neste ambiente, de uma série de implementações de comportamentos usando diferentes estruturas de redes neurais hierárquicas de modo a avaliar o problema da escalabilidade e a adequação de diferentes arquiteturas de rede neurais que comporão cada módulo, para a resolução dos problemas propostos.

## **6.2 A pesquisa anterior como ponto de partida**

Nos projetos de pesquisa abordados neste plano, o pesquisador pretende utilizar as técnicas já desenvolvidas como ponto de partida para o desenvolvimento de novas técnicas, aproveitando problemas em aberto e idéias promissoras surgidas durante o período do projeto anterior.

## **6.3 Implementação e experimentação**

A implementação dos modelos e técnicas utilizará a estrutura oferecida pelo ambiente alvo. Com a disponibilização de um ambiente de experimentação, onde pode-se configurar diferentes ambientes, com diversos graus de complexidade e agentes com diferentes capacidades sensoriais, pode-se proceder então a implementação dos modelos propostos para obtenção dos objetivos específicos, representando a capacidade cognitiva do agente, com a utilização de Redes Neurais Hierárquicas.

À medida em que os modelos e técnicas forem sendo implementadas, buscar-se-á testá-los usando exemplos de várias situações e configurações possíveis do ambiente, bem como, sempre que possível, comparar-se-á o comportamento inteligente emergente com comportamentos similares obtidos através utilização de outras técnicas disponíveis e cujos resultados estão apresentadas na literatura.

## 6.4 Os colaboradores e seus papéis

Para a execução dos projetos de pesquisa, o autor terá como colaboradores alunos em trabalho de conclusão de curso e aluno de mestrado. As tarefas serão distribuídas da seguinte forma:

- **Professor pesquisador:** Definir modelos, desenvolver técnicas e algoritmos. Implementar um núcleo básico de modelos e métodos para servir de substrato ao trabalho dos outros colaboradores.
- **Aluno de mestrado:** Revisar modelos e técnicas já existentes para implementação de agentes autônomos inteligentes. Implementar camadas agregadas ao núcleo básico implementado pelo professor pesquisador. Implementar e experimentar novas técnicas biologicamente inspiradas para emergência da inteligência em agentes.
- **Aluno de Trabalho de Conclusão de Curso:** Implementar ferramentas auxiliares para a modelagem. Instalar as ferramentas de programação e integrar as diversas ferramentas já disponíveis no ambiente-alvo. Auxiliar na montagem e implementação dos experimentos.

## 7. Cronograma

| ATIVIDADES   | 2000 |     | 2001 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | NOV  | DEZ | JAN  | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT |
| 1. Levantamento Bibliográfico e Aquisição de Material                    |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 2. Planejamento e Montagem dos Experimentos                              |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3. Porte das Ferramentas já existentes para o Ambiente de Experimentação |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 4. Desenvolvimento das Redes Neurais Hierárquicas e Modulares            |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 5. Experimentação dos Comportamentos no Ambiente de Teste                |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 6. Análise dos Resultados  |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 7. Levantamento de Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros         |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 8. Elaboração do Relatório Final e Artigos de Divulgação                 |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

## 8. Orçamento Detalhado

| RUBRICA  | VALOR               |
|--|---------------------|
| <b>Equipamentos</b>  |                     |
| 1. Computador capaz de rodar os sistemas operacionais Windows e Linux, composto por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• motherboard ASUS P3B-F sem nada on board</li> <li>• Processador Pentium III 550MHz</li> <li>• Memória 128MB DIMM</li> <li>• HD Quantum 10.2GB IDE</li> <li>• Placa de vídeo Diamond 8MB AGP</li> <li>• Gabinete Torre Médio com fonte ATX</li> <li>• Teclado Mtek ABNT II</li> <li>• Mouse Logitech Serial</li> <li>• Placa de Rede 10/100Mbps RJ45</li> <li>• Drive CD-ROM 52X Creative Labs</li> <li>• Drive 1.44MB</li> </ul> | <b>R\$ 1.945,00</b> |
| 2. Monitor 15" Digital Tela Plana  | <b>R\$ 355,00</b>   |
| 3. Zip Drive Iomega 100Mb Externo  | <b>R\$ 300,00</b>   |
| 4. 2 conjuntos MindStorms Robotic Invention<br>Cada conjunto com 717 peças incluindo: 1 tijolo RCX, 2 Motores c/ redução, 1 Sensor de Luz, 2 Sensores de Toque, 1 Transmissor Infravermelho e o Software RCX Code.   | <b>R\$ 1.400,00</b> |
| <b>Total</b>   | <b>R\$ 4.000,00</b> |
| <b>JUSTIFICATIVA:</b><br>O material permanente acima se constituirá no ambiente que sobre o qual se fará o desenvolvimento, instalação, transferência e teste dos sistemas já disponíveis e no qual os trabalhos dos colaboradores envolvidos no projeto serão desenvolvidos, depurados e testados.  |                     |

## 9. Referências bibliográficas

- [1] F. A. Silva. "Redes Neurais Hierarquicas Para Implementação De Comportamentos Em Agentes Autônomo". Trabalho Individual. Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação, UFSC, 2000.
- [2] T. L. Anderson and M. Donath. "Animal behavior as a paradigm for developing robot autonomy". In P. Maes, editor, Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back, A Bradford Book, p. 145--168. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- [3] R. C. Arkin. "Intelligent robotic systems". IEEE Expert, p. 6--8, Apr. 1995.
- [4] R. C. Arkin. "Behavior-based Robotics". The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1998.

- [5] J. M. Barreto. “Considerações genéricas sobre otimização de sistemas. Relatório Técnico 2, Dept. de Matemática e Informática, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1973.
- [6] J. M. Barreto. “Conexionismo e a Resolução de Problemas”. Dissertação para concurso para professor titular, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Informática e Estatística, Florianópolis, SC, 1996.
- [7] J. M. Barreto, M. Roisenberg, and F. M. de Azevedo. “Developing artificial neural networks for autonomous agents using evolutionary programming”. In ASC’98 IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, p. 283--286, Cancun, Mexico, May 1998.
- [8] A. G. Barto. “Connectionist learning for control”. In W. T. Miller III, R. S. Sutton, and P. J. Werbos, editors, *Neural Networks for Control*, p. 5--58. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- [9] R. D. Beer, H. J. Chiel, and L. S. Sterling. “A biological perspective on autonomous agent design”. In P. Maes, editor, *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*, A Bradford Book, p.169--186. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- [10] E. J. W. Boers and H. Kuiper. “Biological metaphors and the design of modular artificial neural networks. MSc Dissertation, Leiden University, the Netherlands, Departments of Computer Science and Experimental and Theoretical Psychology, Aug. 1992.
- [11] R. P. Bonasso. “Underwater experiments using a reactive system for autonomous vehicles”. In Proc. of the Ninth National (USA) Conference on Artificial Intelligence, p. 794--800, Menlo Park, CA, July 1991. The MIT Press.
- [12] P. Bourguine and F. J. Varela. “Introduction: Towards a practice of autonomous systems”. In F. J. Varela and P. Bourguine, editors, *Proc. of the First European Conference on Artificial Life*, A Bradford Book, p. xi--xvii, Paris, Dec. 1991. The MIT Press.
- [13] R. A. Brooks. “Artificial life and real robots”. In F. J. Varela and P. Bourguine, editors, *Proc. of the First European Conference on Artificial Life*, A Bradford Book, p. 3--10, Paris, Dec. 1991. The MIT Press.
- [14] R. A. Brooks. “A robot that walks; emergent behaviors from a carefully evolved network”. A. I. Memo 1091, Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, Feb. 1989.
- [15] F. Córdova et al. “Alternativas de automatización para el guiado autónomo de vehículos cargadores frontales en una mina subterránea”. *Automática e Innovación*, 1(2):67--73, 1994.
- [16] L. P. Kaelbling. “Learning in Embedded Systems”. A Bradford Book. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [17] C. Langton et al. “Artificial Life II”. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1991.
- [18] A. Laprade and G. Lambert-Torres. “Controle de um veículo utilizando a teoria dos conjuntos nebulosos”. In *Anais do 1. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, p. 166--174, Rio Claro, SP, 1993.

- [19] A. Leite, J. B. da Mota Alves, e M. F. Resende. “Sistema para depuração de um robô móvel autônomo inteligente”. In Anais do 1. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, p. 175--184, Rio Claro, SP, 1993.
- [20] L. Lin. “Programming robots using reinforcement learning and teaching”. In Proc. of the Ninth National (USA) Conference on Artificial Intelligence, p. 781--786, Menlo Park, CA, July 1991. The MIT Press.
- [21] P. Maes. “Learning behavior networks from experience”. In F. J. Varela and P. Bourguine, editors, Proc. of the First European Conference on Artificial Life, A Bradford Book, p. 48--58, Paris, Dec. 1991. The MIT Press.
- [22] N. Rashevsky. “The principle of adequate design”. In R. Rosen, editor, Foundations of Mathematical Biology vol III: Supercellular Systems, p. 143--175. Academic Press, New York and London, 1973.
- [23] M. Roisenberg, J. M. Barreto, and F. M. de Azevedo. “Biological inspirations in neural network implementations of autonomous agents”. In D. L. Borges and C. A. A. Kaestner, editors, Advances in artificial intelligence : proceedings / 13th Brazilian Symposium on Artificial Intelligence, number 1159 in lecture notes in computer science; Lecture notes in artificial intelligence, p. 211--220. Springer-Verlag, Berlin, Oct. 1996.
- [24] M. Roisenberg, J. M. Barreto, and F. M. de Azevedo. “Specialization versus generalization in neural network learning for ballistic interception movement”. In MELECON'96 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, p. 627--630, Bari, Italy, May 1996.
- [25] M. Roisenberg, J. M. Barreto, e F. M. de Azevedo. “Modeling behaviors with artificial neural networks”. In WRI'97 Intelligent Robotics Workshop, p. 34--45, Brasília, DF, Agosto. 1997.
- [26] M. Roisenberg, J. M. Barreto, and F. M. de Azevedo. “Neural network classification based on the problem”. In IJCNN IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Anchorage, Alaska, May 1998.
- [27] M. Roisenberg, J. M. Barreto, and F. M. de Azevedo. “On a formal concept of autonomous agents”. In AI'98 IASTED International Conference on Applied Informatics, Garmisch-Paterkirchen, Germany, Feb. 1998.
- [28] M. Roisenberg. “Emergência da Inteligência em Agentes Autônomos através de Modelos Inspirados na Natureza”. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica. Grupo de Pesquisas em Engenharia Biomédica. Universidade Federal de Santa Catarina, Agosto, 1998.
- [29] R. Rosen. “Is there a unified mathematical biology?” In R. Rosen, editor, Foundations of Mathematical Biology vol III: Supercellular Systems, p. 361--393. Academic Press, New York and London, 1973.
- [30] B. Webb and T. Smithers. “The connection between ai and biology in the study of behavior”. In F. J. Varela and P. Bourguine, editors, Proc. of the First European Conference on Artificial Life, A Bradford Book, p. 421--428, Paris, Dec. 1991. The MIT Press.

Florianópolis, agosto de 2000.

Mauro Roisenberg