
Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Coordenação de Pós-Graduação em Informática

Dissertação de Mestrado

Acionador Percussivo Inteligente - RITMUSROB

Algeir Prazeres Sampaio

Ficha Catalográfica

SAMPAIO, Algeir Prazeres

S192A

Acionador Percussivo Inteligente – RITMUSROB.

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CCT/COPIN, Campina Grande, agosto de 1999.

81 p. Il.

Orientador: José Homero Feitosa Cavalcanti

1. Inteligência Artificial
2. Computação & Música
3. Robótica
4. Redes Neurais
5. Lógica Fuzzy I. Título.


CDU: 007.52


ACIONADOR PERCUSSIVO INTELIGENTE - RITMUSROB

ALGEIR PRAZERES SAMPAIO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20.08.1999


PROF. JOSÉ HOMERO FEITOSA CAVALCANTI, D.Sc
Orientador


PROF. PABLO JAVIER ALSINA, D.Sc
Co-Orientador


PROF. . GEBER LISBOA RAMALHO, Dr.
Examinador


PROF. EDILSON FERNEDA, Dr.
Examinador

CAMPINA GRANDE – PB

*"Meu coração não se cansa
de ter esperança
de um dia ser
tudo o que quer..."*

Caetano Veloso.

A meu pai, Abílio Sampaio, tudo o que sou.

Agradecimentos

“Só eu sei, as esquinas que passei...”

Djavan.

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e assistência de algumas pessoas. Ao meu orientador, José Homero F. Cavalcanti, toda minha admiração, ao meu Co-orientador Pablo Javier Alsina, meus mais sinceros agradecimentos pelas conversas sempre muito produtivas, ao professor e amigo Edilson Ferneda por todo apoio que me deu nas horas mais difíceis dessa caminhada. Aos também professores e amigos Luciênio Teixeira, Alexandre Viana e José Ricardo, um agradecimento especial pela força que sempre me deram durante o curso.

Aos colegas Everaldo e Aleksandro do NEUROLAB e a todas as demais pessoas que contribuíram direta e indiretamente para o sucesso desta empreitada.

À minha família, meu e minha mãe, meu irmão e minha filhinha Ananda pela existência de vocês, toda motivação que me rendeu e ao bom, eterno e grato Deus por me dar sustentação nos tempos mais árduos.

Às funcionárias Aninha e Vera pela colaboração em todas as requisições feitas durante o período em que estive atrelado ao COPIN.

RESUMO

Esta dissertação descreve o projeto e a implementação, além da montagem do protótipo de um Acionador Percussivo Inteligente (RITMUSROB), desenvolvido para geração de ritmos musicais. O RITMUSROB é uma aplicação da robótica na área de Computação & Música que utiliza paradigmas da Inteligência Artificial (IA) como as Redes Neurais Artificiais (RNA's) e a Lógica Nebulosa. Apresenta-se o software desenvolvido para gerar ritmos a partir de batidas executadas pelo usuário via teclado, além da capacidade da determinação dos intervalos e dos valores das figuras musicais (semibreve, mínima, semínima, colcheia, semicolcheia, fusa e semifusa). Também é apresentado o protótipo e detalhes da construção do acionador, um braço pendular que funciona como baqueta percussiva capaz de efetuar percussões no bombo. O RITMUSROB facilita a percepção rítmica dos alunos de iniciação musical, no ditado rítmico e na formação de ritmos através de batidas simples executadas no teclado, podendo ser utilizado no ensino de divisão rítmica para iniciantes em Teoria Musical.

ABSTRACT

This dissertation describes the project and the implementation of an Intelligent Rhythmic Robot, (RITMUSROB), developed for generation of musical rhythms. The RITMUSROB uses paradigms of Artificial Intelligence (AI) as Artificial Neural Networks (RNA's) and Fuzzy Logic. Developed software is presented to generate rhythms from strokes executed for the using way keyboard, beyond the capacity the determination the intervals and the values of the musical figures. Also it is presented details of the construction of the robotic arm. The RITMUSROB facilitates the rhythmic perception of the pupils of musical set, in the rhythmic dictated one and the formation of rhythms through simple strokes executed in the keyboard, being able to be used in the education of rhythmic division for beginning in Musical Theory.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| <i>SUMÁRIO</i> | <i>i</i> |
| <i>LISTA DE FIGURAS</i> | <i>iii</i> |
| <i>LISTA DE EQUAÇÕES</i> | <i>v</i> |
| <i>RESUMO</i> | <i>vi</i> |
| <i>ABSTRACT</i> | <i>vii</i> |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| Contextualização do Trabalho | 1 |
| Motivação da Dissertação | 1 |
| Objetivos desta Dissertação | 3 |
| Descrição do Sistema Proposto | 4 |
| Organização do Trabalho | 5 |
| 2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MÚSICA | 6 |
| Resumo | 6 |
| Conceitos Musicais | 6 |
| Clave de Percussão | 10 |
| Altura a Nota | 10 |
| Cabeça da Nota | 11 |
| Ritmo: Elemento Fundamental da Música | 11 |
| Métrica | 12 |
| Fórmulas de Compasso | 13 |
| Valor das Notas | 14 |
| Tempo | 14 |
| Conclusões | 14 |
| 3. COMPUTAÇÃO E MÚSICA | 15 |
| Resumo | 15 |
| Motivações | 15 |
| Histórico da Computação & Música | 17 |
| Música e Inteligência Artificial | 20 |
| Sistemas Especialistas | 21 |
| Redes Neurais e Processamento Paralelo Distribuído | 21 |
| Dispositivos para Performance (Interfaces) | 21 |
| Performance | 22 |
| Robótica | 22 |
| Música e Robótica | 24 |
| Conclusões | 26 |
| 4. REDES NEURAIS & LÓGICA NEBULOSA | 27 |
| Resumo | 27 |
| Sistemas Neuronebulosos | 27 |

| | |
|--|----|
| O Neurônio Biológico | 28 |
| O Neurônio Artificial | 29 |
| Tipos Básicos de Neurônios Artificiais | 30 |
| O Neurônio Linear | 31 |
| O Neurônio Lógico | 31 |
| O Neurônio Sigmóide | 32 |
| As Redes Neurais Multicamadas | 33 |
| A Lógica Nebulosa | 34 |
| Fundamentos da Lógica Nebulosa | 36 |
| Expressão Nebulosa do Conhecimento | 39 |
| Sistemas de Controle Neuronebulosos | 40 |
| Classificação dos Sistemas Neuronebulosos | 41 |
| Conclusões | 42 |
| 5. O RITMUSROB | 43 |
| Resumo | 43 |
| O RITMUSROB | 43 |
| O Sistema Inteligente do RITMUSROB | 46 |
| Princípio de Funcionamento | 47 |
| Software de Controle do RITMUSROB | 53 |
| Exemplo de Funcionamento do Sistema | 56 |
| Conclusões | 59 |
| 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 60 |
| Resultados Obtidos | 60 |
| Trabalhos Futuros | 61 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |
| 8. APÊNDICE A - POSICIONAMENTO DO PÊNDULO INVERTIDO | 68 |
| 9. APÊNDICE B - INSTRUMENTOS DE PERCUSSÃO | 76 |

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | |
|---|---|
| Figura 1.1: Diagrama de Blocos do RITMUSROB | 4 |
|---|---|

CAPÍTULO 2

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Objetos Musicais em Pentagrama | 7 |
| Figura 2.2: Figuras Musicais | 8 |
| Figura 2.3: As Figuras Musicais e suas Respectivas Pausas | 8 |
| Figura 2.4: Divisão Proporcional dos Valores das Figuras Musicais | 9 |
| Figura 2.5: Representação de um Compasso | 9 |
| Figura 2.6: Clave de Percussão | 10 |
| Figura 2.7: Identificação dos Instrumentos na Pauta de Percussão. | 10 |
| Figura 2.8: Cabeça da Nota | 11 |
| Figura 2.9: Fórmulas de Compasso | 13 |

CAPÍTULO 3

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Gráfico de um envelope de som | 19 |
| Figura 3.2: Configuração de diagrama de bloco típica de um sistema de controle para uma junta de robô | 24 |
| Figura 3.3: Robô WABOT2, robô pianista | 25 |
| Figura 3.4: MUBOT tocando violoncelo | 26 |
| Figura 3.5: MUBOT tocando violino | 26 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|----|
| Figura 4.1: Representação de um Neurônio Biológico | 29 |
| Figura 4.2: O Neurônio Artificial | 30 |
| Figura 4.3: O Neurônio de Hopfield | 31 |
| Figura 4.4: Função de Ativação Linear | 31 |
| Figura 4.5: Função de Ativação Lógica | 32 |
| Figura 4.6: Função de Ativação Sigmóide | 32 |
| Figura 4.7: Derivada da Função de Ativação Sigmóide | 33 |
| Figura 4.8: As Redes Neurais Artificiais Multicamadas (RNMC's) | 34 |
| Figura 4.9: A Variável Lingüística Altura | 35 |
| Figura 4.10: A Função de Pertinência | 37 |
| Figura 4.11: A União | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.13: A Intercessão | 38 |
| Figura 4.14: O Complemento | 39 |
| Figura 4.15: Sistema de Controle Nebuloso | 40 |

CAPÍTULO 5

| | |
|---|-------|
| Figura 5.1: Foto do Acionador RITMUSROB (De frente) | 44 |
| Figura 5.2: Foto do Acionador RITMUSROB (Por Cima) | 44 |
| Figura 5.3: Detalhes Mecânicos do RITMUSROB | 45 |
| Figura 5.4: O Sistema de Controle Inteligente do RITMUSROB | 46 |
| Figura 5.5: Posicionamento da Baqueta Percussiva | 47/48 |
| Figura 5.6: Controlador Neural Direto de Posição | 49 |
| Figura 5.7: RNMC do RITMUSROB | 49 |
| Figura 5.8: A Sigmóide | 49 |
| Figura 5.9: Função de Pertinência das Figuras Musicais | 52 |
| Figura 5.10: Resultados Experimentais obtidos no treinamento da RNMC | 54 |
| Figura 5.11: Tela da opção 2: <i>Percussão</i> com a forma de onda da Batida #2 | 55 |
| Figura 5.12: Seqüência de Batidas obtidas através do Teclado | 56 |
| Figura 5.13: Gráfico das curvas das Batidas obtidas através do Teclado | 57 |
| Figura 5.14: Tela da execução da <i>sub-opção 6: MOSTRA TABELA BATIDAS</i> da <i>opção 3: RITMO</i> do MENU | 58 |

APÊNDICE A

| | |
|---|----|
| Figura A.1: Esquema Geral do Pêndulo Simples | 69 |
| Figura A.2: O Posicionamento do eixo do motor CC | 69 |
| Figura A.3: Controlador neural de posição do eixo do motor CC | 70 |
| Figura A.4: O Círculo de Torque | 71 |
| Figura A.5: Função de Pertinência do Círculo | 72 |
| Figura A.6: O Círculo das Estratégias | 74 |

APÊNDICE B

| | |
|---------------------------------------|----|
| Figura B.1: Instrumentos de Percussão | 77 |
|---------------------------------------|----|

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO 4

| | |
|---|----|
| Equação 4.1: Saída da parte intermediária do Perceptron | 30 |
| Equação 4.2: Valor de saída do Neurônio | 30 |
| Equação 4.3: Função de ativação Sigmóide | 32 |

CAPÍTULO 5

| | |
|--|----|
| Equação 5.1: Curva Sigmóide com $\Theta = 1$, $\beta = 1$ e $\delta = 0$ | 50 |
| Equação 5.2: Curva Sigmóide com valores de saída | 50 |
| Equação 5.3: Índice de desempenho usado para adaptação da variável de controle $U(t)$ da RNMC do SCI | 50 |
| Equação 5.4: Valor de saída do treinamento da RNMC, usando a regra delta e o Índice de desempenho | 50 |
| Equação 5.5: Derivada Parcial do Índice de desempenho em relação à entrada como uma Função do Jacobiano do motor | 50 |
| Equação 5.6: Valor de Tensão, caso seja conhecido o jacobiano do motor | 50 |
| Equação 5.7: Relação de variação e tensão na saída da RNMC | 51 |
| Equação 5.8: Fator de adaptação do Controlador Neural | 51 |

APÊNDICE A

| | |
|---|----|
| Equação A.1: Esquema Geral do Pêndulo Simples | 68 |
| Equação A.2: O Posicionamento do eixo do motor CC | 70 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do trabalho

A produção de sons pela fala, pelo bater de palmas, pedras e troncos é uma manifestação que acompanha o homem desde o princípio das civilizações mais remotas. Evidentemente, naquela época, o homem primitivo não se preocupava em definir ou caracterizar as suas manifestações artísticas como arte propriamente dita. Na verdade, os sons faziam parte de sua vida cotidiana, e eram espontâneos, naturais [RATTON 1994].

Guiado pelo seu instinto, o homem primitivo descobriu o elemento *tempo* nas suas batidas tribais. A partir desta consciência, o homem criou seus primeiros *ritmos*. Aliado a este fato, o domínio do homem sobre paus, pedras, couros e cordas, serviu para a confecção dos primeiros instrumentos usados para geração de sons.

Muito tempo depois, cada civilização antiga, já tinha desenvolvido uma consciência musical e também um sistema sonoro/musical. Tal consciência, foi legada às civilizações modernas e desenvolvida continuamente a ponto de cada vez mais dotar o homem da capacidade de investimento na sua curiosidade musical, levando-o a desenvolver várias formas de captar suas criações musicais.

Ao longo da sua história, o homem vem desenvolvendo métodos para ajudá-lo na perpetuação e na manipulação de suas criações. No campo musical, os diversos meios de escrita para composições e manifestações rítmicas e as diversas formas de executá-las, marcam o início de novos tempos.

À tarefa de transmissão do saber, o homem sempre dedicou um olhar especial, dado a importância de ensinar aos seus descendentes todo um arcabouço de sabedoria nos mais diversos campos do conhecimento. Tendo, a música como uma arte de traço cultural fortíssimo, o homem cada vez mais, exhibe a consciência da valorização do conhecimento musical. É neste contexto de ensino e assimilação inteligente de noções rítmicas musicais que este trabalho está inserido.

Na sociedade moderna, com o advento da computação, a utilização do computador no sentido de apoiar a vida do músico e/ou o aprendiz de música, acabou trazendo à tona toda uma série de mecanismos utilizados com técnicas modernas, tornando-os de grande utilidade na tarefa de transmissão do conhecimento musical

1.2 Motivação da Dissertação

A linguagem própria da música é formada de sons. Para indicar exatamente estes sons, de conformidade com a sua acuidade e duração, convencionou-se adotar um sistema de escrita, para cuja compreensão torna-se preciso um estudo especial. Os meios para se chegar a esse fim são o solfejo e o ditado musical. Com o solfejo, chega-se ao som, através da leitura do sinal (nota); com o ditado, por intermédio da percepção do som, chega-se a esse sinal. A operação do ditado consiste em traduzir em sinais convencionais os sons perceptíveis ao ouvido [POZZOLLI 1990].

A operação do ditado musical tem sua maior dificuldade no momento do aluno captar e reter os sons de que se compõe uma frase musical. É preciso reconhecer ao mesmo tempo: a duração, a altura e a simultaneidade dos sons. Devido a essa dificuldade, os alunos de iniciação musical têm suas tarefas simplificadas em três ramos: o ditado rítmico, o ditado melódico e o ditado harmônico.

No ditado rítmico, o aluno terá campo para estudar as combinações das durações dos sons (ritmo); no ditado melódico, estudará as relações existentes entre os sons sucedendo-se; e no ditado harmônico, enfim, colocará em realce as relações existentes, entre os sons que são produzidos simultaneamente [POZZOLLI 1990].

[CAVALCANTI et al. 1994] apresentaram um Sistema de Controle Inteligente (SCI), baseado em Rede Neural Artificial Multicamada e Lógica Nebulosa, capaz de controlar uma estrutura robótica elementar (planta) em tempo real. Posteriormente, [ALSINA & CAVALCANTI 1997] utilizaram esse SCI aplicado na transferência de carga entre dois robôs cooperantes. Todo o gerenciamento dos módulos dinâmicos do SCI foi realizado por um escalonador de tarefas em tempo real. O SCI se mostrou adequado ao controle dinâmico da planta, principalmente devido às propriedades adaptativas da rede neural [ALSINA 1996].

A partir do momento em que se concebe um sistema robótico formado por dois robôs cooperantes capazes de atuarem sincronizadamente e de forma independente um do outro, vislumbra-se uma aplicação musical para este sistema que, adaptado com baquetas percussivas, pode gerar ritmos através de batidas motivadas pelo movimento dos braços robóticos. A partir de então, a aplicação deste sistema decorre naturalmente, uma vez que suas características de batedor podem ser direcionadas para a execução de ditados rítmicos, sendo de grande valia para iniciantes em percepção musical.

A carência de sistemas robóticos destinados à tarefa de ensino de ritmo foi a força motivadora deste trabalho. O desenvolvimento de um sistema capaz de executar ritmos percussivos, gerando batidas rítmicas, formando seqüências rítmicas e ritmos diversos, implementa, desta forma, uma ferramenta poderosa à disposição de quem estuda ou ensina ritmos.

1.3 Objetivos desta Dissertação

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um acionador percussivo inteligente, denominado RITMUSROB, que funcione como sistema gerador de ritmos, e possa ser utilizado no ensino de divisão rítmica para alunos de percepção musical. Uma vez, de posse do sistema, o instrutor/aprendiz pode gerar batidas rítmicas através do teclado do PC, fazendo com que as mesmas sejam reproduzidas em tempo real pelos braços robóticos que percutirão nos tamborins acoplados ao sistema. Os princípios básicos da música; as definições elementares do ritmo, como elemento fundamental da música; a concepção e apropriação dos conceitos determinantes na execução rítmica dos instrumentos de percussão e a aplicação de sistemas robóticos na área de performance musical, forneceram a base para o desenvolvimento do sistema RITMUSROB.

Além dessa meta principal, destacam-se como objetivos secundários deste trabalho:

- Pesquisa acerca de *Controle Inteligente* *Controle Não-Linear* para a construção do acionador, abordando o campo da robótica e dos sistemas de controle inteligente;

- Utilização das redes neurais artificiais (RNA's) para assimilação por parte do sistema do aprendizado das batidas; e dos sistemas nebulosos para a classificação dos intervalos e das figuras musicais;
- Implementação de um protótipo que ilustre as execuções rítmicas;
- Identificação e manipulação das figuras musicais por parte do sistema, através dos intervalos das batidas executadas pelo usuário.

1.4 Descrição do Sistema Proposto

A Fig. 1.1 mostra o esquema geral do, RITMUSROB. O sistema, baseado em computador pessoal, é acessado via teclado e permite ao usuário a possibilidade de formar ritmos com batidas em determinadas teclas que são aprendidas pelo mesmo através do bloco neural do sistema, onde é treinada a rede neural e feita a leitura e a gravação dos pesos da RNMC. As batidas são analisadas posteriormente pelo bloco nebuloso, que por sua vez, a partir dos valores das batidas, já interpretados pelo sistema, gera as curvas Fuzzy e mostra os parâmetros Fuzzy das curvas; completando a tarefa de assimilação do tempo e do ritmo fornecidos pelo usuário. Estes blocos são acionados através de um MENU no software de controle do sistema. Uma vez analisada a seqüência rítmica, o RITMUSROB executa a mesma ou gera uma nova seqüência rítmica compondo desta forma novos ritmos a partir de batidas elementares.

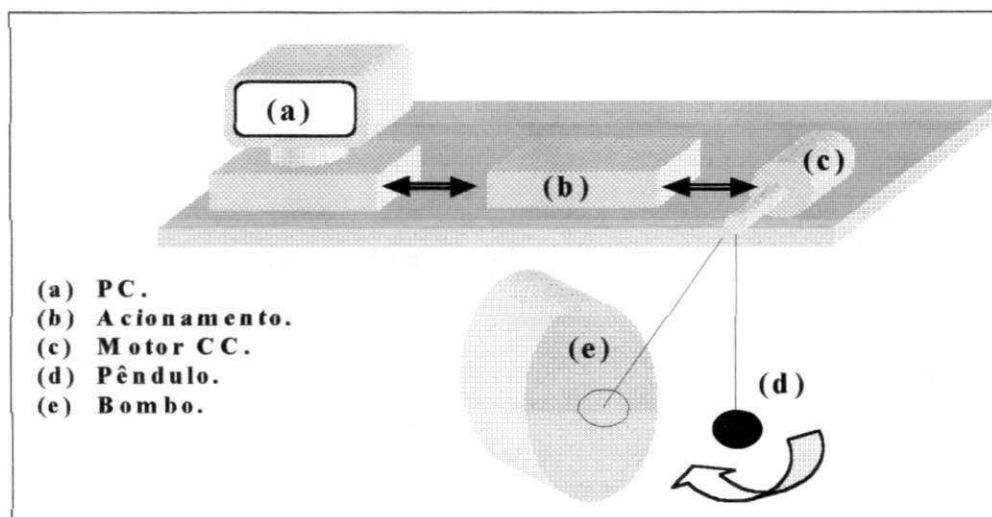


Fig. 1.1: Modelo do Acionador. RITMUSROB para um Motor.

1.5 Organização do Trabalho

Basicamente, pode-se dividir esta dissertação em quatro partes:

- (i) a que trata das informações básicas dos conceitos musicais;
- (ii) a que trata da aplicação da Computação e da Robótica à música;
- (iii) a que trata das características do Sistema Inteligente, particularmente: Redes Neurais Artificiais e Lógica Nebulosa;
- (iv) e finalmente, a que trata da exposição do projeto e da implementação do Acionador Percussivo Inteligente; das conclusões e sugestões sobre trabalhos a serem desenvolvidos dando seqüência aos estudos promovidos pela implementação do RITMUSROB.

A primeira parte, é formada pelo capítulo 2, a segunda parte é formada pelo capítulo 3, a terceira parte compreende o capítulo 4; e por fim, a quarta parte, formada pelos capítulos 5 e 6.

Inicialmente, no capítulo 2, são apresentados alguns princípios básicos da música, principalmente os conceitos musicais envolvidos no domínio do ritmo. Nesses conceitos, concentram-se as definições mais elementares do universo rítmico e que, acrescidos de outras definições, permitirão uma familiarização com o universo do trabalho no âmbito musical. Ainda neste capítulo, são feitas algumas descrições históricas dos elementos rítmicos e dos elementos envolvidos na execução rítmica.

No capítulo 3, é feita uma breve descrição da taxonomia dos diversos períodos que compõem a história da pesquisa na área de Computação e Música. A seguir, faz-se uma descrição de alguns aspectos particulares da Música e a sua relação com a Inteligência Artificial. São analisados sucintamente os Sistemas Especialistas já desenvolvidos e suas características básicas. Por último, faz-se uma breve análise da ligação da Música com a área de Robótica, e uma breve visita aos conceitos básicos do mundo da Robótica e uma descrição da aplicação de robôs na área de execução musical,

apresentando alguns sistemas com relação de proximidade maior com o presente trabalho.

No capítulo 4, faz-se um breve histórico das Redes Neurais Artificiais, as principais características e similaridades entre os neurônios naturais e os artificiais, a descrição de uma Rede Neural Multicamada (RNMC), além de uma abordagem sucinta aos Sistemas de Controle Inteligente (SCI), e uma descrição dos princípios básicos da Lógica Nebulosa, seus fundamentos, a forma de aprendizagem de sistemas que utilizam a Lógica Nebulosa e por último, discute-se brevemente os sistemas de controle nebuloso.

No capítulo 5, faz-se uma descrição do Acionador Percussivo Inteligente, o RITMUSROB, apresentando-o como um ambiente de apoio ao usuário na geração de ritmos e aprendizagem rítmica. Por último, faz-se o detalhamento das funcionalidades oferecidas pelo programa e a utilização de cada uma das opções para a manipulação do acionador.

E, no capítulo 6, são feitas as conclusões e análises dos resultados obtidos com a utilização do RITMUSROB. Por último, são feitas sugestões para trabalhos futuros.

No anexo A estão descritas as características básicas do acionamento e posicionamento do pêndulo invertido. O pêndulo invertido é utilizado no sistema do RITMUSROB para emular o elemento de percussão. No anexo B estão descritos os principais instrumentos de percussão.

2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MÚSICA

2.1 Resumo

Neste capítulo, considera-se inicialmente o ritmo como elemento fundamental da música e escopo deste trabalho. A seguir, são apresentadas algumas definições relativas ao ritmo e à duração dos sons. Dentro do horizonte do trabalho proposto nesta dissertação, analisa-se sucintamente as possibilidades de execução de um ritmo. Apresenta-se ainda conceitos musicais rítmicos que servem como base para o acionador percussivo inteligente proposto no capítulo 5.

2.2 Conceitos Musicais

Existem diversas definições para a Música. Pode-se defini-la, como a arte da combinação de sons, acordo com as variações da altura, proporcionados segundo a sua duração e ordenados sob as leis da estética.

A música possui três elementos fundamentais: a *melodia*, a *harmonia* e o *ritmo*. A *melodia* consiste na sucessão dos sons formando o sentido musical; a *harmonia* consiste na execução de vários sons que são ouvidos ao mesmo tempo, observadas as leis que regem os agrupamentos dos sons simultâneos [PRIOLLI 1994]; e o *ritmo* que etimologicamente [HOLANDA, 1988], pode ser "movimento regrado e medido"; "movimento ou ruído que se repete no tempo a intervalos regulares, com acentos fortes e fracos"; "agrupamento de valores de tempo combinados de maneira que marquem com regularidade uma sucessão de sons fortes e fracos, de maior ou menor duração, conferindo a cada trecho características especiais" e este último é o objeto desta dissertação e será definido de várias formas neste capítulo.

Os sons musicais são representados graficamente por sinais chamados *notas musicais*. O termo *Notação Musical* referencia a escrita de uma música. As notas são sete e têm a seguinte notação musical: *dó, ré, mi, fá, sol, lá e si*. Existe um outro tipo de

notação musical [PÉREZ 1985], denominada cifras que é utilizado nos países anglosaxões, especificamente em tratados de física, e que teve grande aceitação na música popular, desenvolvida para abreviar e economizar espaço.

dó(C), ré (D), mi (E), fá(F), sol(G), lá(A), si (B)

As notas ouvidas sucessivamente formam uma série de sons à qual se dá o nome de *Escala*. Escalas são conjuntos de *intervalos*, dispostos melodicamente (sons consecutivos) dentro de determinados padrões intervalares (distâncias) ou (períodos de tempo). Existem diversas classes de escalas (pentatônicas, modais, menores melódicas, etc.). Os intervalos são formados quando da existência de duas notas. A particularidade dos intervalos encontra-se em sua natureza: duas notas consecutivas determinam intervalos melódicos (horizontais), enquanto notas concomitantes determinam intervalos harmônicos (verticais).

Pauta é a reunião de 5 linhas horizontais, paralelas e equidistantes, formando entre si quatro espaços. As notas são escritas nas linhas e nos espaços da pauta. A pauta também é chamada de *pentagrama*.

Além das notas, pausas e símbolos podem ser representados numa pauta ou pentagrama. Um pentagrama possui no seu início, conforme a Fig. 2.1, uma clave que determina o nome das notas; uma armadura, que indica a tonalidade e um compasso (métrica) definidos respectivamente pelos três primeiros símbolos [PÉREZ 1985].

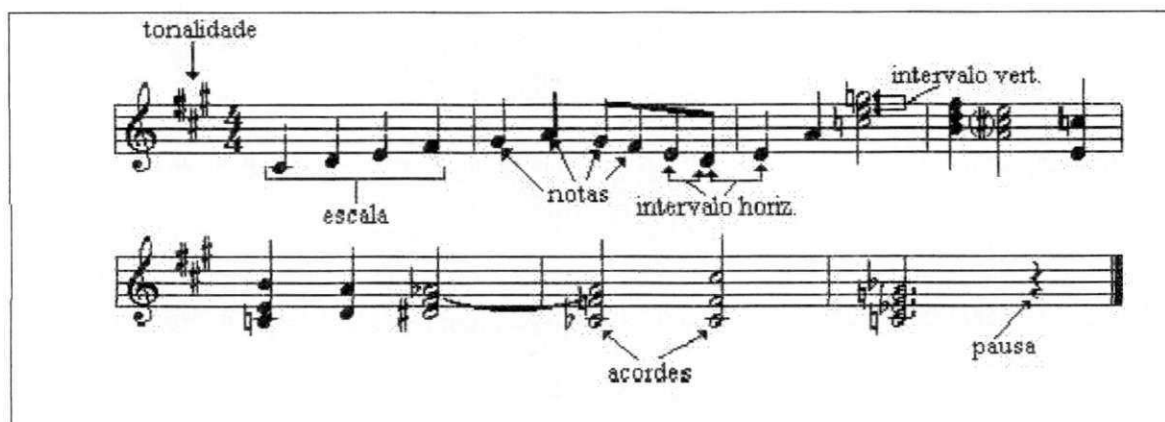


Figura 2.1: Objetos Musicais em Pentagrama.

O Ritmo é o movimento dos sons regulados pela sua maior ou menor duração. Sabe-se que nem todas as notas têm a mesma duração e para representar as várias durações dos sons musicais, as notas são escritas sob formas diferentes. Essas diversas formas das notas são chamadas Figuras Musicais [PRIOLLI 1994]. A Fig. 2.2 apresenta os nomes e a representação das figuras musicais:

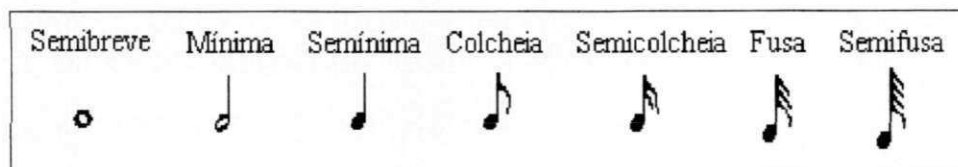


Figura 2.2: Figuras Musicais.

As figuras musicais também são chamadas de valores ou figuras de som. Existem ainda as *pausas* (ver Fig. 2.3) que indicam a duração de silêncio entre os sons. As *pausas* têm função rítmica e estética definidas no sentido musical. Cada figura de som tem sua respectiva pausa que lhe corresponde a tempo de duração.

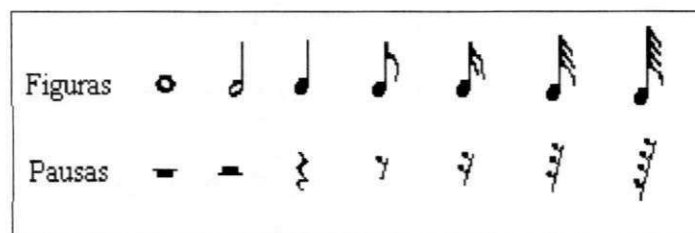


Figura 2.3: As Figuras Musicais e suas respectivas Pausas.

Existe uma divisão proporcional dos valores das figuras musicais. A *semibreve* é a figura de maior duração e é tomada como unidade e referência para as demais (ver Fig. 2.4).

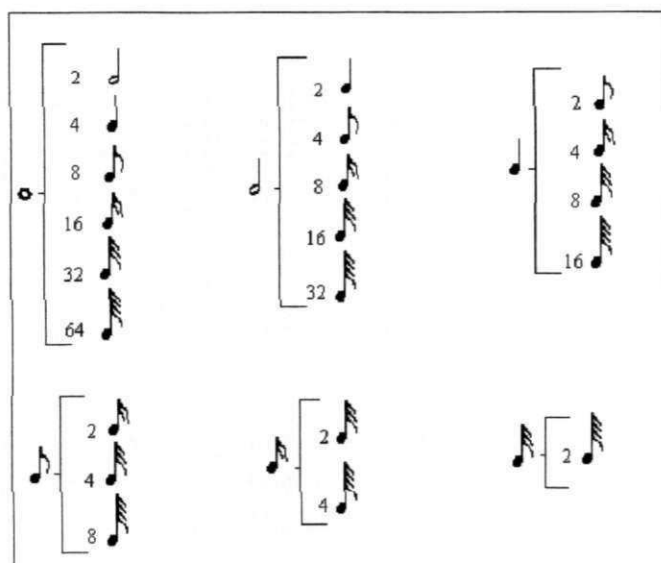


Figura 2.4: Divisão Proporcional dos Valores das Figuras Musicais.

As figuras musicais que representam os valores das notas têm duração indeterminada. Esse espaço de duração é chamado *tempo*. Por exemplo, se estabelecermos que a *semínima* tem a duração de 1 tempo, então uma *minima* valerá 2 tempos; a *semibreve*, valerá 4 tempos; a *colcheia* por sua vez, valerá apenas $\frac{1}{2}$ tempo; e assim por diante.

A representação do tempo na pauta é feita em grupos. Os tempos são agrupados em porções iguais, de dois em dois; de três em três ou de quatro em quatro, que se constitui em unidades métricas chamadas compassos. Os compassos de 2 tempos são chamados compassos binários, os compassos de 3 tempos são ditos ternários e os de 4 tempos, quaternários.

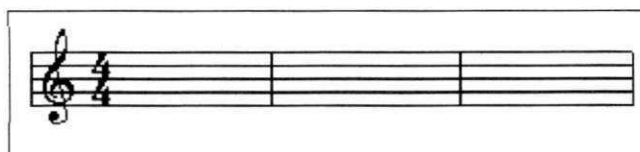


Figura 2.5: Representação de um Compasso.

Em qualquer compasso, a figura musical que preenche um tempo chama-se *unidade de tempo*; e a figura musical que preenche um compasso chama-se *unidade de compasso*. A Figura 2.5 mostra a representação de um compasso.

Existem algumas convenções “universalizadas” para representar na pauta as notas executadas em instrumentos de percussão, em particular. Alguns símbolos são ligeiramente diferentes das figuras musicais apresentadas, usadas para outros instrumentos.

2.2.1 Clave de Percussão

A clave de percussão não designa propriamente uma nota musical de referência, como as demais claves (sol, fá, dó, etc.). Ela identifica que a pauta é de percussão, e por isso certas regras peculiares devem ser observadas. A Fig. 2.6 mostra uma clave de percussão.

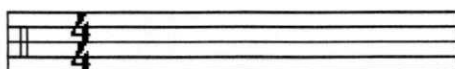


Figura 2.6: Clave de percussão.

2.2.1.1 Altura da Nota

A localização vertical da nota de percussão no pentagrama em geral não determina uma afinação exata dentro da escala musical (até porque a pauta não possui referência de altura). A localização da nota indica, na verdade, qual é o instrumento (bumbo, caixa, prato, tamborim, etc.) que executa aquela nota. No entanto, olhando para as notas de uma pauta de percussão (como a da Fig. 2.7) pode-se ter uma noção da altura e/ou qualidade harmônica, de forma que os instrumentos mais graves (ex.: bumbo) ficam localizados na parte de baixo do pentagrama, enquanto os agudos (ex.: pratos) ficam na parte superior.

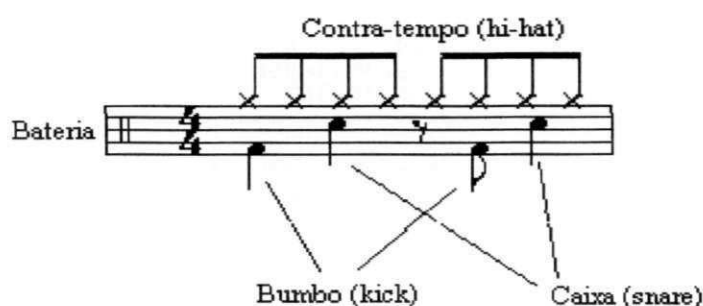


Figura 2.7: Identificação dos Instrumentos na Pauta de Percussão.

2.2.1.2 Cabeça da Nota

Além dos formatos de cabeça de nota usados nos demais tipos de pautas, a pauta de percussão também usa outros formatos diferentes (losango, X, traço, etc.), para diferenciar os instrumentos. A Fig. 2.8 mostra uma cabeça de nota.

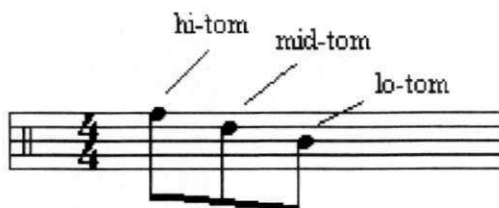


Figura 2.8: Cabeça da Nota.

A lei do ritmo baseia-se na divisão ordenada do tempo. Cada intervalo de tempo, tomado como unidade, é suscetível de ser dividido em partes iguais pelo nosso cérebro. Da unidade de tempo, longa ou breve, e da sua divisão em partes mais ou menos numerosas, deriva a variedade do ritmo. Por unidade de tempo se deve entender o espaço de tempo que se passa entre dois limites preestabelecidos e sensíveis ao ouvido.

A divisão de uma unidade de tempo em duas partes iguais, chama-se ritmo binário. A divisão de uma unidade de tempo em três partes iguais, chama-se ritmo ternário. Os ritmos binário e ternário, são os ritmos fundamentais da música [POZOLLI 1990].

2.3 Ritmo: Elemento Fundamental da Música

O ritmo é a subdivisão de um lapso de tempo em seções perceptíveis; o agrupamento de sons musicais, principalmente por meio de duração e ênfase.

Na música ocidental, o tempo é geralmente organizado para estabelecer uma pulsação regular, e pela subdivisão dessa pulsação em grupos regulares. Esses grupos são comumente de duas ou três unidades (ou seus compostos como quatro ou seis); a disposição da pulsação em grupos é a métrica de uma composição, e a velocidade das pulsações é o seu andamento. A maior parte da música ocidental, do final da idade média ao século XX, possui uma pulsação rítmica e uma métrica regulares. Essas características podem não existir, porém, em alguns tipos de música antiga, por exemplo

no cantochão eclesiástico, ao qual aparentemente faltava uma estrutura métrica, o seu ritmo era realizado de acordo com algumas convenções e conforme ditado pelo texto verbal.

Em algumas peças musicais do séc. XX, os compositores buscaram evitar estruturas rítmicas regulares a fim de alcançar um ritmo mais flexível; em alguns casos, seus métodos foram influenciados pela música folclórica, à qual geralmente não possui estrutura métrica regular. Mas mesmo nos períodos em que eles aceitavam "a tirania da barra de compasso", os compositores usavam vários recursos para evitar estruturas rítmicas monótonas ou estéreis.

Síncope que é o deslocamento de acentuação; notas mais breves em tempos acentuados do compasso (ao contrário das notas longas, mais naturais, nos tempos fortes do compasso); frases que evitam os padrões regulares de quatro ou oito compassos; elisão de frases uma na outra, ou frases expandidas; deslocamento da acentuação por breve tempo (comum em cadências da era barroca; na música vocal, seguindo um ritmo natural da fala (ou um que contradiga a regularidade métrica, como em muitos recitativos, ou que siga uma ampla estrutura métrica criada por um texto verbal).

O ritmo, como elemento fundamental — a música é algo que só pode existir no tempo —, tem um papel a desempenhar em muitos outros aspectos da música. O ritmo é importante elemento na melodia, afeta a progressão da harmonia e desempenha papéis em questões como textura, timbre e ornamentação. Ele é fundamental à dança. Os padrões da dança, derivados dos ritmos naturais do movimento corporal, ditaram muitos dos modelos rítmicos que permeiam toda música ocidental [GROVE 1994].

2.3.1 Métrica

A métrica pode ser definida como "a organização de notas numa composição ou passagem, no que diz respeito ao andamento, de tal forma que uma pulsação regular feita de tempos possa ser percebida e a duração de cada nota medida em termos desses tempos". Os tempos são agrupados regularmente em unidades maiores, denominados compassos. A métrica é identificada na pauta no início de uma composição, ou em qualquer ponto onde mude, através de uma fórmula de compasso.

2.3.2 Fórmulas de Compasso

As fórmulas de compasso são um sinal ou conjunto de sinais que são colocados no início de uma composição, logo após a armadura de clave, ou no decorrer de uma composição. Nesse caso para indicar a métrica do trecho musical que a segue. No uso moderno, para a fórmula de compasso costumam-se indicar dois números, um sobre outro: o número de baixo indica a unidade de medida em relação à semibreve; o número de cima indica o número dessas unidades em cada compasso. Assim, uma fórmula $3/2$ indica que existem três mínimas em cada compasso; $12/8$ indica que existem 12 colcheias. Quando o número superior for divisível por três, a música é em compasso composto, isto é, as unidades representadas pelo número inferior são agrupadas três a três. Assim $12/8$ significa não apenas que existem 12 colcheias por compasso, mas que essas 12 formam quatro grupos, de três colcheias cada. Algumas fórmulas são expressas com um sinal semelhante à letra C; esse sinal foi difundido para indicar o compasso quaternário ($4/4$) [GROVE 1994]. A fórmula de compasso pode ser representada por uma barra vertical, (**SINAL**), esse sinal representa normalmente $2/2$. A Fig. 2.9 ilustra as principais fórmulas de compasso utilizadas na notação moderna.

Compasso Simples é um compasso musical cujos tempos são divisíveis por dois. Compasso Composto é um compasso em que cada tempo é divisível por três.


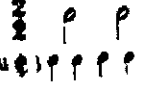

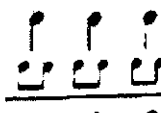

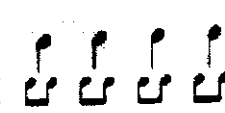

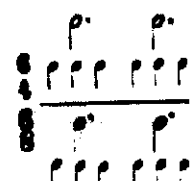
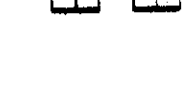
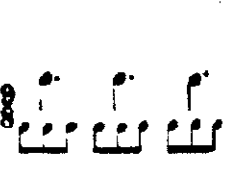

| | Binário | Ternário | Quaternário |
|----------|--|--|---|
| Simples | $\frac{2}{4}$  $\frac{2}{2}$  (ou C)  | $\frac{3}{4}$  $\frac{3}{8}$  | $\frac{4}{4}$  (ou C)  |
| Composto | $\frac{6}{4}$  $\frac{3}{2}$  | $\frac{9}{8}$  | $\frac{12}{8}$  |

Figura 2.9: Fórmulas de Compasso.

2.3.3 Valor das Notas

As relações entre os formatos das notas e os valores rítmicos que elas representam foram codificadas pela primeira vez no século XIII por Franco de Colônia e outros [GROVE 1994]; contudo, algum tempo depois, uma nota podia representar, dentro de um sistema de valores, tanto duas quanto três vezes a duração da nota seguinte de valor inferior. O atual sistema "ortocrônico", que fixa a razão 2 entre cada nota e sua subsequente de menor duração, é usado desde o século XVI. A colocação de um ponto após uma nota, desde essa época, indica que a nota deve ter sua duração prolongada em cinquenta por cento.

No decorrer dos últimos 700 anos os valores das notas vêm sendo reduzidos, e notas de menor duração passaram a servir como a unidade básica de tempo. Uma semibreve era uma nota de duração breve ou moderada na música do século XV, mas atualmente é uma nota longa. Em geral, a semínima é hoje encarada como a pulsação padrão; na transcrição da música antiga, é portanto habitual reduzir os valores das notas por um fator que varia entre 16 (para a música medieval antiga) e 2 (para a música do século XVI) [GROVE 1994].

2.3.4 Tempo

É a pulsação básica subjacente à música; é a unidade fundamental do compasso. Contratempo é qualquer acento num padrão rítmico regular, exceto sobre o primeiro tempo (o *tempo forte*). *Tempo Forte* é o tempo mais acentuado de um compasso, sendo que em geral o primeiro tempo é sempre o mais forte e *Tempo Fraco* é o tempo menos acentuado de um compasso.

Acento, por sua vez, é o destaque dado a uma ou mais notas na interpretação, normalmente através de um nítido aumento de sua intensidade sonora ou de sua duração.

2.4 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado uma descrição sucinta dos principais conceitos musicais que servem como base teórica musical para este trabalho, além da

será mostrado a área de inserção do trabalho (Computação & Música) e a utilização de robôs para execução de tarefas musicais.

No capítulo 5 será mostrado como o RITMUSROB utiliza alguns destes conceitos rítmicos para a sua tarefa de acionamento percussivo. No apêndice B apresenta-se os elementos percussivos (instrumentos e componentes), mostrando informações resumidas, mas relevantes para o conhecimento do âmbito do trabalho.

3. COMPUTAÇÃO E MÚSICA

3.1 Resumo

Neste capítulo, apresentam-se as motivações à evolução da atividade do ritmo dentro da percepção humana. Na seqüência é apresentado um histórico da área de *Computação e Música*, o envolvimento da música com a Inteligência Artificial (IA) e ainda uma descrição sucinta dos sistemas especialistas e dispositivos para performance, além de uma pequena abordagem à Robótica para situar o trabalho de implementação do RITMUSROB. Por fim, alguns exemplos de robôs aplicados à música.

3.2 Motivações

Não é de hoje que o homem articula no sentido de resgatar valores artísticos criados por si. O gosto pela reprodução de certos momentos repletos de criatividade, desde cedo fez com que o homem trabalhasse na perspectiva de, por algum meio, conseguir reviver as emoções proporcionadas pelos mesmos. Neste panorama, desde então várias técnicas foram experimentadas com o claro objetivo de manipulação e domínio do processo inventivo com a intenção de reproduzi-lo e resguardá-lo para seu próprio deleite noutro momento.

A partir desta consciência, o homem fez e ainda faz muita coisa para tornar-se, cada vez mais, senhor das suas habilidades. Em se tratando de música, especificamente, há muito tempo, o interesse sobre este despertar vem motivando uma percepção crescente.

Desde a criação dos primeiros instrumentos rudimentares, o caminho foi um só. Paus, pedras, couros e cordas geravam sons, já em épocas remotas. As manifestações sensitivas eram, então, esboçadas nos primeiros ritmos, e as diferentes cadências (andamento da música) expressavam características peculiares a quem as emitia.

Mas a música primitiva provavelmente não era restrita à percussão. É certo que a expressão rítmica foi anterior à expressão sonora, pois o ritmo é mais "corporal" do que o som [RATTON 1992]. A observação e a subsequente experimentação levaram o ser humano a desenvolver com a sua voz, as primeiras melodias, exaltando *alturas* e *timbres*. E com o domínio do ritmo, já existente, foram criadas as primeiras músicas constituídas de um mínimo de dois dos três elementos fundamentais à sua existência. A harmonia, surgiria a posteriori.

Os recursos científicos e técnicos da sociedade atual, aliado ao uso dos computadores e dos dispositivos digitais, tornam os processos da composição da música e sua produção mais disponíveis. Com a aplicação extensiva dos computadores na geração e no processamento do som e da composição da música, a partir dos níveis do micro ao macro formal, os compositores provocaram uma interdependência robusta entre domínios do pensamento científico e musical. Não somente a ciência e a tecnologia enriqueceram a música contemporânea, como o contrário também é verdade: os problemas de importância musical particular em alguns casos, sugerem diretamente problemas de importância científica e tecnológica. Cada uma com suas próprias motivações, música e ciência dependem uma da outra e assim fazendo, definem um relacionamento original em benefício mútuo.

O uso da tecnologia na música não é novo, entretanto, alcançou um nível pertinente com o desenvolvimento rápido dos sistemas computadorizados. Os sistemas computadorizados modernos abrangem os conceitos que estendem além daqueles que são intrínsecos às máquinas físicas, elas mesmas. Um dos atributos distintivos de computar são as linguagens de programação.

Programar envolve processos mentais e atenção rigorosa aos detalhes envolvidos numa composição. Assim, não surpreende que os compositores tenham sido os primeiros artistas a fazerem o uso substancial dos computadores. Houve razões para integrar algum conhecimento científico essencial e conceitos através da consciência musical e para ganhar competência em áreas que eram estranhas à música. Duas razões estavam compelindo particularmente: a generalidade da síntese pelo computador; e a

potência de programação com relação à estrutura musical e ao processo de composição [ROADS 1985].

A base do conhecimento da Computação e Música compõe-se da acústica, da psicoacústica, do processamento de sinais, da síntese, da composição, da performance, da ciência da computação, e da engenharia elétrica. Assim, o campo da Computação e Música reflete um espírito interdisciplinário. Pope [POPE 1994] relacionou as áreas da Computação e Música. Para cada área foram atribuídas classes com subclasses.

Sendo o RITMUSROB um robô destinado à tarefa de execução rítmica, está inserido portanto na área de Performance e Interfaces.

3.3 Histórico da Computação & Música

Desde o século XIV que o homem vem procurando meios mecânicos e posteriormente elétricos e magnéticos para armazenar sua música. [TEIXEIRA 1997] Os *Carrilhões Mecânicos* (capazes de armazenar cerca de 9000 notas), as baterias automáticas (*Polyphon* - 1904) e o *Componium* (produzia variações sobre um tema dado) são alguns exemplos disto. Em meados do século XIX, alguns aparelhos reprodutores de música, já eram comercializados (caixinhas de música, pianolas, etc.). Em 1906, Thaddeus Cahill inventou o *Dynamophone*, composto de indutores eletromagnéticos. Em 1924, Leon Theremin, inventou um instrumento batizado com o seu nome.

Na França na década de 40, surge um movimento chamado *Musique Concrète* (Música Concreta) que fazia uso de fitas magnéticas de alta fidelidade nas quais se gravavam sons naturais [LOVELOCK 1987] [COPLAND 1969]. Os arquivos magnéticos dos sons podiam ser revisados e posteriormente alterados, de maneira a torná-los irreconhecíveis. Esta manipulação de fitas foi apresentada pela primeira vez em 1948.

Na década de 50 na Alemanha, Karlheinz Stockhausen fundou o Laboratório de Música Eletrônica que utilizava as teorias de Fourier como principal apoio científico

concreta, concentrando-se em sons sintéticos produzidos por geradores analógicos de tonalidades.

Foi porém o surgimento dos computadores digitais e a sua disseminação após a Segunda Guerra Mundial que possibilitou a codificação digital, geração, registro digital e análise musical [ROADS 1985].

O desenvolvimento da Música aliada à Computação, descrito por Moore [MOORE 1996], é dividido em quatro períodos de dez anos.

A primeira década foi iniciada em 1955 e o expoente deste primeiro período foi o americano Lejaren A. Hiller que era químico e compositor amador e através do uso da matemática na Química, acabou vislumbrando a possibilidade de transportar as idéias dos processos estocásticos para a Música. Até então, o computador não produzia e nem controlava nenhuma espécie de som; ele apenas gerava dados para a confecção de uma partitura, ficando a execução a cargo dos músicos.

Nesta mesma época, em 1957, o computador passou a controlar e a gerar sons. O responsável por isso foi o americano Max Mathews, engenheiro da AT & T Bell Telephone Laboratories e violinista amador. A idéia de Mathews era, utilizando os mesmos princípios da telefonia, converter os sinais digitais fornecidos pelo computador em sinais analógicos, controlando, assim, um alto-falante.

Em princípio, o sistema de Mathews, chamado *Music I*, era capaz de sintetizar qualquer espécie de som. No entanto, na prática, a coisa era bastante diferente. Primeiro pelas pressões vindas de críticas e preconceitos inerentes a qualquer trabalho pioneiro. Segundo, por dificuldades como a demora na programação advinda das dificuldades de alimentação e recuperação de dados. Além do resultado sonoro, o *Music I* dava como saída material, um grande conjunto de informação, o que tornava bastante lenta a leitura de dados. Além disso, terminado o trabalho da sintetização, havia também o esforço, nem um pouco trivial, para a conversão analógica em fita magnética.

O segundo período (1965 - 1975) foi caracterizado pelo processamento digital de sons. Havia duas possibilidades: ou se tentava imitar o som de instrumentos que já

existiam ou se produziam novos sons. Tanto numa como noutra opção, a dificuldade era evidente com os recursos computacionais existentes. Um dos expoentes dessa época foi o físico e compositor francês Jean Claude Risset, dos Laboratories Bell, que juntamente com Max Mathews, trabalhou com a sintetização do som do trompete. O trabalho anterior de Mathews com o *Music I* tinha servido para mostrar aos músicos as propriedades e virtudes do som musical, bem como as suas alterações físicas e psicológicas.

Como resultado das pesquisas de Risset, chegou-se à conclusão que o que determina a característica do timbre de um instrumento é justamente o número de harmônicos contidos no som. A emissão de um som por um instrumento de metal e também pela maioria dos instrumentos está representada na figura 3.1 (onde a abcissa representa o tempo). Pode-se detectar quatro fases distintas: a primeira, que corresponde à linha ascendente vertical, é o que chama de *ataque* da nota; a segunda (linha horizontal) corresponde à *sustentação* do som; a isto, segue-se a fase cujo som decresce a um nível mínimo (*declínio*); logo depois vem a fase de *silêncio*: a nota deixa de ser emitida.

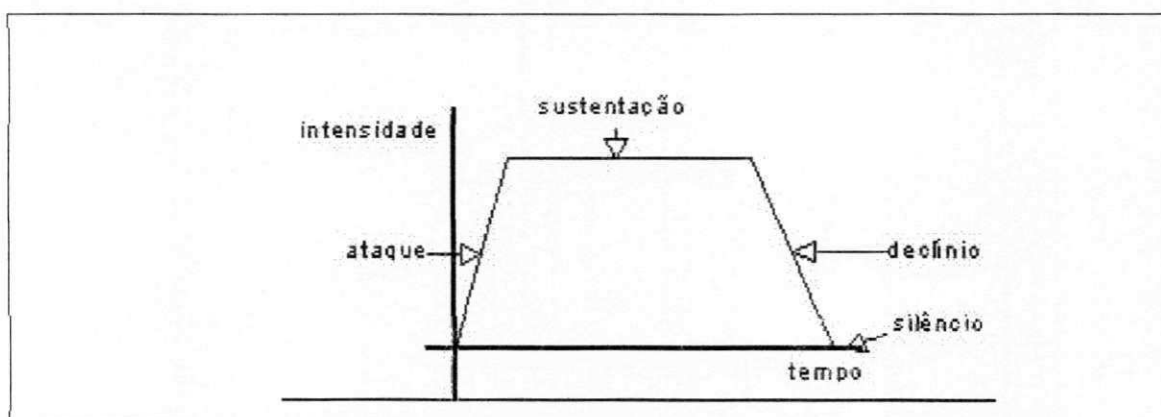


Figura 3.1: Gráfico de um Envelope de Som.

Paralelo ao trabalho de Risset, o físico Pierre Ruiz, descreveu o comportamento de sistemas físicos, incluindo os instrumentos musicais, através de equações diferenciais. Utilizando um computador, ele sintetizou o som de um violino, considerado, na época, o som sintetizado mais aproximado do instrumento verdadeiro.

desenvolvido em 1967 por Richard Moore e Max Mathews que era capaz de economizar tempo no trabalho de síntese de som. O Music I foi programado em Fortran IV.

No final da década de 60, John Chowning investigou o efeito de vibrato de uma nota e acidentalmente alterou um dos parâmetros responsáveis por este efeito [MOORE 1996]. Esta alteração gerou como saída um timbre totalmente diferente do esperado. Desta forma, Chowning acabava de descobrir a síntese por modulação de frequência.

O terceiro período (1975 - 1985) foi marcado pela revolução digital com a disseminação dos microprocessadores. A partir daí, um maior número de pessoas passaram a ter acesso a esta tecnologia, em particular em sua aplicação na música. Aos poucos foram surgindo estúdios caseiros.

O grande acontecimento desse período foi o surgimento do padrão *MIDI specification 1.0* "Musical Instrument Digital Interface" (Interface Musical para Instrumentos Musicais). O MIDI apareceu como forma de unificar um protocolo comum de comunicação entre sintetizadores, seqüenciadores, computadores e qualquer outro tipo de aparelho que suportasse informações digitais. Até a década de 70, os sintetizadores analógicos tinham como modo de comunicação a variação de tensão (por exemplo: o aumento de 1 volt significava uma oitava acima, etc.). O MIDI, através de acopladores óticos, passou a comandar estas informações de maneira digital e com mais segurança [RATTON 1992].

Segundo Miguel Ratton, o quarto período (1985 - 1995), é a época da revolução virtual:

"Computadores, processamento digital e instrumentos repletos de recursos, tudo isso a um custo acessível para muitas pessoas, têm levado profissionais da área de música a optar pela realização individual de todo um trabalho musical, em sua casa... A facilidade de veiculação (mídia) do trabalho musical, aliada às perspectiva de lucro (financeiro) devido a sua divulgação e venda em massa, tem determinado rumos, às vezes questionáveis, para a expressão musical" [RATTON 1992].

3.4 Música e Inteligência Artificial

Como foi visto anteriormente, desde as pesquisas de L. Hiller e de seu desejo de possuir uma máquina capaz de compor e fazer críticas, uma porta foi aberta para as pesquisas em Computação e Música [TEIXEIRA 1997]. Apesar da pretensão, desde os anos 50, de se obter uma máquina voltada à Música, foi somente em 1980, em um artigo publicado por Curtis Roads [ROADS 1985], que as potencialidades da aplicação da Inteligência Artificial foram expostas.

Segundo E. Miranda [MIRANDA 1990], um sistema pode ser dito inteligente em música, se for capaz de, dentro do domínio da música (seja de composição, análise, arranjo, execução, educação musical, etc.), resolver novos problemas; absorver novos conhecimentos; explicar, justificar e, se for o caso, sugerir possibilidades de resposta a um usuário aprendiz; e se adaptar a situações novas e inesperadas, passíveis de resolução [FRITSCH 1994].

3.4.1 Sistemas Especialistas

Os *Sistemas Especialistas (SE) em Música* são constituídos de um banco de conhecimento sobre um domínio específico da Música. Esta especificidade se dá por existirem diferentes abordagens para um determinado objeto musical, seja quanto à análise, à construção harmônica e/ou melódica à interpretação, etc. Como exemplos de Sistemas Especialistas em Música recentemente desenvolvidos aqui no Brasil, pode-se citar o SETMUS [FRITSCH 1995], Expert Piano [GLANZMANN 1995] e o SIEDP [VIANA 1998]. Espera-se que estes tipos de sistemas possuam o máximo de conhecimento que um especialista possa fornecer. Uma das grandes questões dos SE, relacionada com aquisição do conhecimento, está ligada ao "ruído" possível na interação especialista - engenheiro de conhecimento - sistema [TEIXEIRA 1997].

3.4.2 Redes Neurais e Processamento Paralelo Distribuído

Enquanto, por um lado, existe uma IA baseada na resolução de problemas através de processamentos simbólicos (IA simbólica) [LASKE 1989], por outro existe

É neste segundo caminho que se enquadra as Redes Neurais e o Processamento Paralelo Distribuído. Dentro dessa maneira de pensar já existem trabalhos nas áreas de análise harmônica, reconhecimento de timbres, reconhecimento de padrões rítmicos, síntese musical, etc. [TEIXEIRA 1997]. Nesse sentido podemos citar [BECKENKAMP 1995], [PÉREZ 1995] e [CARPINTEIRO 1995].

3.4.3 Dispositivos para Performance

Em geral, quando se fala em interfaces para músicos, pensa-se logo em um teclado. No entanto, hoje em dia existe uma grande variedade de dispositivos destinados a diminuir ao máximo a distância entre uma peça musical e a máquina responsável pela sua execução. Atualmente, existem dispositivos que permitem aos violonistas, aos instrumentistas de sopro, etc., se utilizarem de tecnologia sem perda de espontaneidade [RUBIN 1996]. A IA entra aqui com o intuito de integrar, literalmente, o músico e a máquina. Nesse caso, sensores são desenvolvidos com a capacidade de poder gerar música, seja através de instrumentos parecidos com os tradicionais, seja pelo uso de propostas inovadoras [TEIXEIRA 1997].

Pode-se dizer que são cinco, as principais áreas da música: Composição, Performance, Teoria, Processamento de Som e Educação Musical. Na área específica dessa dissertação, observa-se a ligação entre Música e Inteligência Artificial.

3.4.4 Performance

A Performance é uma das áreas da música que mais evolui, principalmente pelos ditames do mercado. Desde o *Theremim*, de 1919 [Ver seção 3.3], buscaram-se novas interfaces que possibilitem a execução de música eletroacústica em tempo real [MANZOLLI 1995]. No início, as composições eram feitas em sintetizadores e computadores, a seguir eram gravadas em fitas magnéticas, logo após eram executadas por um ou mais músicos humanos. Para ser executada, o grande inconveniente era ativar o gravador e a sua sintonia com o músico humano

A Inteligência Artificial busca aumentar a flexibilidade e a espontaneidade do executante [ROADS 1985]. O desafio maior em performance continua sendo a necessidade e o desejo de se fazer síntese de som em tempo real.

Os problemas encontrados em *Computação e Música* ainda persistem apesar do progresso conseguido nos últimos 20 anos. Cada vez mais surgem trabalhos em áreas especializadas e bem definidas. Partindo da área de Performance, pode-se chegar em algumas especializações e, em especial, ao uso da Robótica aplicada à música que será discutido a seguir.

3.4.5 Robótica

O termo robô surgiu numa peça de teatro, em 1923, criado pelo escritor checo Karel Capeck. Nesta peça, Capeck fez uma sátira à civilização mecanizada da época. A peça, denominada *Rossum's Universal Robots*, descreve máquinas andróides fabricadas para realizar tarefas tediosas para a humanidade.

Um robô é um dispositivo mecânico motorizado e controlado por computador que pode ser programado para fazer automaticamente uma variedade de tarefas. Uma vez programado, os robôs podem realizar suas tarefas sem supervisão humana [SALANT 1990].

O estudo da organização básica e operação de robôs baseados em computadores é denominado Robótica. Robótica está ligada à pesquisa em manipuladores, sensores, linguagens de programação, planejamento e inteligência de máquina.

Ao se estudar a inteligência artificial da máquina, estar-se interessado em explorar as técnicas de Inteligência Artificial que possibilitem desenvolver melhores robôs. Nesta categoria, o robô é visto como um dispositivo autônomo capaz de entender comandos, sentir seu ambiente, reconhecer ou mover objetos e elaborar um roteiro próprio de ações no sentido de efetuar a tarefa desejada ou ainda a execução de uma tarefa musical.

A maioria dos robôs têm três partes essenciais: uma base fixa, um braço articulado (manipulador) e uma unidade de controle. A base fixa geralmente é um

pedestal preso ao chão, às paredes, ao teto ou montada em outra máquina [SALANT 1990]. O braço articulado pode ser formado por várias partes: elos, juntas, atuadores de juntas, sensores de posição de juntas e órgão terminal (mão do robô). A mão do robô que pode ser usada para mover objetos ou ferramentas utilizadas para fazer tarefas especiais. O Acionador Percussivo Inteligente (RITMUSROB), objeto da presente dissertação de mestrado, utiliza um braço pendular como baqueta percussiva aproveitando as características de movimentação do mesmo.

A unidade de controle ou o controlador representa o cérebro do robô [SALANT 1990]. Um robô é um sistema mecânico que deve ser controlado a fim de realizar uma tarefa útil. Essa tarefa pode envolver o movimento do braço articulado ou de uma ou mais de suas partes [GROOVER 1988]. O controlador de um robô, recebe sinais de entrada dos sensores e transmite sinais de saída para os atuadores. Os sinais de entrada dos sensores incluem dados de posição das juntas do robô, da posição da garra, etc.

A Figura 3.2 ilustra um diagrama de blocos geral dos componentes de um sistema de controle para uma junta de um robô.

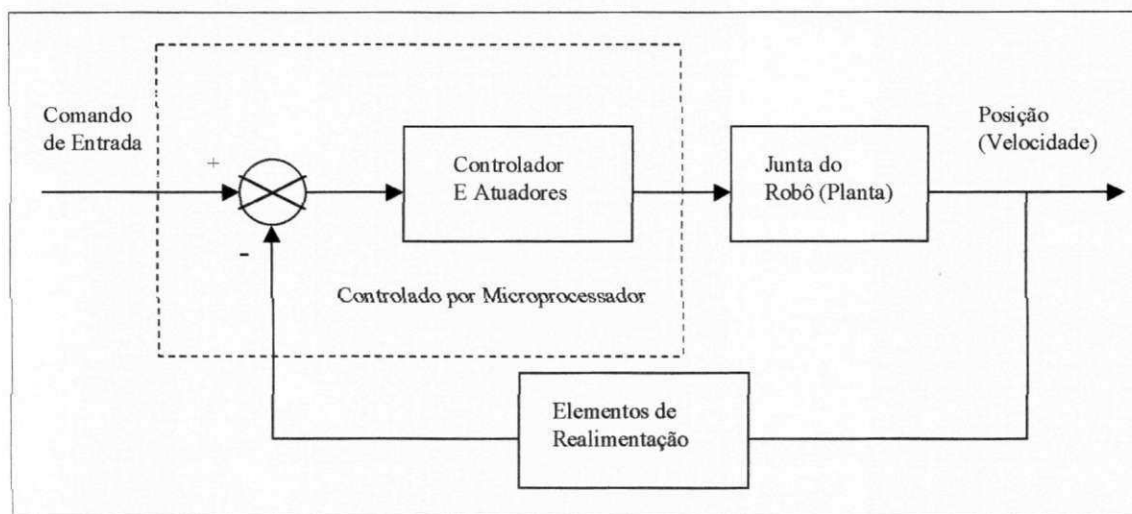


Figura 3.2: Configuração de Diagrama de Bloco Típica de um Sistema de Controle para uma Junta de Robô.

3.5 Música e Robótica

A aplicação da robótica na música, ocorreu de forma mais significativa a partir da década de 80. Alguns robôs foram desenvolvidos para atuarem na área de performance musical, desenvolvendo tarefas de execução. Em muitos casos, os robôs atuam fazendo parte de um sistema mais complexo.

O WABOT2, um robô construído por um grupo da Universidade de Waseda (Tóquio), interpreta sinais de voz, sinais musicais e a notação visual de uma partitura. Pode responder aos pedidos de canção feitos em língua japonesa, e pode ler a notação da música (partitura). Ao ler uma partitura colocada em sua frente (ele capta as imagens através de uma câmara), o WABOT2 planeja seu desempenho. O WABOT2 pode também acompanhar um cantor humano. Se o cantor variar a entonação original ou ritmo, o robô faz ajustes na tentativa de acompanhar o cantor. A Figura 3.3 mostra o WABOT2.

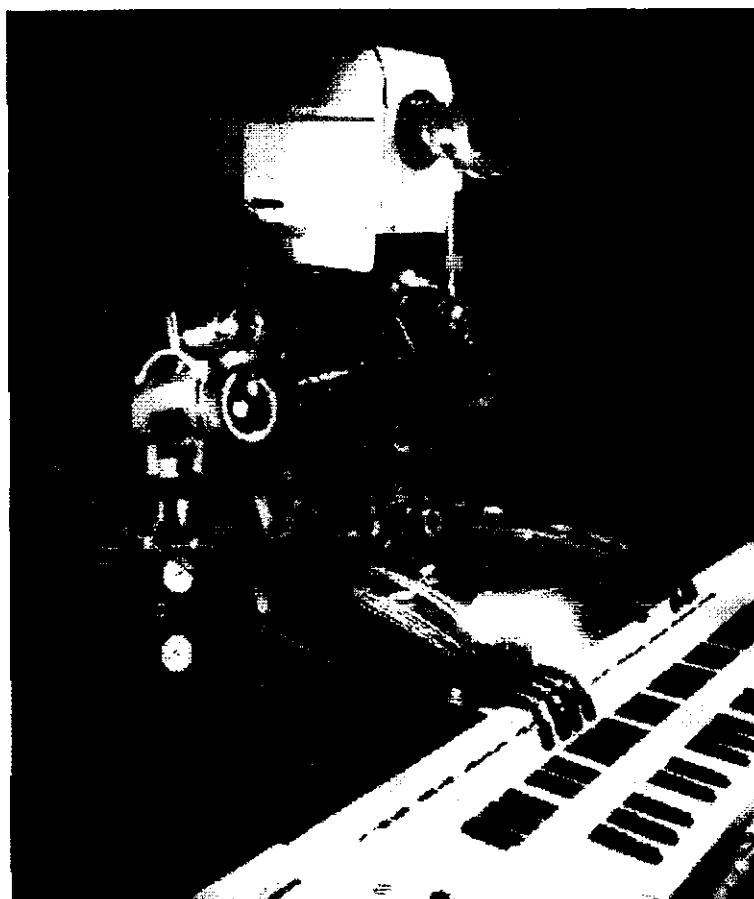


Figura 3.3: Robô WABOT2, Robô Pianista.

Na Universidade de Eletrocomunicações de Tóquio foram desenvolvidos os MUBOT's, que são robôs capazes de executar em violinos e violoncelos, partituras clássicas gravadas previamente em seus programas. A Figura 3.6 mostra um MUBOT executando um trecho num violoncelo e a Figura 3.7 mostra um MUBOT tocando violino.

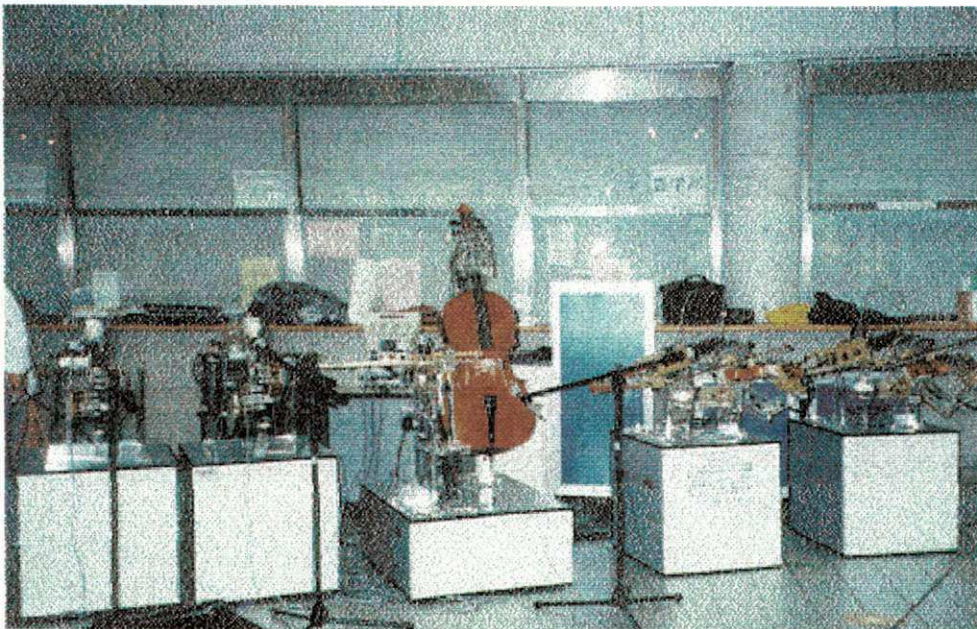


Figura 3.4: MUBOT tocando Violoncelo.

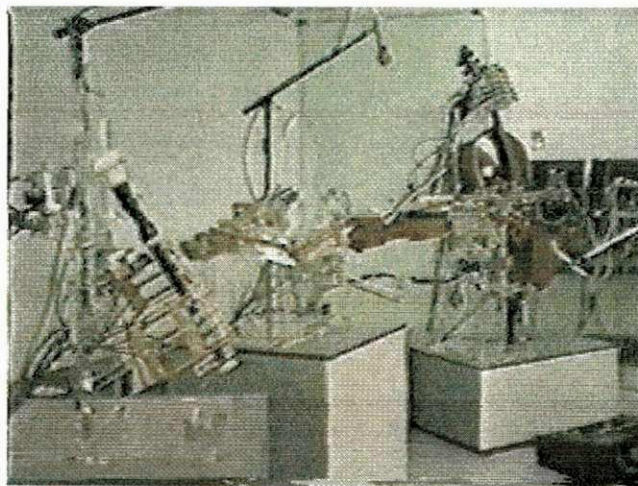


Figura 3.5: MUBOT tocando Violino.

3. 6 Conclusões

Neste capítulo foram feitas algumas considerações acerca da área de *Computação e Música* e a aplicação da Inteligência Artificial e da Robótica na mesma. Apresentou-se o histórico e uma classificação minuciosa da área de *Computação e Música*, uma abordagem da IA e da robótica em relação a área de interesse do trabalho. As definições e informações contidas no capítulo foram dispostas de forma a direcionar a leitura do trabalho para o campo da utilização de robôs na performance musical, onde se encaixa o Acionador Percussivo Inteligente, RITMUSROB, aqui proposto.

4. REDES NEURAIIS & LÓGICA NEBULOSA

4.1 Resumo

Neste capítulo serão abordados, os paradigmas da IA utilizados no desenvolvimento do acionador percussivo inteligente, RITMUSROB. Inicialmente, considera-se algumas definições relativas às Redes Neurais Artificiais como os tipos de neurônios e as redes neurais multicamadas. Na seqüência é mostrada, ainda que de forma superficial, a Lógica Nebulosa e seus fundamentos para em seguida abordar-se os sistemas de controle neuronebulosos e suas classificações.

4.2 Sistemas Neuronebulosos

O progresso da computação, fez surgir várias técnicas de desenvolvimento de sistemas para a área de Inteligência Artificial dentre elas, as Redes Neurais Artificiais [ADEODATO 1991]. As Redes Neurais Artificiais possuem características que as tornam importantes às aplicações de IA. Elas têm capacidade de adaptação, tolerância a ruído, velocidade de processamento e facilidade de implementação, entre outros, tornando-se assim indicadas em aplicações que exigem processamento em tempo real [JÚNIOR 1997].

A utilização da Lógica Nebulosa na Robótica é de grande valor devido a facilidade de descrição do comportamento de um robô com regras heurísticas, definidas a priori, por um especialista humano [UEBEL 1995]. [CAVALCANTI ET AL. 1994] mostrou que o uso de redes neurais junto com sistemas nebulosos num Sistema de Controle Inteligente (SCI) é capaz de controlar uma estrutura robótica elementar (planta) em tempo real. Este processo é denominado modelamento neuronebuloso.

Segundo D. Nauck, [NAUCK 1994], os sistemas neuronebulosos emulam a inteligência na manipulação de sistemas e problemas complexos. Os sistemas de controle neuronebulosos costumam ser usados no controle inteligente de robôs. Por exemplo, o braço de um robô com fricção na articulação é adequado para testes de estratégias de controle baseado em aprendizagem [ALSINA & CAVALCANTI 1997]. Neste trabalho, trata-se o pêndulo simples como um braço

robótico. A seguir, serão revistos alguns conceitos básicos das redes neurais e dos conjuntos nebulosos.

4.3 O Neurônio Biológico

A origem da teoria de redes neurais remonta aos modelos matemáticos e aos modelos de engenharia, de neurônios biológicos. Como qualquer célula biológica, o neurônio é delimitado por uma fina membrana celular que além da sua função biológica normal, possui determinadas propriedades que, são essenciais para o funcionamento elétrico da célula nervosa. O corpo celular ou *soma*, centro dos processos metabólicos da célula nervosa, estende-se em filamentos, *dendritos* e o *axônio* [KOVÁCS 1996].

Os *dendritos* cobrem um volume muitas vezes maior do que o do próprio corpo celular e formam uma árvore dendrital e servem como caminho para as entradas dos sinais eletroquímicos recebidos de outros neurônios para a *soma*. A *soma* por sua vez é responsável pela síntese de algumas moléculas necessárias para manter a vida do neurônio. A outra projeção filamentar do corpo celular, o *axônio*, também referido como fibra nervosa, serve para conectar a célula nervosa a outras do sistema nervoso. O *axônio* é eletricamente ativo e serve como canal de saída do neurônio.

O neurônio biológico possui muitas entradas e uma saída. As entradas ocorrem através das conexões sinápticas, que conectam a árvore dendrital aos *axônios* de outras células nervosas. Os sinais que chegam por estes axônios são pulsos elétricos denominados de impulsos nervosos ou potenciais de ação, e constituem a informação que o neurônio processará de alguma forma para produzir como saída um impulso nervoso no seu *axônio*.

As *sinapses* são regiões eletroquimicamente ativas, compreendidas entre duas membranas. Nesta região intersináptica, o estímulo nervoso que chega a *sinapse* é transferido à membrana dendrital através de substâncias conhecidas como *neurotransmissores* [KOVÁCS 1996]. A Figura 4.1 mostra a representação simplificada de um neurônio biológico.

A depender do tipo do neurotransmissor, a conexão sináptica pode ser excitatória ou inibitória. Quando for excitatória provoca uma alteração no potencial da membrana que contribui para a formação de um impulso nervoso no *axônio* de saída enquanto que quando for inibitória, agirá no sentido oposto.

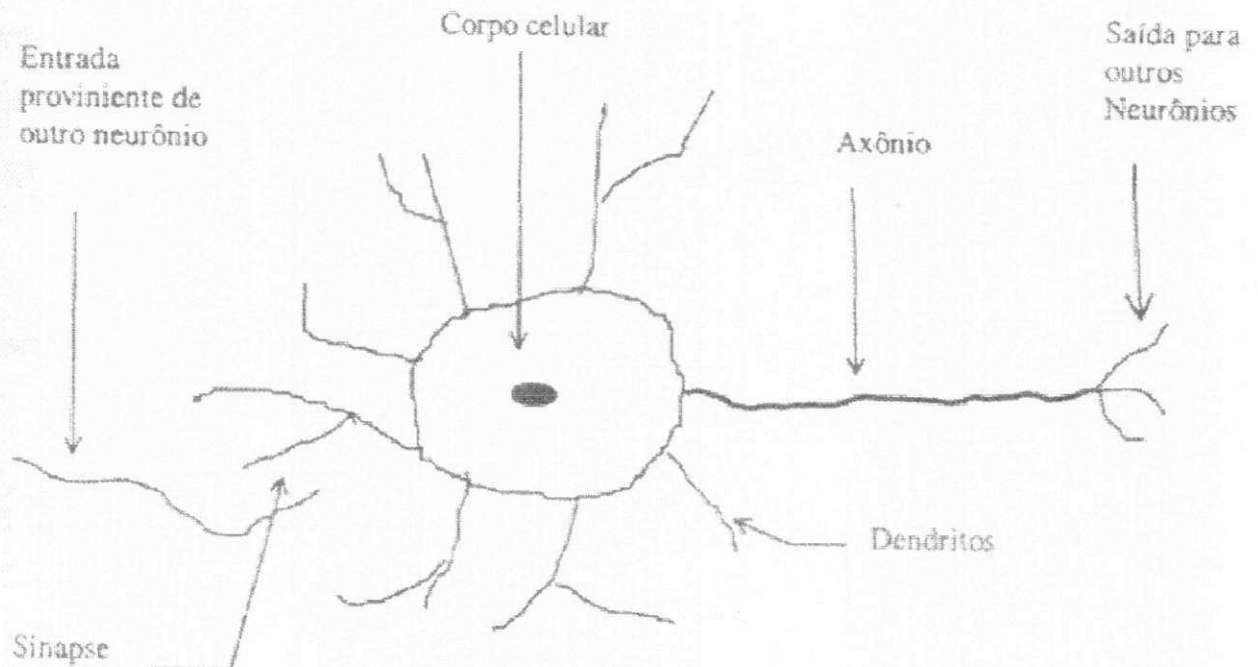


Figura 4.1: Representação de um Neurônio Biológico.

4.4 O Neurônio Artificial

Em 1943, McCulloch & Pitts [MCCULLOCH & PITTS 1943] propuseram um neurônio artificial que agia como um dispositivo binário. A sua saída poderia ser ativa e não ativa, e as suas várias entradas tinham ganho arbitrário e poderiam ser excitatórias ou inibitórias. Para determinar a saída do neurônio, calculava-se a soma ponderada das entradas com os respectivos ganhos como fatores de ponderação, positivos nos casos excitatórios e negativos nos casos inibitórios.

Os pesos das conexões e os valores das entradas dos neurônios, assumem quaisquer valores reais. Uma sinapse mais eficiente (que transmitirá mais o sinal) ocorrerá com um peso maior do que a média aritmética dos pesos e uma sinapse mais fraca será modelada caso este peso seja menor do que a esta média. Segundo, D. O. Hebb [HEBB 1949], aprendizagem neste caso, é o processo conhecido como treinamento sináptico de modificar os valores dos pesos. Na Figura 4.2 é apresentado o diagrama do neurônio artificial proposto por McCulloch & Pitts.

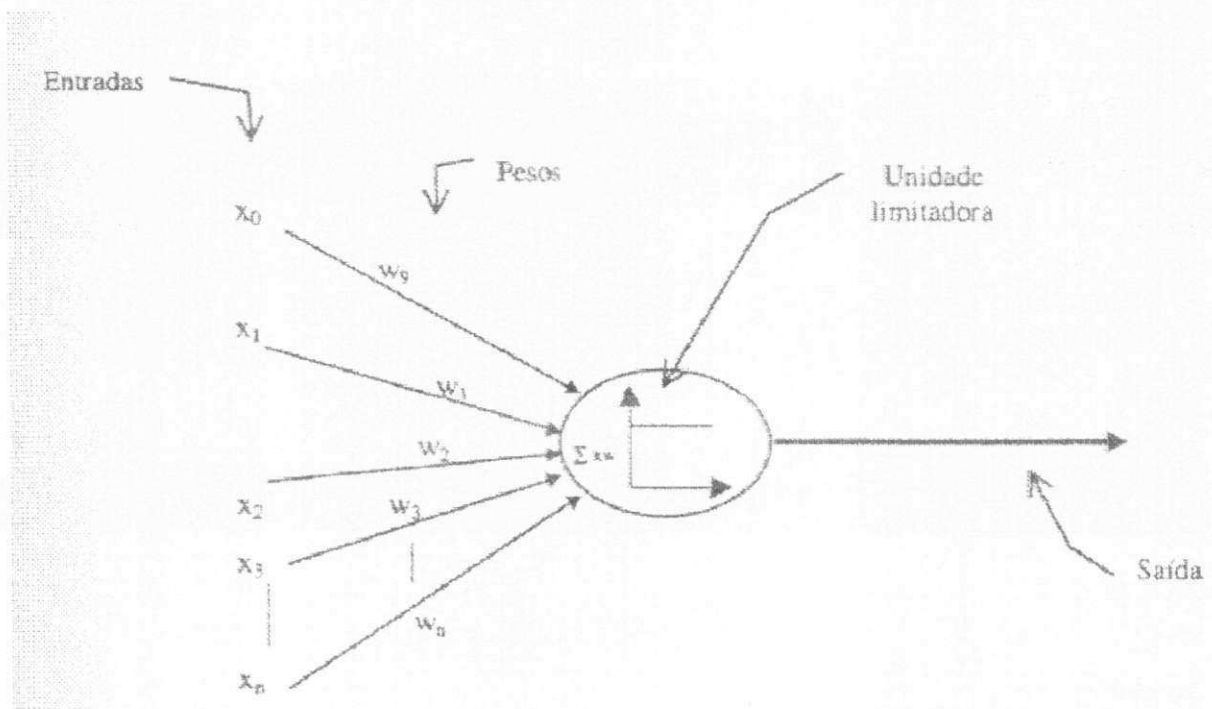


Figura 4. 2: Neurônio Artificial.

4.5 Tipos Básicos de Neurônios Artificiais

No final da década de 1950, Rosenblatt na Universidade de Cornell, deu prosseguimento às idéias de McCulloch. Ele criou uma genuína rede de múltiplos neurônios e chamou-a de *perceptron* [KOVÁCS 1996]. Um *perceptron* é uma rede de neurônios artificiais com uma topologia apresentada na figura 4.3. O *perceptron* possui três partes: entrada, parte intermediária e saída. O perceptron tem suas entradas representadas por X_i , e os pesos das respectivas entradas representados por W_i . A saída da parte intermediária é representada pela equação 4.1:

$$Y(t) = \sum_i X_i W_i$$

O valor de saída do neurônio é dado pela equação 4.2:

$$Z(t) = f(Y(t))$$

A função $f(\cdot)$, função de ativação, geralmente é não-linear.

Um neurônio artificial muito usado, também, é o neurônio de Hopfield. A principal característica deste neurônio é possuir um integrador em sua saída que permite a memorização dos estados anteriores. A Figura 4.4 mostra o neurônio de Hopfield, suas entradas, parte intermediária e saída.

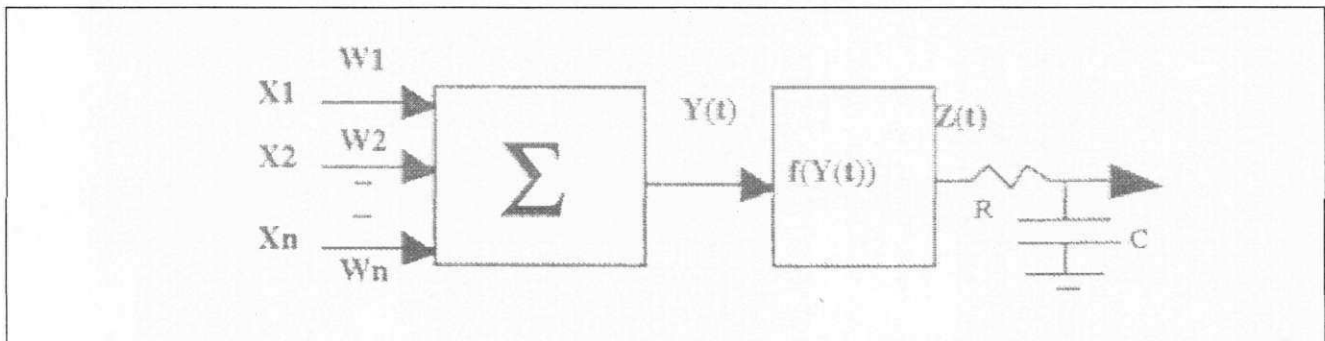


Figura 4.3: Neurônio de Hopfield.

Os neurônios artificiais podem ser classificados quanto à sua função de ativação. A seguir serão apresentados os principais tipos de neurônios artificiais:

4.5.1 O Neurônio Linear

O neurônio linear tem como função de ativação uma função linear do tipo:

$$Z(t) = f(Y(t)) = \alpha \sum X_i(t) W_i(t) \text{ para } -1 \leq Y \leq 1, \alpha = \text{constante}$$

A função $Z(t)$ é mostrada na Figura 4.5.

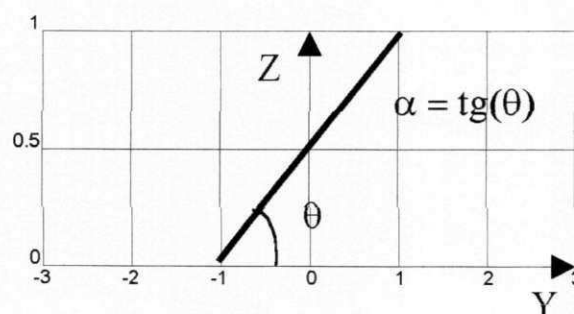


Figura 4.4: Função de Ativação Linear.

4.5.2 O Neurônio Lógico

O neurônio lógico ou neurônio binário, tem como função de ativação a função degrau: $Z(t)=1$ se $Y(t)>0$, onde $Y(t)=\sum X_i W_i$ e $Z(t)=0$ em caso contrário. A Figura 4.6 mostra o comportamento da função lógica deste tipo de neurônio.

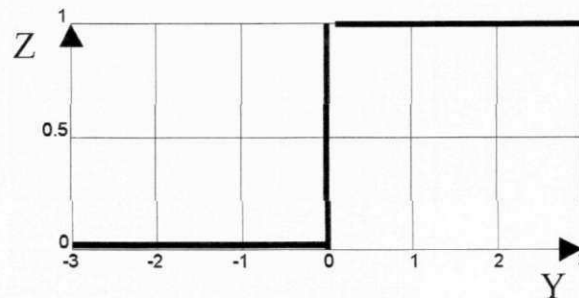


Figura 4.5: Função de Ativação Lógica.

4.5.3 O Neurônio Sigmóide

O neurônio sigmóide tem uma função de ativação sigmóide, que é uma função contínua, diferenciável e limitada. Esta função é descrita pela equação 4.3:

$$Z(t) = \frac{\theta}{[1 + e^{-\beta Y(t)}]}$$

onde

$$Y(t) = \sum X_i(t)W_i(t) + T$$

A Figura 4.6 mostra o seu comportamento para $\theta = 1$, $\beta = 1$ e $T = 0$. A curva de sua derivada é mostrada na Fig. 4.7.

Uma vantagem de usar a função sigmóide como função de ativação não-linear é que, para determinados valores de seus parâmetros, pode-se aproximar da função degrau em qualquer grau de aproximação desejado, permanecendo diferenciável [JÚNIOR 1997].

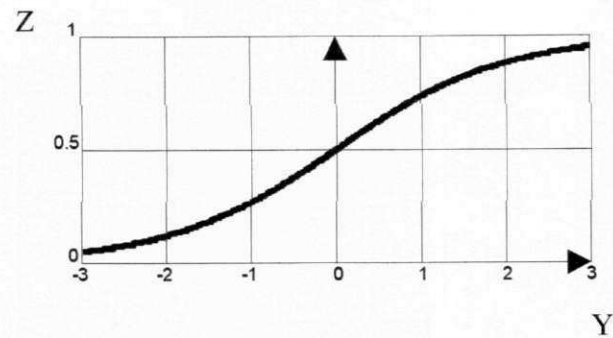


Figura 4.6: Função de Ativação Sigmóide.

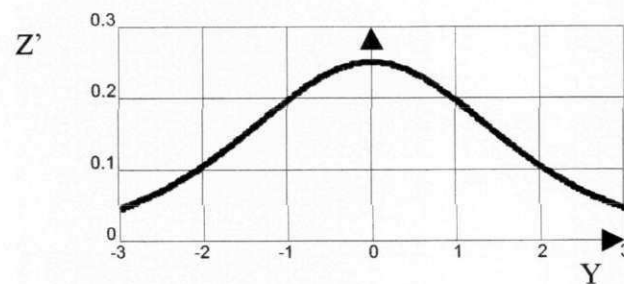


Figura 4.7: Derivada da Função de Ativação Sigmóide.

Os parâmetros β , θ e T especificam a forma da função. O parâmetro β controla a declividade da curva: valores grandes de β comprimem a função até quando $\beta \rightarrow \infty$, $Z(Y) \rightarrow$ função degrau. O parâmetro θ é o valor base da sigmóide. O parâmetro T é o deslocamento da curva sigmóide sobre o eixo Y (abscissa).

4.6 As Redes Neurais Multicamadas

As redes neurais artificiais são formadas pela associação de vários neurônios artificiais. A capacidade de processamento de um único neurônio artificial é pequena. A interligação de vários neurônios entre si, em estruturas paralelas e/ou seriais, como em uma rede, aumenta significativamente o poder computacional coletivo. Esse tipo de estrutura denomina-se rede neural artificial (RNA). Quando os neurônios artificiais estão associados, realizam de forma conjunta algumas das funções mais elementares da inteligência, em analogia aos cérebros biológicos. Essas funções são utilizadas para a realização automática de atividades consideradas “inteligentes”.

As RNAs podem modelar o sistema nervoso e simular sistemas físicos. As RNAs têm alcançado muito sucesso em tarefas que exigem uso de percepção, como por exemplo a fala e a visão. Fundamentam-se na idéia de que pequenas unidades de processamento simples (neurônios), interagindo entre si, terão um elevado poder computacional. São estruturas de processamento paralelas, onde um grande número de unidades participam do processamento. Tal fato, associado a um certo grau de redundância devido a que o conhecimento é distribuído por toda a RNA, o que faz com que ela tenha um comportamento, até certo ponto, tolerante a falhas.

As RNAs possuem tolerância a falhas e têm capacidade de aprender por experiência além de serem adaptáveis. Elas podem fazer abstrações, são capazes de generalizar e discriminar padrões, e podem ainda serem utilizadas para fazer previsões e controlar processos. Atualmente, as RNAs estão sendo utilizadas no reconhecimento de Padrões, nos Problemas de Otimização, nas Memórias Associativas e na Modelagem dos Processos de Cognição, entre outras aplicações [JÚNIOR 1997].

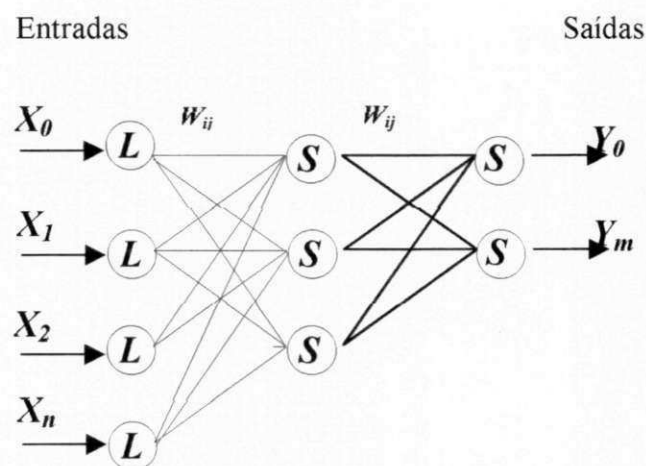


Figura 4.8: As Redes Neurais Artificiais Multicamadas (RNMC's).

A Figura 4.8 mostra o Perceptron Multicamadas. Nesta figura *L* representa neurônios com função de ativação linear e *S* representa neurônios com função de ativação sigmóide. O modelo mostrado tem três camadas, uma camada de entrada, uma camada de saída e uma camada entre essas duas, não conectada diretamente à entrada ou à saída, chamada de camada escondida. Cada neurônio da camada escondida ou da camada de saída de dados é um *perceptron*, porém a função de ativação é uma função sigmóide e não uma função degrau dos primeiros *perceptrons*. Os neurônios

da camada de entrada, com função de ativação linear, servem para distribuir os valores de entrada para a camada escondida.

4.7 A Lógica Nebulosa

Em 1965, na Universidade da Califórnia em Berkeley [ZADEH 1973], Lofti A. Zadeh propôs a Lógica Nebulosa (LN), Lógica Difusa ou Lógica “Fuzzy”. A Lógica Nebulosa utiliza uma faixa contínua de valores no intervalo $[0, 1]$ e pode ser considerada uma extensão da Lógica Booleana que só admite dois valores (verdadeiro ou falso). A Lógica Nebulosa é utilizada com êxito em sistemas com modelagem exata difícil. Ela avalia um modelo inexato de um sistema e permite que o sistema seja manipulado por um operador humano ou um especialista, oferecendo a possibilidade do sistema poder ser ambíguo e impreciso.

A Lógica Nebulosa representa os modos de raciocínio usando um sistema de variáveis lingüísticas mais próximo das formas de expressões humanas. Por exemplo, “positivo grande”, “negativo pequeno” etc. Na Lógica Nebulosa o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado.

A possibilidade de manipulação de informações vagas, ambíguas ou imprecisas disponibiliza a LN como base no desenvolvimento de métodos e algoritmos tanto para modelagem como para controle de processos. Ela oferece a redução da complexidade de um projeto e implementação, sendo uma opção para situações de modelagem e controle que são difíceis de serem abordadas pelas técnicas clássicas.

Na teoria clássica de conjuntos, um elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Já na teoria dos conjuntos nebulosos, um dado elemento pode pertencer parcialmente a um determinado conjunto, existindo um grau de pertinência relativa do elemento ao conjunto [CAVALCANTI 1998] [ZADEH 1963]. Por exemplo, a variável lingüística *altura* poderá assumir como valor qualquer um dos membros do conjunto $\{baixa, média, alta\}$. Para se atribuir um significado aos termos lingüísticos, é associado a cada um destes um conjunto nebuloso definido sobre um universo de discurso comum. Na Figura 4.9 x , na abscissa, representa a altura em metros e $\mu(x)$, na ordenada, representa a função de pertinência correspondente. $\mu(x)$ pode representar a variável lingüística altura como Baixa, Média ou Alta. A noção que o homem possui das grandezas físicas representam essas atribuições. Apesar do conceito da altura média ser inexato, ele é capaz de

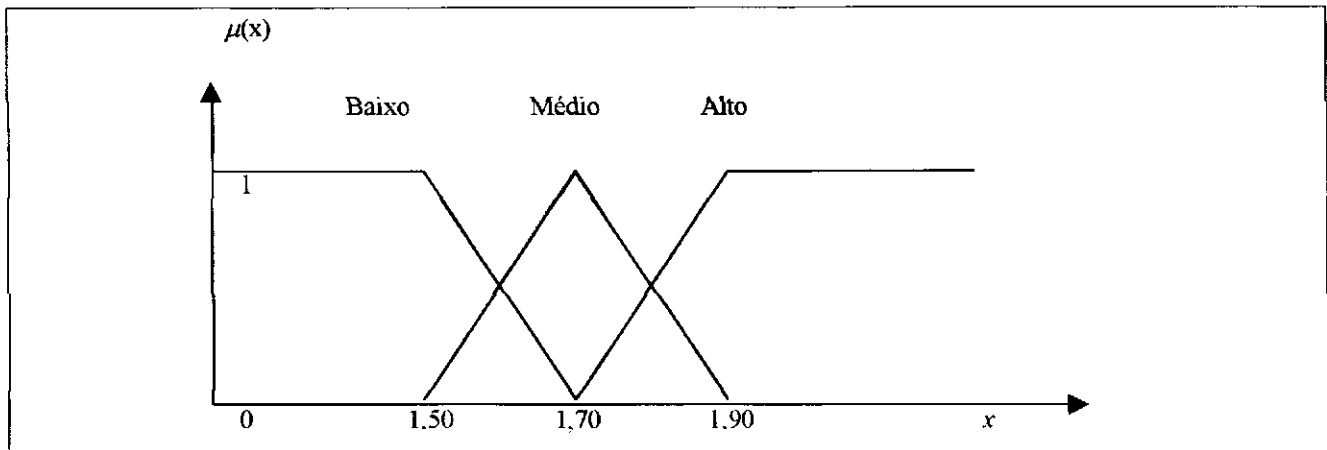


Figura 4.9: A Variável Linguística Altura.

A noção que o homem possui das grandezas físicas representam essas atribuições. Apesar do conceito da altura média ser inexato, ele é capaz de tomar decisões baseado nesse conhecimento “difuso” da grandeza física em análise.

Segundo [GOMIDE 1994], nas teorias de controle clássicas e modernas, normalmente, derivar o modelo matemático que descreve o sistema, é o primeiro passo para se implementar o controle do sistema. Nestas condições, exige-se um conhecimento pormenorizado do sistema a ser controlado. Caso o sistema seja complexo, esse conhecimento não é trivial. Para uma grande quantidade de processos bem definidos, se aplicam muito bem as teorias de controle clássicas, tais como: controle ótimo, sistemas lineares estocásticos, controle linear multivariável, algumas classes de problemas não-lineares determinísticos, entre outras. Contudo, estas técnicas geralmente não são capazes de resolver problemas reais de modelagem.

4.7.1 Fundamentos da Lógica Nebulosa

A LN possibilita uma caracterização mais ampla que a lógica booleana, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que de outros. O grau de pertinência de um elemento a um conjunto nebuloso pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1. O valor 1 representa completa pertinência e o valor 0 indica uma completa exclusão. Essa generalização aumenta significativamente o poder de expressão da função característica (uma função que diz o grau de pertinência $\mu_A(x)$ de um elemento x pertencente a um universo U com respeito a um conjunto A , onde $A \subseteq U$).

Assim, se Y é uma variável que toma valores num universo U , então a distribuição de possibilidade associada com Y pode ser vista como uma condição elástica nos valores que podem ser atribuídos a Y . Por exemplo, se F é um subconjunto nebuloso de U caracterizado pela função de pertinência $\mu_f: U \rightarrow [0, 1]$, então a declaração “ Y é F ” é traduzido numa distribuição de possibilidade para Y sendo igual a F . Pode-se escrever:

O conjunto nebuloso A é definido como o par ordenado $A = \{x, \mu_A(x)\}$.

Onde $x \in X$ e $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$. A função de pertinência $\mu_A(x)$ descreve o grau a que o objeto x pertence ao conjunto A . Quando $\mu_A(x) = 0$, representa nenhuma pertinência e $\mu_A(x) = 1$, representa pertinência total.

Por exemplo, seja X a representação da idade de uma pessoa. O subconjunto A de X que representa as pessoas jovens ($\mu_A(x)$) é um conjunto nebuloso com a função de pertinência mostrada na Figura 4.10. Observe-se que $\mu_A(x) \cong 1$ para pessoas com idade até 25 anos. A partir de 25 anos, $\mu_A(x)$ começa a decrescer. Para $X = 75$ anos, $\mu_A(x) \cong 0.1$.

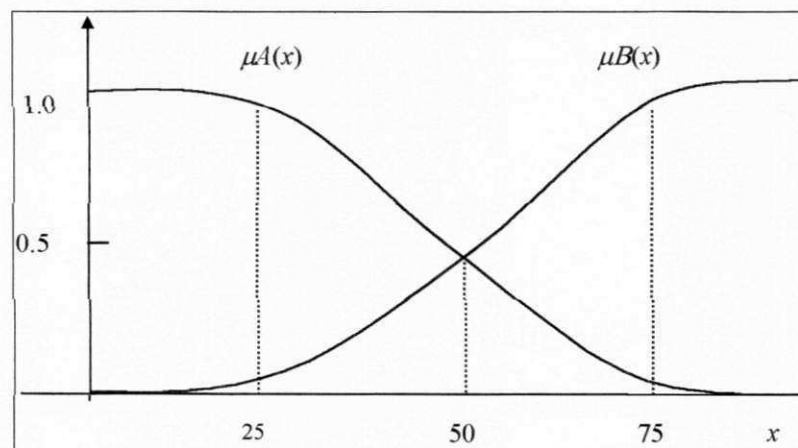


Figura 4.10: A Função de Pertinência.

Um conjunto nebuloso pode ter mais de uma representação, assim podemos descrever a idade de uma pessoa também por um subconjunto B de X representando as pessoas velhas ($\mu_B(x)$), cuja função de pertinência é mostrada também na Figura 4.10. Observe que $\mu_B(x) \cong 0.9$ para pessoas com idade acima de 75 anos. Também observe que para $X = 50$ anos, $\mu_A(x) = \mu_B(x)$, ou seja, com 50 anos uma pessoa tem o mesmo grau de juventude ou velhice.

As operações no conjunto nebuloso são extensões das operações usadas em conjuntos tradicionais. Assumindo $A \in X$ e $B \in X$. O símbolo \in significa “pertence” e o símbolo \forall significa “para todos”.

Comparação: $A = B$

$A = B$ se $\mu_A(x) = \mu_B(x) \forall x \in X$.

Contido: $A \subset B$

$A \subset B$ se $\mu_A(x) < \mu_B(x) \forall x \in X$.

União: $A \cup B$

$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \forall x \in X$.

A Figura 4.11 mostra as curvas das funções de pertinência $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ obtidas da operação união. A curva em negrito representa $A \cup B$.

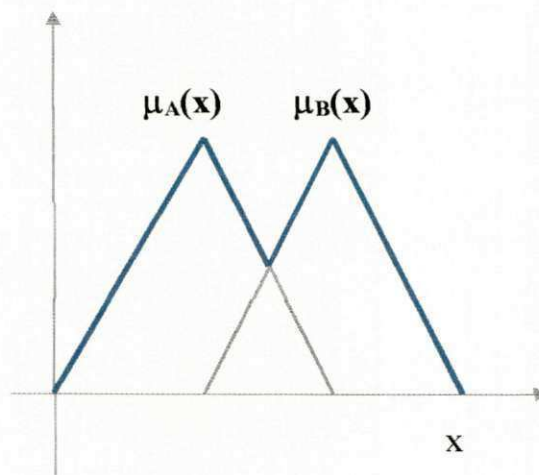


Figura 4.11: A União.

Interseção: $A \cap B$

$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \forall x \in X$.

A Figura 4.12 mostra as curvas das funções de pertinência $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$. A curva em negrito representa $A \cap B$.

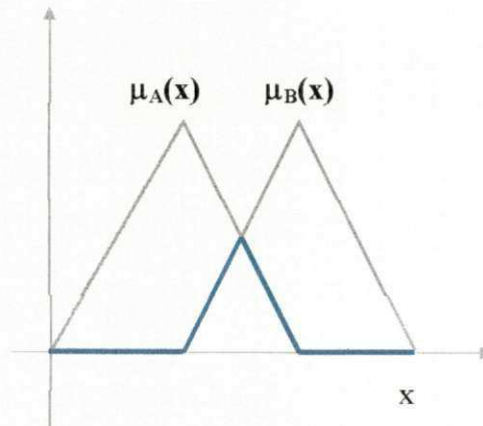


Figura 4.12: A Interseção.

Complemento: A^c

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X$$

A Figura 4.13 mostra as curvas das funções de pertinência $\mu_A(x)$ e $\mu_{A^c}(x)$. A curva em negrito representa A^c .

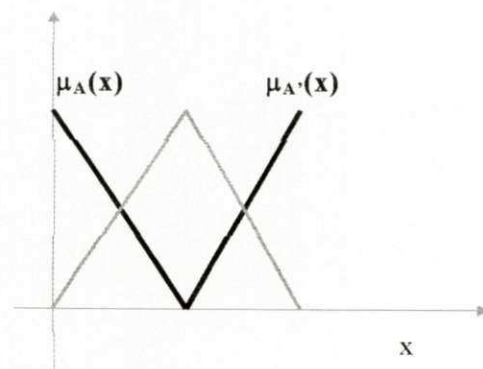


Figura 4.13: O Complemento.

4.8 Expressão Nebulosa do Conhecimento

Segundo [GOMIDE 1994], na expressão de conceitos é mais comum o uso de elementos qualitativos ao invés de valores quantitativos. Elementos típicos incluem “mais ou menos”, “alto”, “não muitos”, “médio”, entre outros. Estas idéias são capturadas pela definição de variável lingüística. Uma variável lingüística tem por característica assumir valores dentro de um conjunto de termos lingüísticos, ou seja, palavras ou frases. Assim, ao invés de assumir instâncias numéricas, uma variável lingüística assume instâncias lingüísticas. Por exemplo, uma variável lingüística temperatura poderá assumir um dos membros do conjunto {baixa, média, alta}. Para se atribuir um significado aos termos lingüísticos, associa-se a cada um deles um conjunto nebuloso definido sobre um universo de discurso comum [JÚNIOR 1997].

Em controladores nebulosos, O conhecimento pode ser expresso por meio de regras do tipo condição-ação. A idéia é representar o conhecimento por meio de um conjunto de regras nas quais as condições são dadas a partir de um conjunto de termos lingüísticos associados a variáveis de saída/entrada do processo (as quais são entradas do controlador). As ações de controle ou as saídas são expressas de modo similar para cada variável de controle (saída). Regras do tipo *se-então-senão* são freqüentemente chamadas de regras de controle nebulosas. Tipicamente, uma proposição lingüística sobre o valor das variáveis de entrada é, por exemplo: *o erro é grande e positivo*. De modo análogo, uma típica ação de controle é uma descrição lingüística, como por exemplo: *auamente um pouco a tensão de armadura*.

4.9 Sistemas de Controle Nebulosos

No controle nebuloso são as ações que são modeladas, a partir do conhecimento de um especialista, sendo desta forma uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle de processos, pois os mesmos são desenvolvidos via modelagem matemática dos processos de modo a derivar as ações de controle como função do estado do processo.

A estrutura básica de um controlador nebuloso é mostrado na figura 4.14.

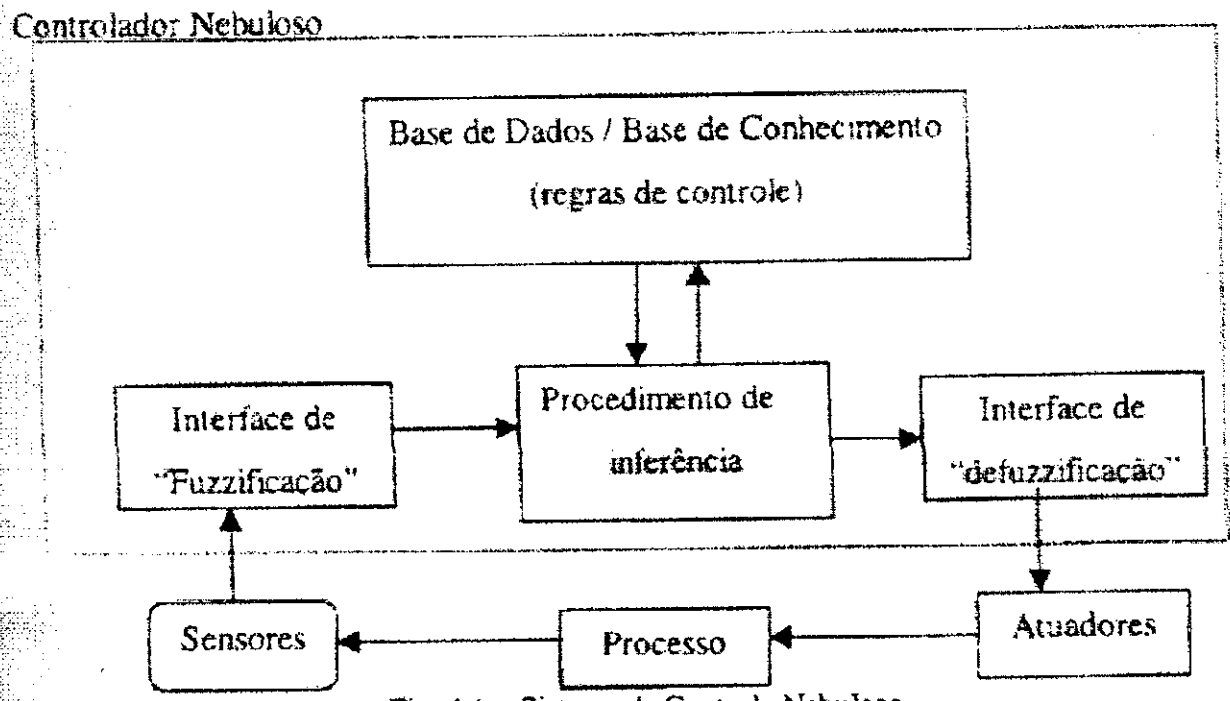


Figura 4.14: Sistema de Controle Nebuloso.

O núcleo do controlador nebuloso só analisa variáveis nebulosas. As informações têm que ser transformadas na forma nebulosa ou “fuzzyficadas” (transformadas em valores linguísticos). A interface de “fuzzyficação” recebe os valores das variáveis de entrada (vindos dos sensores), faz um escalonamento para dimensionar os valores a universos de discursos normalizados e “fuzzyfica” os valores (transformando números em conjuntos nebulosos), para torná-los instâncias de variáveis linguísticas [JÚNIOR 1997]. Um conjunto de regras que caracterizam as estratégias de controle e seus objetivos, compõem a base de conhecimento. A base de dados armazena as informações necessárias sobre as discretizações, as normalizações dos universos de discurso, as partições nebulosas dos espaços de entrada e saída e as definições das funções de pertinência. O procedimento de inferência atua sobre os dados nebulosos de entrada, juntamente com as regras, para inferir as ações de controle nebulosas, usando o operador de implicação nebulosa e as regras de inferência da lógica nebulosa. A interface de “defuzzificação” atua sobre as ações de controle nebuloso inferidas, transformando-as em ações de controle não nebuloso, efetuando, em seguida, um escalonamento para compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior com os valores dos universos de discursos reais das variáveis.

4.10 Classificação dos Sistemas Neuronebulosos

O uso de sistemas nebulosos em automação, exige a definição de conjuntos nebulosos e regras nebulosas. Dada a dificuldade desta definição em alguns domínios, os modelos neuronebulosos podem ajudar nesse processo de refinamento pela adaptação de conjuntos nebulosos e criação de regras nebulosas.

Um possível tipo de combinação entre RNA e controladores nebulosos utiliza ambos os modelos independentemente. A combinação é determinada pelo fato de que uma rede neural está aprendendo ou otimizando diversos parâmetros de um controlador nebuloso antes de o controlador ser usado (“off-line”), ou enquanto ele opera (“on-line”). Esse tipo de combinação é chamada de controladores neuronebulosos cooperativos.

Alguns tipos de modelos neuronebulosos [NAUCK 1994]:

a) A rede neural deriva as funções de pertinência (“membership”) do treinamento dos dados. Isso pode ser feito pela aprendizagem de parâmetros especiais ou pelo uso de diversas redes neurais para aproximar as funções diretamente. Os conjuntos nebulosos são aprendidos “off-line” e são usadas regras nebulosas predefinidas para implementar um controlador nebuloso.

b) A rede neural deriva regras de controle lingüístico dos dados de treinamento. Isso é feito frequentemente pelo uso de algoritmos de “clustering”, tais como: mapas de feição de Kohonem ou arquiteturas neurais similares. A aprendizagem é feita “off-line”, e os conjuntos nebulosos devem ser definidos de algum outro modo.

c) A rede neural adapta parâmetros dos conjuntos nebulosos “online”, isto é, enquanto o controlador nebuloso opera. É necessário conhecer as regras nebulosas e os conjuntos nebulosos iniciais. Além do mais, uma medida de erro tem de ser definida para que guie o processo de aprendizagem.

Existem abordagens onde as redes neurais são utilizadas para pré-processar ou pós-processar as saídas de um controlador nebuloso. Essas abordagens não cuidam da otimização do controlador em si, mas são concernente acerca da otimização do desempenho de controle de todo sistema. A aprendizagem toma lugar apenas na parte da rede neural, o controlador nebuloso permanece estático. Por essa razão, essas abordagens não são chamadas de modelos neuro-nebulosos. Elas podem ser chamadas de abordagens de pré ou pós-processamento neural.

Um outro tipo de combinação entre redes neurais e controladores nebulosos é chamado de modelo neuronebuloso híbrido. Essa abordagem cria uma arquitetura homogênea que geralmente é orientada pela rede neural. Isso pode ser feito interpretando um controlador nebuloso como uma rede neural especial.

4.11 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas algumas definições e conceitos básicos da teoria das redes neurais artificiais e da lógica nebulosa. Apresentou-se ainda alguns tipos de neurônios artificiais e alguns fundamentos da lógica nebulosa. No próximo capítulo, é apresentada uma justificação da escolha de um sistema neuronebuloso para o controle do RITMUSROB, e é também descrito a composição e o funcionamento do acionador proposto neste trabalho.

5. O RITMUSROB

5.1 Resumo

Neste capítulo descreve-se a essência do trabalho proposto. O acionador consiste em um dispositivo servomecânico utilizado como baqueta percussiva (ou braço robótico) para executar em tempo real as batidas geradas a partir do teclado que podem compor determinados ritmos; e mais um software de controle. Apresenta-se os detalhes da construção do acionador percussivo inteligente, RITMUSROB e detalhes do software que controla a baqueta percussiva (ou braço robótico), implementado para a execução dos ritmos e determinação dos intervalos e das figuras musicais.

5.2 O RITMUSROB

O Sistema de Controle Inteligente (SCI) [CAVALCANTI ET AL. 1994], baseado em Redes Neurais Artificiais Multicamada e Lógica Nebulosa, capaz de controlar uma estrutura robótica elementar (planta) em tempo real, aplicado na transferência de carga entre dois robôs cooperantes, foi aproveitado, devido às suas características, para o RITMUSROB. Para o desenvolvimento da idéia do nosso acionador, o fato do controle em tempo real da planta, foi fundamental. A partir da necessidade da resolução dos problemas das intensidades das batidas (aplicação das redes neurais no sistema) e da classificação dos tempos e intervalos da figuras musicais (aplicação da lógica nebulosa), um sistema inteligente à base de redes neurais e lógica nebulosa ou seja, um sistema neuronebuloso, tornou-se a melhor opção para o nosso acionador. A idéia é, através do intervalo de tempo entre as diversas batidas, usando a lógica nebulosa, encontrar as figuras musicais de cada batida.

Considerando ainda, as pesquisas desenvolvidas no NEUROLAB, onde o controle de plantas não-lineares têm sido feito, usualmente e com sucesso, usando redes neurais, e partindo do princípio que para a resolução desse problema (a geração de ritmos), a base é a mesma, mais um motivo para a escolha de um sistema neuronebuloso. Desenvolveu-se um protótipo desse braço com base no robô pendular, utilizando o braço robótico como baqueta percussiva. Duas unidades foram fixadas sobre uma caixa vazia de impressora utilizada como base no intuito de gerar batidas de tempo e

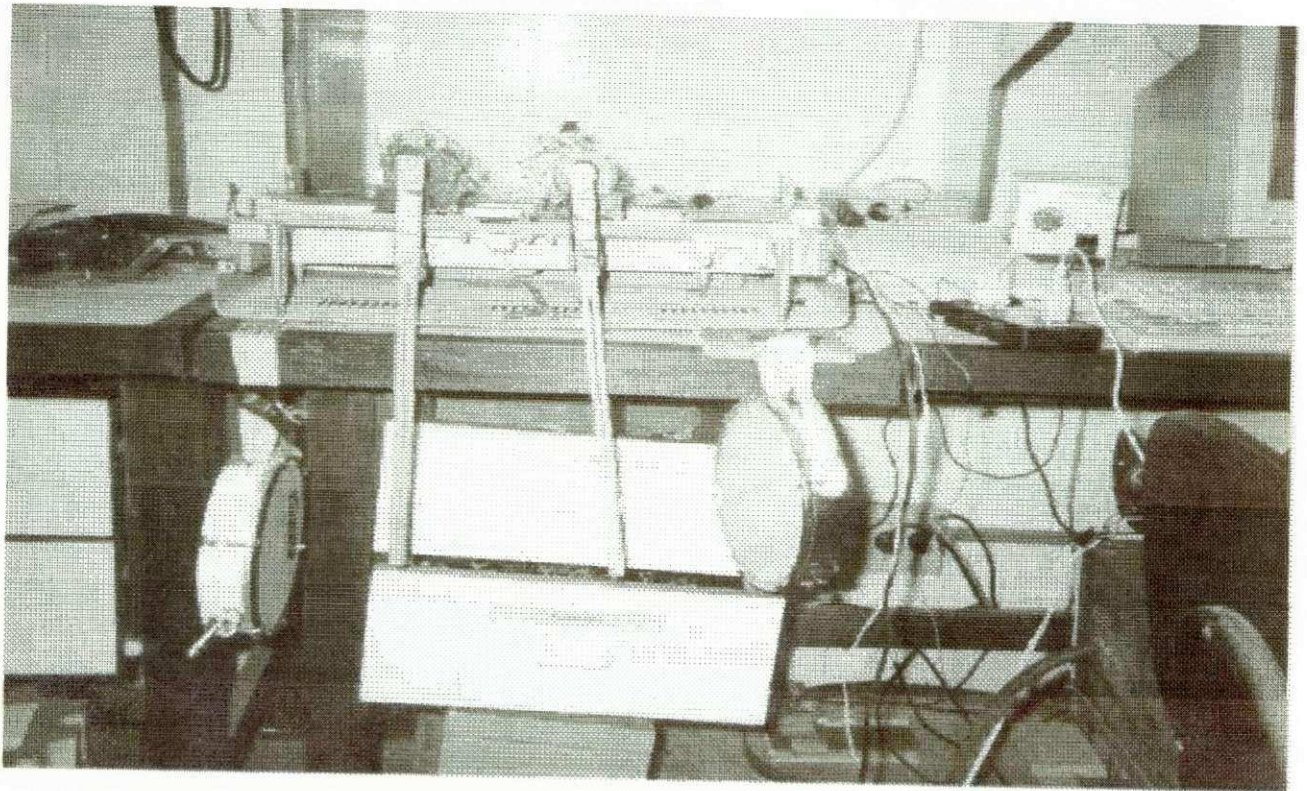


Figura 5.1: Foto do Acionador (De frente).

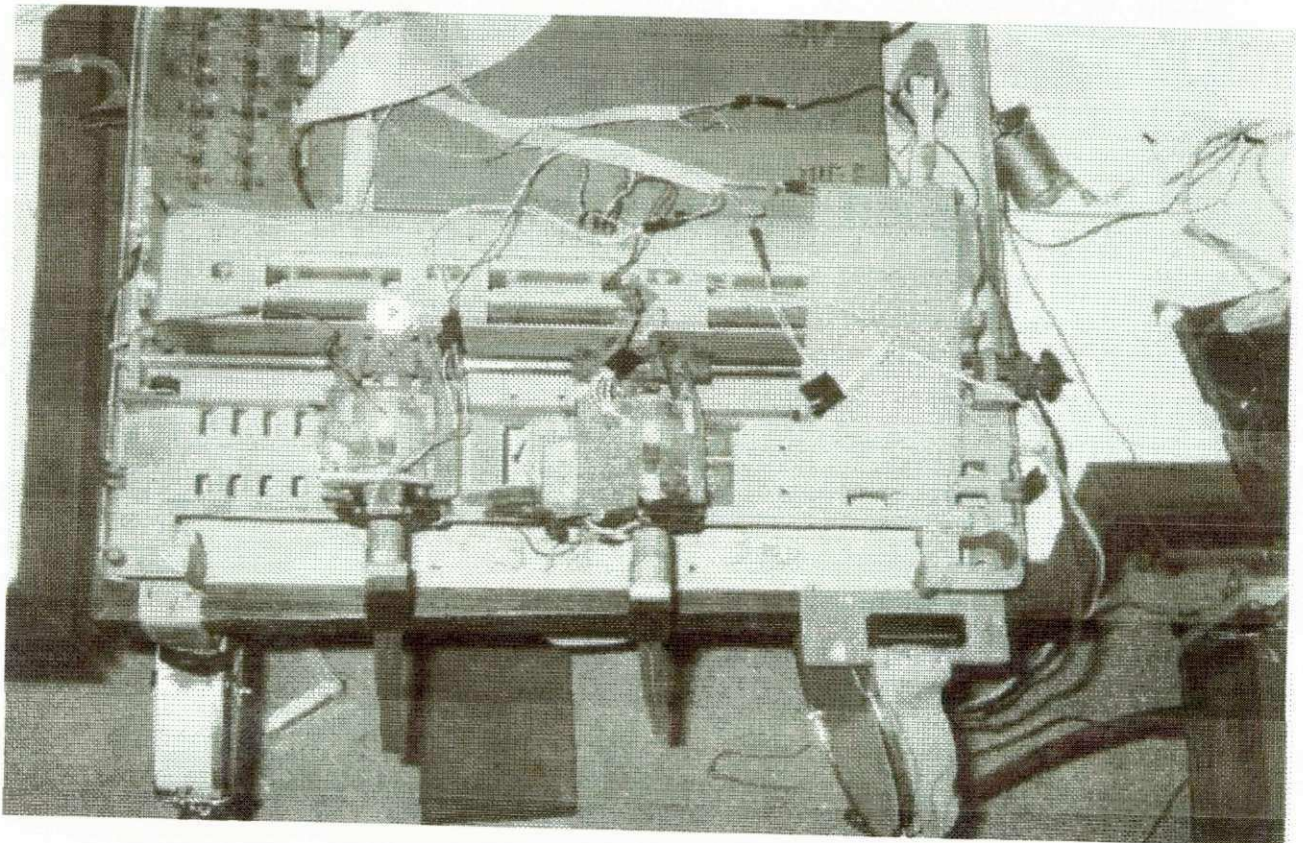


Figura 5.2: Foto do Acionador (De cima)

A figura 5.3 apresenta o esquema da montagem do acionador robótico percussivo inteligente, RITMUSROB sobre a caixa vazia da impressora utilizada como base. O robô possui dois motores de corrente contínua (CC) que atuam no movimento pendular do braço robótico. Dois pequenos instrumentos de percussão (um em cada lado) estão fixos na base para proporcionar as batidas quando as baquetas são ativadas. O RITMUSROB é controlado por um microcomputador IBM PC (bloco PC). A interface paralela do microcomputador é utilizada para acionar os motores do RITMUSROB.

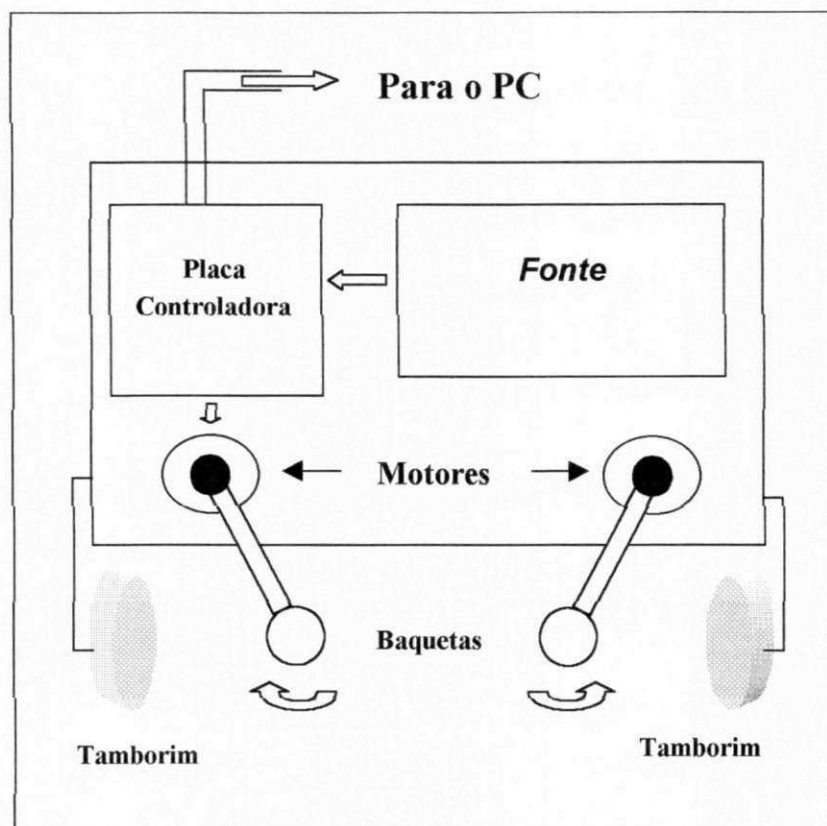


Figura 5.3: Detalhes Mecânicos do RITMUSROB.

O circuito de controle (controlador) é usado para acionar os 2 motores de corrente contínua que movimentam as baquetas percussivas. Os motores CC à imã permanente são utilizados para a percussão das baquetas nos tamborins (movimento pendular). O motor CC funciona no modo "on-off" com tensão de 12 Volts na armadura. Cada motor possui um detetor de posição.

Durante a percussão, a cada 1ms, o motor CC é acionado e passa a girar em sentido anti-horário, fazendo girar o eixo (braço robótico) ou baqueta percussiva, promovendo desta forma a batida no tamborim preso no suporte. A seqüência deste procedimento gera batidas elementares que compõem alguns ritmos. Ao ser desativado o motor CC, aplicando-se 0 Volt na sua armadura, o

5.3 O Sistema Inteligente do RITMUSROB

Um sistema de controle de inteligente (SCI) é um sistema que possui a habilidade de sentir o seu ambiente, processar as informações para reduzir as incertezas nos parâmetros do processo, planejar, gerar e executar ações de controle. Os SCI's possuem a capacidade de simular alguns níveis de aprendizagem e conhecimento das atividades humanas. Esta capacidade, permite aos SCI's inferirem sobre a dinâmica do processo no qual estão inseridos, de uma forma adaptativa e preditiva. Um SCI geralmente utiliza controladores não lineares baseados em redes neurais artificiais ou em lógica nebulosa. Durante o funcionamento automático do SCI, podem ser criados diferentes pontos de referência ("set points") para serem seguidos pela planta guiada pelo controlador. As variáveis que descrevem o estado do processo e da sua circunvizinhança podem ser especificadas na forma quantitativa e/ou qualitativa. Estas são as características mais importantes de um SCI. Um SCI pode ser implementado com técnicas usuais de controle (controladores lineares do tipo PID e controladores adaptativos) acoplado a técnicas de inteligência artificial (neurônios artificiais, conjuntos nebulosos e sistemas especialistas) e utilizando microcomputadores para o controle digital e a gerência do sistema.

A figura 5.4 mostra a arquitetura do SCI desenvolvido para controlar o sistema gerador de ritmos do RITMUSROB. Nessa arquitetura, o bloco PLANTA representa o sistema motor CC e o pêndulo invertido (braço robótico) é considerado como a baqueta percussiva. O Controlador Neural de Posição (bloco Controle Neural) é treinado com o Algoritmo de Propagação Retroativa. Os valores das posições da planta e das posições de referência, fator de treinamento da rede neural artificial, são transformados na forma nebulosa (bloco Fuzzyficação) para gerar os fatores de adaptação (χ_i) da RNMC e as posições de referência ($\theta_r(t)$) inerentes a cada uma das estratégias. Para maiores detalhes, ver apêndice A.

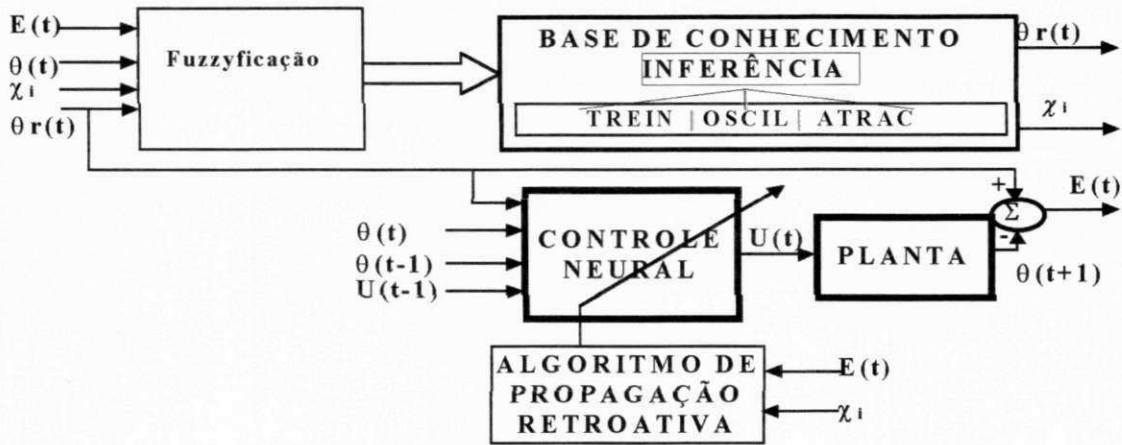
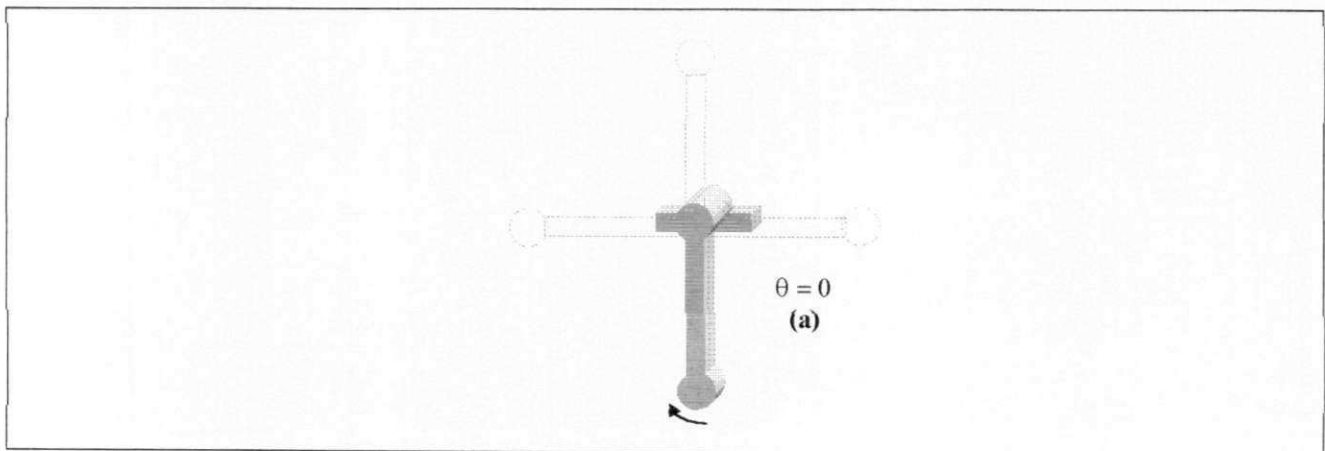


Figura 5.4: O Sistema de Controle Inteligente do RITMUSROB.

O fator de adaptação do controlador neural é gerado "off-line" para cada baqueta. Para o fator de adaptação χ foi associado a variável nebulosa χ_m , cujos valores usados na fase de "desfuzzyficação" são mostrados mais adiante.

5.3.1 Princípio de Funcionamento

Na figura 5.5 é mostrado o esquema da montagem da baqueta percussiva (braço robótico), acoplado ao eixo do motor CC (na base). Nesta figura são mostradas três posições especiais do braço pendular, representadas pelos ângulos entre o braço do pêndulo e a normal. O protótipo do RITMUSROB consiste de um pêndulo com comprimento $L = 0.01$ m (a este pêndulo está acoplada uma baqueta) e massa $M = 0.05$ Kg que, para determinados valores do ângulo θ , apresenta torque T_l maior que o atrito viscoso do eixo do motor. Mais detalhes sobre o pêndulo invertido no apêndice A.



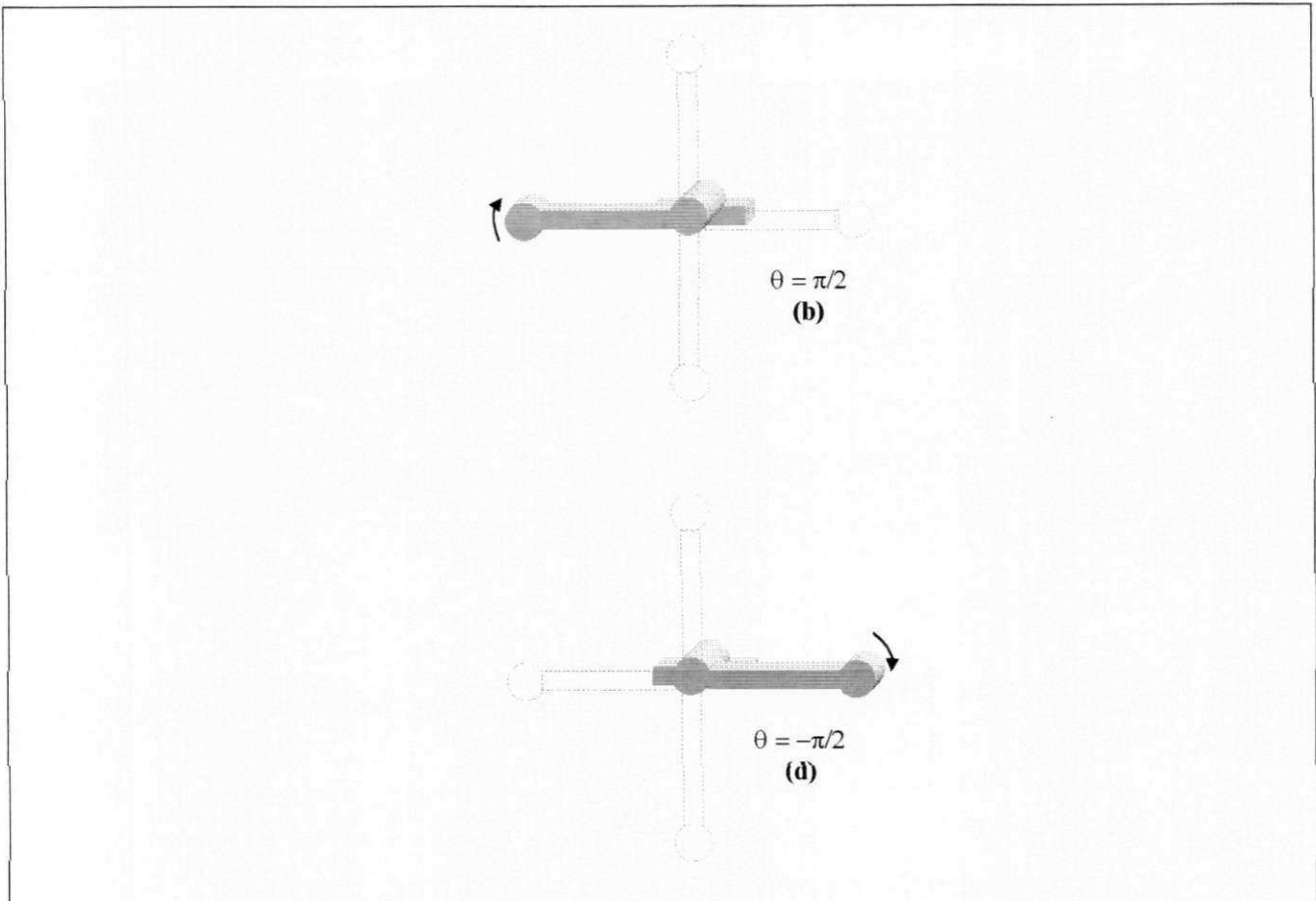


Figura 5.5: Posicionamento da Baqueta Percussiva.

Na figura 5.6 é mostrado o controlador neural adaptativo direto usado no SCI do RITMUSROB. Assume-se que $\theta_r(t+1)$ representa o valor de referência que é o valor ideal da batida ou o valor desejado para a posição $\theta(t+1)$ do eixo do motor, onde $\theta_r(t+1)$ e $\theta(t+1)$ são representados em p.u. (por unidade) com valor de base π rad. A tensão de armadura $U(t)$ é representada em p.u. com valor de base 12V.

Durante o controle, o controlador neural deve adaptar a tensão aplicada sobre o motor CC para que o movimento gerado seja o melhor possível para a estabilização da baqueta no ângulo desejado. A adaptação do controlador neural é feita preferencialmente em tempo real para garantir que mudanças no ambiente ou variações na dinâmica do processo não prejudiquem o desempenho do controle.

A RNMC da figura 5.6 possui 4 neurônios do tipo linear (L) na entrada, representados por X_i , com $X_1 = \theta_r(t)$; $X_2 = \theta(t)$; $X_3 = \theta(t-1)$; $X_4 = U(t)$, 4 neurônios do tipo sigmóide (S) (Equação 5.1) na camada oculta e um neurônio do tipo tangente hiperbólico (T) (Equação 5.2) na camada de saída. Após vários testes realizados com o protótipo no NEUROLAB, chegamos a conclusão que a rede

que mais se adequava a solução do nosso problema (controle dos braços robóticos em tempo real) é a rede apresentada na figura 5.7. Na RNMC do RITMUSROB são utilizados na primeira camada neurônios lineares devido a simplicidade dos mesmos e a função de propagação da informação na entrada. Na camada oculta optou-se pela utilização de neurônios sigmóides devido ao grande poder de processamento destes neurônios e na camada de saída, utilizou-se um neurônio tangente hiperbólico devido ao fato deste apresentar a saída entre valores -1 e 1 .

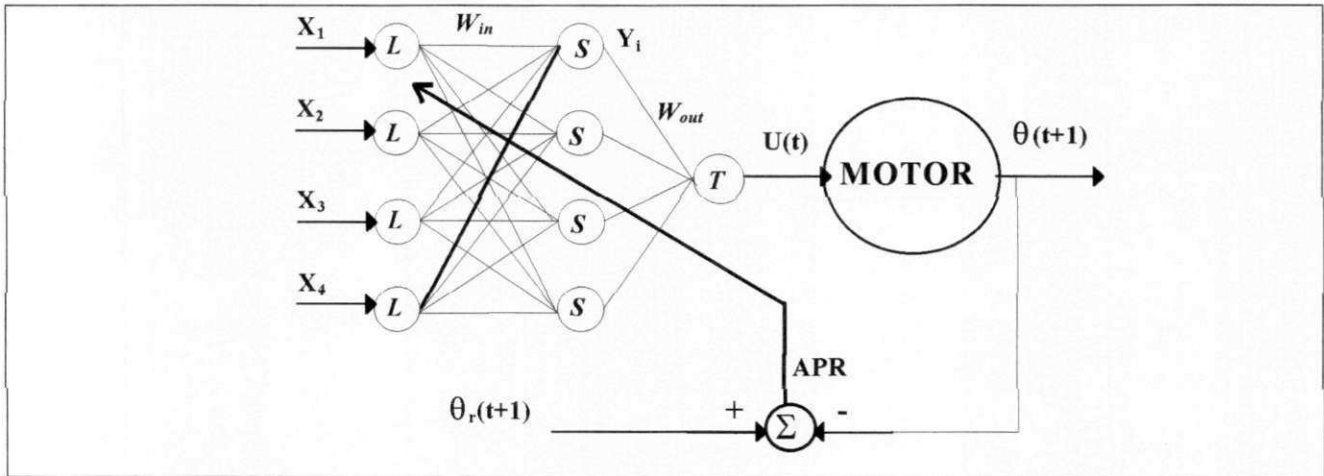


Figura 5.6: Controlador Neural Direto de Posição.

A figura 5.7 mostra a RNMC utilizada no RIMUSROB com três neurônios na primeira camada tipo L (linear), seis na camada oculta tipo S (sigmóide) e um na saída tipo T (tangente hiperbólico). Nos neurônios, Θ representa a intensidade, β a declividade, e δ o deslocamento da sigmóide. A figura 5.8 ilustra a curva sigmóide com $\Theta = 1$, $\beta = 1$ e $\delta = 0$.

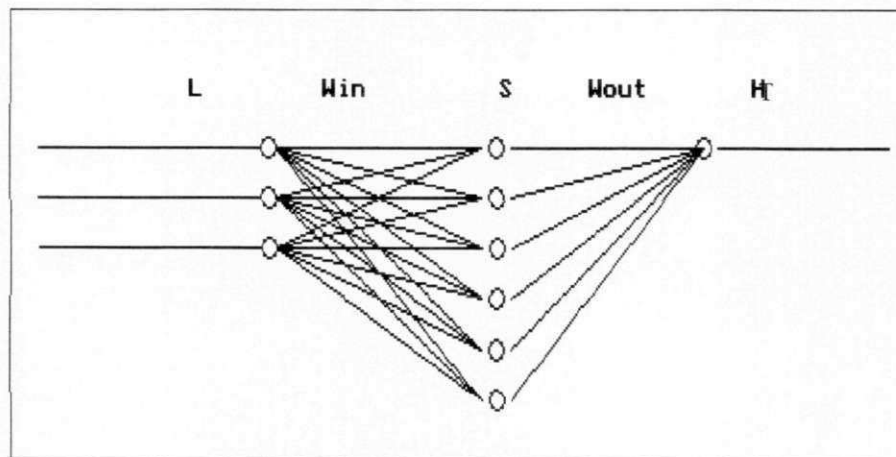


Figura 5.7: RNMC do RITMUSROB.

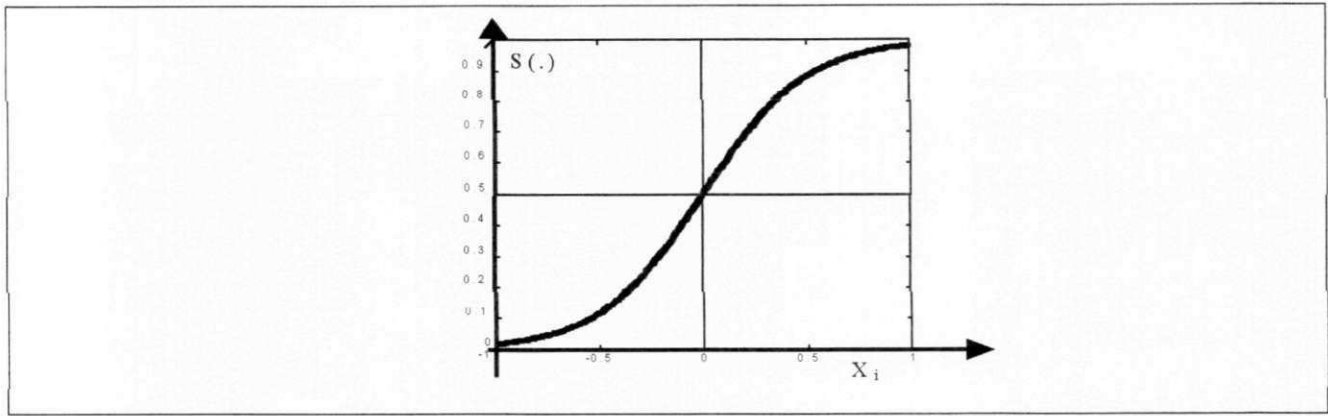


Figura 5.8: A Sigmóide.

$$S(X_i, \Theta, \beta, \delta) = \frac{\Theta}{[1 + \exp(-\beta(\sum X_i * Win_i + \delta))]} \quad (5.1)$$

$$T(X_i, \beta, \delta) = 2 * S(\cdot) / \Theta - 1$$

$$= \frac{[1 - \exp(\beta(\sum Y_i * Wout_i + \delta))]}{[1 + \exp(\beta(\sum Y_i * Wout_i + \delta))]} \quad (5.2)$$

Define-se o erro na saída do motor como $E(t+1) = \theta_r(t+1) - \theta(t+1)$. O índice de desempenho usado para adaptação da variável de controle $U(t)$ da RNMC do SCI é mostrado na Eq. 5.3.

$$I(U(t)) = \frac{1}{2}(E(t+1))^2 = \frac{1}{2}[\theta_r(t+1) - \theta(t+1)]^2 \quad (5.3)$$

O treinamento da RNMC é feito com o Algoritmo de Propagação Retroativa [RUMELHART 1986] e o valor $U(t+1)$ é encontrado usando a regra delta (Eq. 5.4) e o índice de desempenho da Eq. 5.3. Define-se μ como o fator de treinamento da RNMC.

$$U(t+1) = U(t) + (-\mu \nabla I(U)) = U(t) - \mu \frac{\partial I(U(t))}{\partial U} \quad (5.4)$$

Desenvolvendo a derivada do índice de desempenho como mostrado na Eq. 5.5, obtém-se a derivada parcial do índice de desempenho em relação à entrada como uma função do jacobiano do motor, representado como $\frac{\partial \theta(t+1)}{\partial U(t)}$.

$$\frac{\partial I(U(t))}{\partial U(t)} = -E(t+1) \frac{\partial \theta(t+1)}{\partial U(t)} \quad (5.5)$$

A Eq. 5.6 é usada para determinar $U(t)$, caso seja conhecida o jacobiano do motor

A partir do desenvolvimento do conceito de estado passivo, segundo Cavalcanti [CAVALCANTI 1994], para permitir o treinamento em tempo real da RNMC, supõe-se que o sistema representado pelo conjunto motor mais controlador neural (sistema global) tem pelo menos um estado de equilíbrio e , sem perda de generalidade, que a origem possa ser considerada um desses estados. Representando-se o sistema motor na forma discreta por $x = f(x, u)$, ele define:

Definição 1 - Um ponto $x_e \in \mathfrak{R}^n$ é um ponto de equilíbrio de $x = f(x, u)$ se existir uma entrada u_e tal que: $x_e = f(x_e, u_e)$.

De acordo com esta definição, a RNMC do RITMUSROB foi treinada usando-se a tensão de excitação da armadura u e o estado x_e , para fornecer na sua saída o valor u_e correspondente ao estado de equilíbrio. Baseado nessa estratégia, [CAVALCANTI 1994] define o estado passivo do sistema global como:

Definição 2 - Um sistema dinâmico está no estado passivo quando estiver no ponto de equilíbrio com $x_e = f(x_e, u_e)$ e o controlador neural garantir a excitação de controle u_e .

Além disso, segundo [CAVALCANTI 1994] usando a regra delta generalizada e a Eq. 5.1, provaram que para o sistema motor CC, se o ângulo de referência ($\theta_r(t)$) for aproximadamente igual ao ângulo atual do eixo do motor ($\theta(t)$), as Eq. 5.7 e Eq. 5.8 podem ser usadas para treinamento em tempo real da RNMC. Definiu-se então χ como o fator de adaptação do controlador neural.

$$U(t+1) = U(t) + \Delta U(t) \quad (5.7)$$

$$\Delta U(t) = \chi \cdot E(t+1) \quad (5.8)$$

No algoritmo de controle mostrado abaixo, a ETAPA 1 é responsável pela inicialização dos parâmetros e pesos da RNMC. A ETAPA 2 é responsável pelo treinamento da rede neural através do Algoritmo de Propagação Retroativa de Erro (APR) e o controle em tempo real do sistema motor CC.

Algoritmo de controle:

ETAPA 1

- 1) Geram-se aleatoriamente os pesos W_{inp} e W_{out} entre os limites 0.25 e -0.25.
- 2) Faz-se: $\Theta = \beta = 1$ e $\delta = 0$ (todos os neurônios).

3) Atribui-se: $\mu = 0.1$ (fator de treinamento) e $\chi = 0.5$ (fator de adaptação do controlador).

ETAPA 2

4) Obtém-se $\theta_r(t)$.

5) Usa - se $\theta_r(t)$ capaz de calcular o novo $U(t)$ do ponto passivo da RNMC (Algoritmo híbrido).

6) Calcula: $\Delta U(t) = \chi \cdot E(t+1)$ e $U(t+1) = U(t) + \Delta U(t)$

7) Treina a RNMC com o APR.

8) Repetem-se as etapas 5, 6 e 7 até que: $|\theta(t) - \theta_r(t)| < \varepsilon$, para um ε suficientemente pequeno.

O valor $E(t) = |\theta_r(t) - \theta(t)|$ é suficientemente pequeno para garantir o estado passivo da RNMC. O movimento cíclico do braço do pêndulo, da posição $-\theta_r(t)$ a $\theta_r(t)$ (e vice-versa), é denominado de oscilação do pêndulo.

O RITMUSROB utiliza a Lógica Fuzzy para modificação dos parâmetros de treinamento da RNMC controladora e para a geração do ritmo. Aproveita-se as definições das figuras melódicas para o desenvolvimento das funções de pertinência para a geração dos ritmos. Na figura 5.9 é mostrado o gráfico das funções de pertinência das figuras musicais em função do tempo em ms na abscissa. As funções de pertinência das figuras musicais são representadas pelas variáveis lingüísticas: SB (semibreve), M (mínima), SM (semínima), C (colcheia), SC (semicolcheia), F (fusa) e SF (semifusa). A função de pertinência triangular foi escolhida por uma questão de facilidade na implementação.

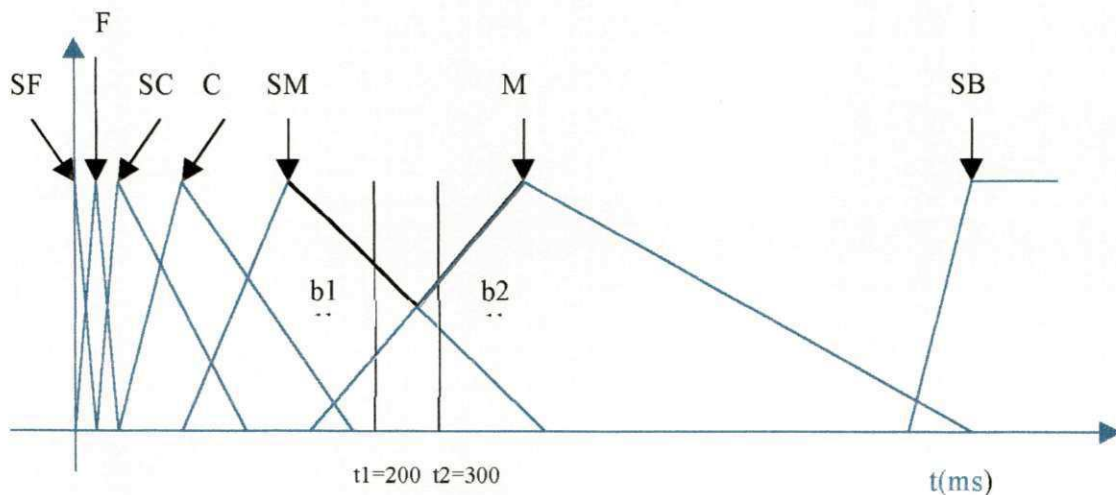


Figura 5.9: Função de Pertinência das Figuras Musicais

Por exemplo, na figura 5.9, obtida através da *sub-opção 4: CURVA FUZZY DA PERCUSSÃO* da *opção 3: RITMO* do MENU Principal do software de controle, são mostrados os intervalos de tempo $t_1 = 200$ ms e $t_2 = 300$ ms de duas batidas b_1 e b_2 . O problema é detectar quais são as figuras musicais de cada batida. Isto pode ser feito usando-se o operador nebuloso **União**. Para ilustrar a operação nebulosa, os valores maiores das funções de pertinência SM e M são apresentados em negrito. Observe-se que para b_1 a função de pertinência vencedora é SM, e para b_2 , a função de pertinência vencedora é M. Portanto, a batida b_1 terá intervalo de tempo para execução representado por SM e a batida b_2 terá intervalo de tempo para execução representado por M.

5.3.2 Software de Controle do RITMUSROB

O funcionamento do RITMUSROB dá-se por meio de um software de controle, acessado pelo usuário, via teclado que fornece um ritmo qualquer desejado, formado por batidas acionadas pelas teclas, respeitando é claro, a rigidez da máquina que não disponibiliza ritmos muito complexos e suingados que podem ser conseguidos por um tocador humano (um percussionista).

A seguir, apresenta-se detalhadamente o software de controle e todas as suas possibilidades de uso no trato das batidas e dos ritmos gerados pelo RITMUSROB. A tela principal contém um MENU com quatro opções: *1:REDE NEURAL*, *2:PERCUSSAO*, *3:RITMO* e *0:SAÍDA*. A *opção 1:REDE NEURAL* possui varias sub-opções que serão vistas adiantes e trata da parte neural do sistema neuronebuloso de controle do robô. A *opção 2:PERCUSSAO* possui também várias sub-opções (tratadas adiante) e acessa a parte de controle das batidas e geração de ritmos; A *opção 3:RITMO* controla a parte nebulosa do sistema neuronebuloso de controle do robô, atuando sobre as batidas fornecidas pelo usuário, analisando o tempo (duração das batidas e intervalos entre elas). A última *opção 0:SAIDA* fornece a saída do software.

A figura 5.10 mostra a interface gráfica do sistema RITMUSROB obtida na ocasião em que foi treinada a RNMC. Observa-se na parte superior da figura, o MENU principal. Se o usuário teclar o número *1:REDE NEURAL*, ele escolhe as funções de manipulação da RNMC, disponíveis no sub MENU desta *opção*. No sub MENU, o usuário poderá gerar valores aleatórios para os pesos e parâmetros da RNMC com a *opção 1:REDE NEURAL ALEATORIA*. Teclando a *opção 2:TREINA REDE NEURAL*, o usuário treina a rede neural e poderá ler/gravar pesos e parâmetros da RNMC usando as *opções 3:LER PESOS/PARAMETROS* e *4:GRAVA PESOS/PARAMETROS*. A *opção 5:TREINO <-> NÃO TREINO* deixa a opção para treinar ou não treinar a rede neural, caso o

7: PUNTO PASSIVO REDE NEURAL coloca o valor zero na saída da rede neural e finalmente a opção 0: SAIDA, oferece a saída de 1: REDE NEURAL.

No treinamento da RNMC são definidos arquivos (*pesos.c*) e variáveis para o armazenamento das informações do motor CC e inicializados todos os parâmetros do controlador neural. Na RNMC do RITMUSROB, três entradas: $\theta_r(t)$, $U(t)$ e $\theta(t)$. $\theta_r(t)$ é inicializado com o valor de referência fixo de 30 graus, $U(t)$ é inicializado com 0 volt e $\theta(t)$ com 0 grau. A tensão e o ângulo iniciais começam em zero (estado de partida do motor) e são treinados até que seja atingido o ângulo desejado. O objetivo é atingir os 30 graus do ângulo de referência $\theta_r(t)$.

Na parte inferior da figura 5.10 também são mostrados os resultados experimentais obtidos durante as duas primeiras iterações do treinamento da RNMC (opção 2). Considera-se que inicialmente a RNMC não está treinada com a dinâmica do sistema motor CC acoplado a baqueta percussiva. Ao lado da opção 2 é mostrado o valor do ângulo de referência ($\theta_r(t) = 30$ graus) usado para treinar a RNMC. Usou-se as regras nebulosas 8 e 9 para o treinamento da RNMC. Observe-se que $\theta_r(t) = 30$ graus entre os intervalos de tempo $t = 0$ e $t = 6$ s e entre os intervalos de tempo $t = 6$ segundos e $t = 12$ segundos, $\theta_r(t) = -30$ graus. Considerou-se que a RNMC aprendeu a dinâmica do sistema em aproximadamente 10 iterações. Após o treinamento, os pesos e os parâmetros da RNMC são gravados usando a opção 4 num arquivo chamado *pesos.c*.

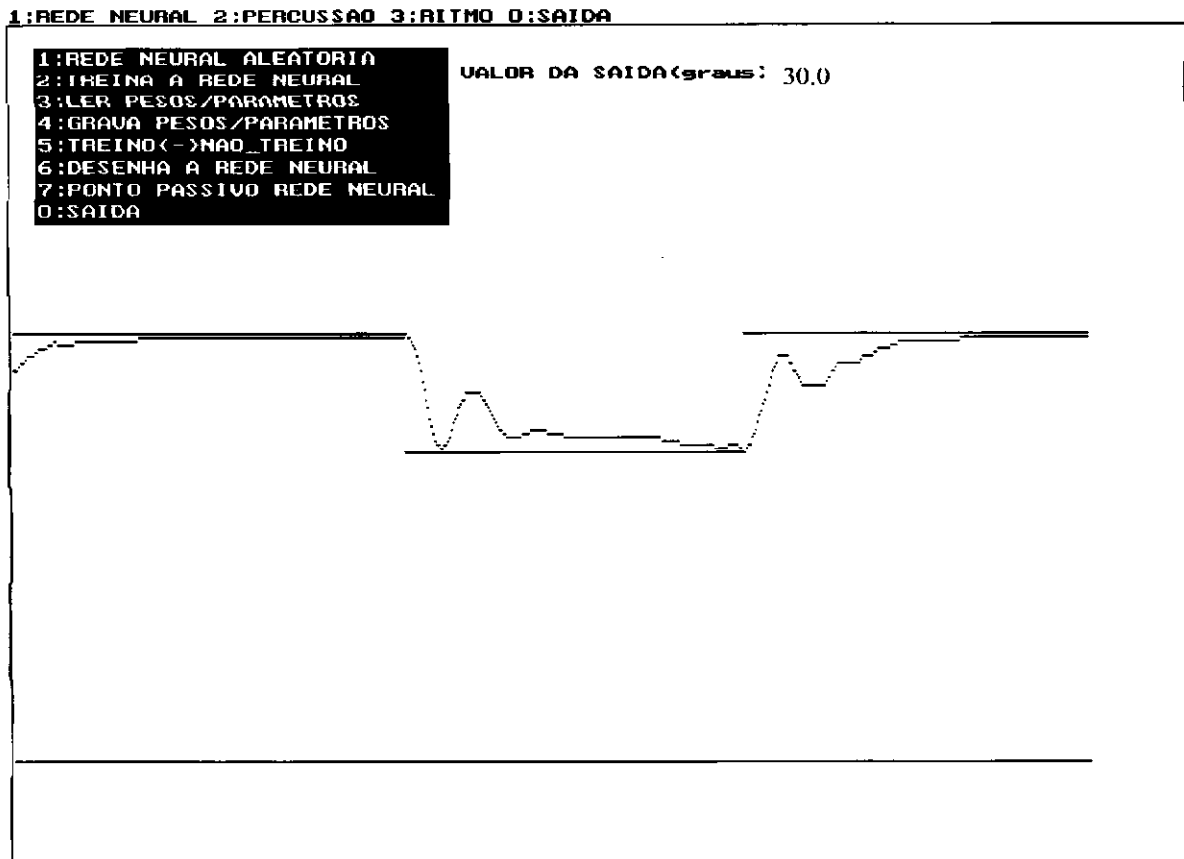


Figura 5.10: Resultados Experimentais obtidos no treinamento da RNMC

A figura 5.11 mostra a tela obtida com a *opção 2: PERCUSSÃO* do RITMUSROB. A tela usada para a apresentação das curvas das referências e das posições da baqueta possui 640 pontos, cada ponto representando 20 milissegundos, tendo um tempo total de 12800 milissegundos por tela. Após 12800 milissegundos, as telas se sobrepõem. Portanto, cada tela terá um máximo de 12,8 segundos. Após o usuário teclar a *sub-opção 1: PERCUTIR*, o programa disponibiliza as teclas 1 a 6 e a tecla ESC para a execução das batidas em tempo real pelo robô. Usando a *sub-opção 2: REPETE INICIO E FIM*, o usuário poderá modificar este tempo (o tempo total de 12,8 s) de acordo com a duração do ritmo desejado (tempo inicial e tempo final). A partir da *sub-opção 3: MUDA PARÂMETROS BATIDA*, o usuário pode modificar o número de batidas e o número das batidas para executar um novo ritmo. A *sub-opção 4: LER/GRAVAR REFERÊNCIAS* oferece ao usuário a possibilidade de ler e/ou gravar as referências do novo ritmo gerado. A *sub-opção 5: REPETE INICIO BATIDA #1*, repete a seqüência teclada com o início no instante oferecido pelo usuário e com a batida #1. Ao teclar a *sub-opção 6: ANULA*, todos os ângulos de referências (máximo 640) são zerados. A *sub-opção 7: ESC* é usada para terminar a apresentação em tempo real, retornando

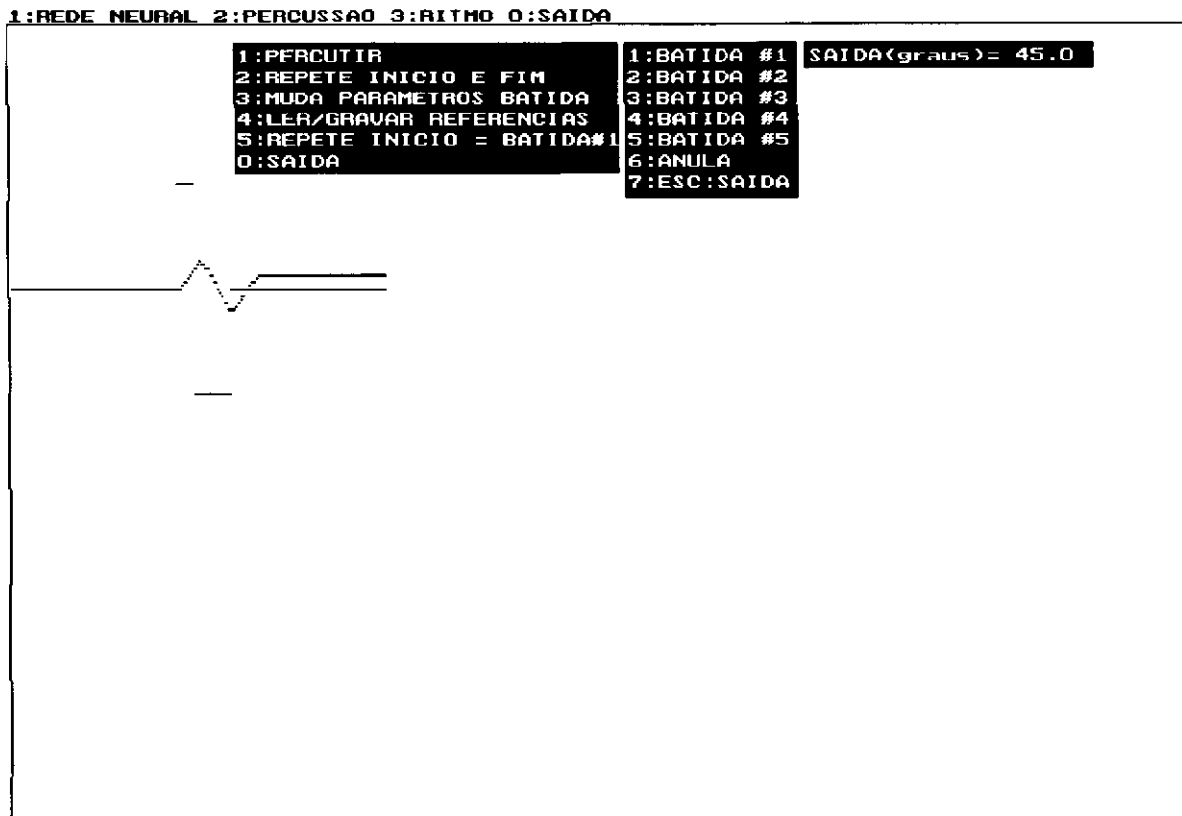


Figura 5.11: Tela da opção 2: *Percussão* com a forma de onda da Batida #2.

A figura 5.11 mostra também o gráfico com os valores das posições de referência ($\theta_r(t)$) e atual ($\theta(t)$) do pêndulo para a batida #2.

5.3.3 Exemplo do Funcionamento do Sistema

No exemplo da figura 5.12, o usuário percutiu o tamborim, através do teclado do PC. A seqüência de pancadas (batidas) geradas neste exemplo, tenta reproduzir os sons do início da nona sinfonia de Beethoven. Observa-se que a cada percussão foi gerada uma onda PWM de referência do pêndulo (baqueta). Nota-se que, embora a referência apresente pulso positivos de 90° , o pêndulo (baqueta) não ultrapassa a posição $+30^\circ$, pois nesta posição o mesmo é freado pelo tamborim, ocorrendo a percussão.

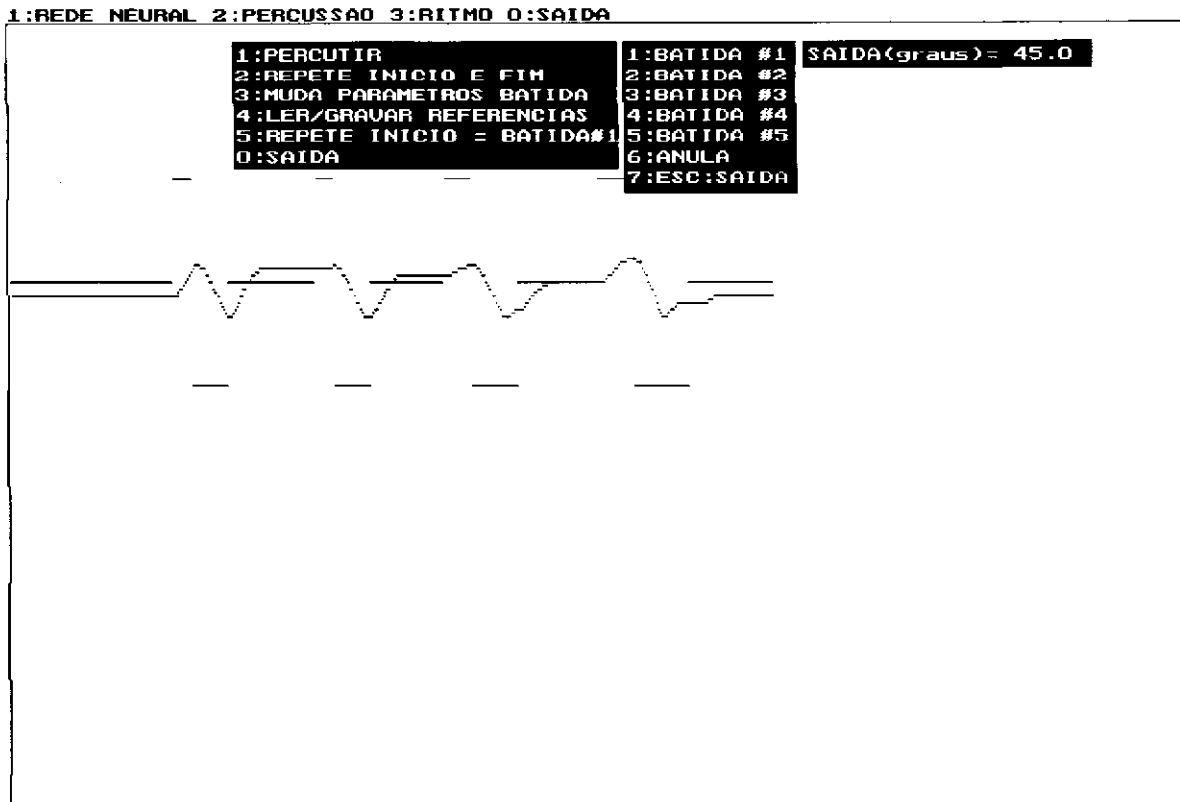


Figura 5.12: Sequência de Batidas obtidas através do Teclado.

Essas formas de onda foram geradas pelo usuário teclando as teclas 2 (*duas vezes*); 3 e 4 que representam as batidas #2, batida #3 e batida #4. O usuário está gerando, a partir do tempo atual, 20 valores de referência como mostrado no trecho de programa na linguagem C mostrado abaixo:

Prog 1

```
For (i = 1; i <= 20; i++) posref[onde+i] = saida;
```

Usou-se a variável **onde** como apontador do ponto atual de percussão e **saida** como o valor do ângulo de referência. A figura 5.13 mostra o gráfico das curvas das batidas rítmicas com o auxílio do MATLAB. Nesta figura, é considerada a mesma sequência de batidas de teste da figura 5.12.

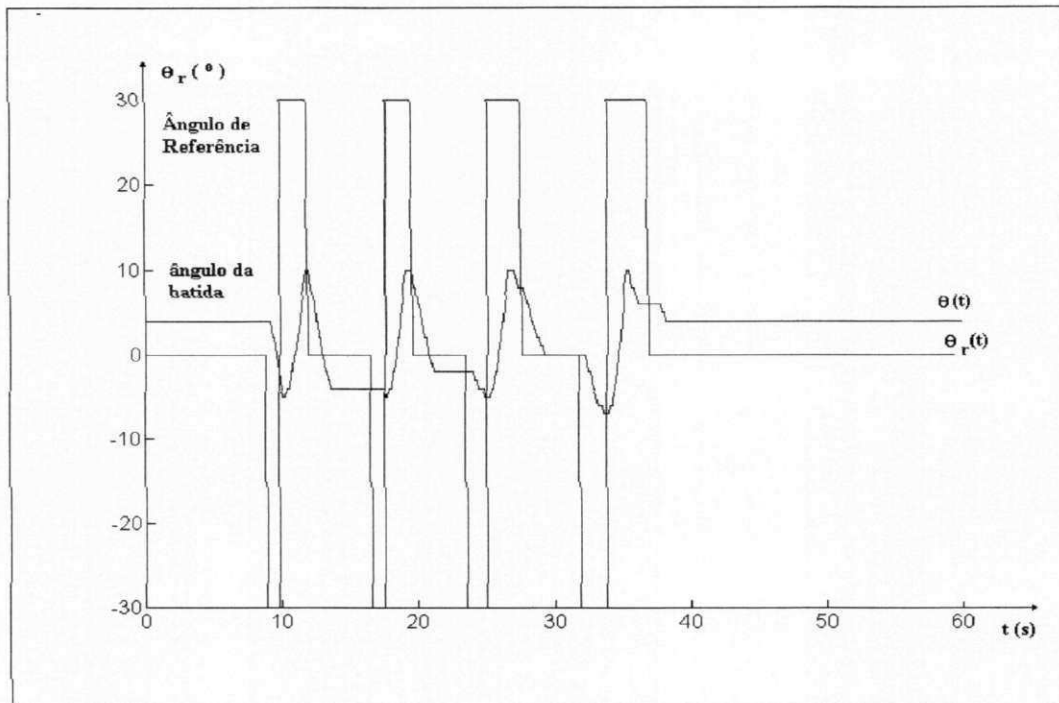


Figura 5.13: Gráfico das curvas das Batidas obtidas através do Teclado.

A opção 3: *RITMO* do MENU principal é responsável pela parte fuzzy ou parte nebulosa do software de controle do RITMUSROB. A sub-opção 1: *GRAVA TABELA DO RITMO* grava um arquivo (*ritmoout.c*) com os dados das batidas executadas via teclado ou seja, faz com que o arquivo gerado com as saídas (execução das batidas), seja gravado no disco. A sub-opção 2: *LER TABELA DO RITMO* é usada para ler os valores gravados no arquivo gerado na opção anterior. A sub-opção 3: *PERCUTIR VIA REFERENCIA* é usada para a execução das batidas, uma vez que o RITMUSROB já assimilou a seqüência rítmica teclada pelo usuário. A sub-opção 4: *CURVA FUZZY DA PERCUSSAO* exibe na tela a curva fuzzy das batidas. A sub-opção 5: *PARAMETROS TETA/BETA/II* mostra todos os parâmetros fuzzy das curvas.

A sub-opção 6: *MOSTRA TABELA BATIDAS* mostra uma tabela com todas as batidas, os instantes reais, o ângulo de referência de cada batida, o número das batidas (exemplo: se batida #1 ou batida #2 ou qualquer outra), o tempo das batidas (fuzzificado) e a indicação das figuras musicais referentes aos intervalos entre as batidas, além da indicação da baqueta que efetuou a batida (se a baqueta 1 ou a baqueta 2). A figura 5.14 mostra a execução da sub-opção 6 para a seqüência de batidas da figura 5.13.

Além de mostrar na tela a tabela com as batidas, o programa mostra também os valores iniciais e finais dos tempos. Neste caso, como foi utilizado todo tempo disponível, o tempo final é

1:REDE NEURAL 2:PERCUSSAO 3:RITMO 0:SAIDA

```

1:GRAVA TABELA DO RITMO
2:LER TABELA DO RITMO
3:PERCUTIR VIA REFERENCIA
4:CURVA FUZZY DA PERCUSSAO
5:PARAMETROS TETA/BETA/TA
6:MOSTRA TABELA BATIDAS
7:CALCULA O TEMPO BASE
8:GRAVA MEMBERSHIP
9:PERCUTIR DA TABELA
0:SAIDA

```

Tempo_inic=0 Tempo_final=12800 Novo_T_f=0

| Tempo | Refer | Tecla | Figura | Difer | Nva_Dif | Nvo_Temp | Baqueta |
|-------|-------|-------|--------|-------|---------|----------|---------|
| 1770 | 30 | 2 | 0 | 8209 | 0 | 0 | 1 |
| 3307 | 30 | 2 | 0 | 1537 | 0 | 0 | 1 |
| 4701 | 30 | 3 | 0 | 1394 | 0 | 0 | 1 |
| 6361 | 30 | 4 | 0 | 1660 | 0 | 0 | 1 |

Figura 5.14: Tela da execução da *sub-opção 6: MOSTRA TABELA BATIDAS* da *opção 3: RITMO* do MENU.

A *sub-opção 7: CALCULA O TEMPO BASE* mostra a relação entre os tempos reais e os tempos fuzzificados atribuídos a cada figura musical de acordo com sua duração. Ao teclar esta opção o usuário, a pedido do programa, fornecerá o novo tempo base que servirá de referência para a fuzzyficação dos intervalos. A *sub-opção 8: GRAVA MEMBERSHIP* grava um arquivo (*members.c*) com informações sobre a função de pertinência da curva fuzzy das batidas. A *sub-opção 9: PERCUTIR DA TABELA* executa uma seqüência rítmica fornecida através da tabela gravada com a *sub-opção 1* que pode ser modificada pelo usuário. Nesta *sub-opção* o usuário tem a escolha entre a seqüência rítmica executada via teclado (em tempo real) ou a seqüência rítmica corrigida (fuzzyficada) através da tabela gerada na *sub-opção 6*. E finalmente, a *sub-opção 0: SAIDA* fornece a saída deste MENU.

5.4 Conclusões

Neste capítulo abordou-se o princípio de funcionamento do acionador robótico percussivo inteligente RITMUSROB e o software que controla o mesmo. O sistema proposto é simples e de fácil montagem e os instrumentos de percussão (tamborins) utilizados são de fácil aquisição. Foi mostrado também um exemplo do funcionamento do sistema com uma pequena execução de uma

aplicação musical para o problema do pêndulo invertido utilizando controle inteligente neuronebuloso.

6. CONCLUSÃO

6.1 Resultados Obtidos

Nesta dissertação apresentou-se a descrição e a implementação de um acionador percussivo inteligente desenvolvido para gerar ritmos a partir de batidas elementares fornecidas pelo usuário do sistema que pode ser utilizado para o ensino de divisão rítmica por partes de alunos iniciantes em percepção musical. O acionador oferece a possibilidade de construção de ritmos através do acionamento de 5 (cinco) diferentes teclas cada uma com uma intensidade própria diferente da outra. A baqueta percussiva acoplada ao braço pendular efetiva em tempo real a(s) batida(s) executadas pelo usuário.

Atualmente no mercado, não existe nenhum sistema do gênero. Uma das contribuições deste trabalho está na sua utilização em ditados rítmicos. O professor pode criar um ritmo simples e depois executar para que o aluno ouça e escreva esta execução, embora não tenha sido resolvido o problema da quantização.

A quantização é a correção das notas tocadas para os tempos certos. A necessidade de se quantizar notas ocorre porque muitas vezes, por inabilidade do músico que as executa numa seqüência de acompanhamento rítmico e/ou numa gravação, algumas delas acabam ficando perceptivelmente fora de seus tempos corretos, dando à música ou à seqüência um resultado ruim. Nesses casos, pode se recorrer à quantização que, bem aplicada, pode consertar o que porventura tenha ficado errado nesta seqüência rítmica. Entretanto, usando-se referências puramente matemáticas para a quantização, acaba fazendo a música ficar perfeita demais, pois nenhum músico humano é capaz de tocar as notas com tamanha precisão. Dessa forma, seqüências totalmente quantizadas soam extremamente mecânicas, ou melhor, eletrônicas...

Apesar desses eventuais efeitos colaterais, a quantização é verdadeiramente uma ferramenta de extrema utilidade, permitindo recuperar-se, com eficiência e rapidez, execuções originalmente incertas [RATTON 1998].

No trabalho proposto, as referências utilizadas pelo acionador são referências matemáticas que podem ser fornecidas através da tabela de modificação dos tempos da *sub-opção 6: MOSTRA TABELA BATIDAS* da *opção 3: RITMO* do MENU, mostrado no capítulo anterior. O que com certeza, torna a execução mecânica e sem suingue. Pode-se pensar numa investigação para este problema como um trabalho futuro, partindo-se da execução de uma seqüência rítmica com o RITMUSROB.

6.2 Trabalhos Futuros

Baseado nas características do acionador percussivo inteligente, RITMUSROB, sugere-se alguns estudos que podem dar continuidade e expansão ao sistema:

A investigação acerca do problema da quantização, utilizando a própria lógica nebulosa para tentar corrigir a artificialidade da execução rítmica com um método de quantização peculiar à máquina.

Dotar o acionador da capacidade de ler partituras rítmicas utilizando o protocolo MIDI e sua flexibilidade de utilização devido a grande possibilidade de manipulação de eventos sonoros e de armazenamento de informações num pequeno tamanho em bytes [VIANA 1998].

A investigação da utilização de transformadas Wavelet nas curvas e suas relações com as curvas PWM geradas pelos pulsos das batidas rítmicas [MEYER 1993].

Referências Bibliográficas

- [ADEODATO 1991] ADEODATO, P. J. L., **O Mecanismo de Histerese na Adaptação de Redes Neurais Artificiais**, Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, 1991.
- [ALBUQUERQUE 1991] ALBUQUERQUE, F., **Programando em C, C++ e Turbo C++**, Rio de Janeiro: Berkeley Brasil Editora, 1991.
- [ALSINA 1996] ALSINA, P. J., **Controle Neuroadaptativo Modular de Manipuladores Robóticos**, Campina Grande, 154p. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – UFPB, 1996.
- [ALSINA 1996a] ALSINA, P. J. e GEHLOT, N. S., **Controle de Motor de Indução usando Redes Neurais**, Campina Grande, 51p. Relatório técnico N.º RT00072/97 (Biblioteca setorial do Departamento de Engenharia Elétrica) – UFPB, 1996.
- [ALSINA 1996b] ALSINA, P. J. e GEHLOT, N. S., **Controle e Identificação de Manipuladores usando Redes Neurais**, Campina Grande, 57p. Relatório técnico N.º RT00085/97 (Biblioteca setorial do Departamento de Engenharia Elétrica) – UFPB, 1996.
- [ANDRADE, 1997] ANDRADE, PATRÍCIA SANTOS, **Sistemas Híbridos Neurosimbólicos, Estudo e Implementação**, Dissertação de Mestrado, COPIN, UFPB, 1997.
- [BECKENKAMP 1994] BECKENKAMP, F. G. & ENGEL, P. M., **A Connectionist Model for Chord Classification**, Anais do I Simpósio Brasileiro de Computação e Música, pp. 189-193, Caxambu, MG, 1994.
- [BECKENKAMP 1995] BECKENKAMP, F. G. & ENGEL, P. M., **Um Modelo Inteligente para Classificação Harmônica Tonal**, Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on Computer Music, pp 267-273, Canela, RS, 1995.
- [CARPINTEIRO 1995] CARPINTEIRO, O. A. S., **A Neural Model to Segment Musical Pieces**, Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on Computer Music, pp 114-120, Canela, RS, 1995.
- [CAVALCANTI 1993] CAVALCANTI, J. H. F.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S., **Controlador Fuzzy de Plantas Não Lineares**, Anais do I Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, UNESP, Rio Claro, São Paulo, Brasil, setembro de 1993, pp. 534-542.

[CAVALCANTI 1994] CAVALCANTI, J. H. F., **Controladores Neurais Adaptativos**, Campina Grande, 122p. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – UFPB, 1994.

[CAVALCANTI 1994] CAVALCANTI, J. H. F., LIMA, A. M. N. e DEEP, G. S., **Posicionamento de um Pêndulo Invertido usando Redes Neurais**, In: JORNADA ARGENTINA DE INFORMATICA E INVESTIGACION OPERATIVA, 23^a, Anais. Buenos Aires: Centro Cultural Gral. San Martin, 1v., p.307-317, 1994.

[CAVALCANTI 1994a] CAVALCANTI, J. H. F.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S., **Posicionamento de um Pêndulo Invertido usando Redes Neurais**, 23^a JAIIO, 23a Jornadas Argentinas de Informatica e Investigacion Operativa, Buenos Aires, Argentina, 6-8 de setembro. 1994.

[CAVALCANTI 1994b] CAVALCANTI, J. H. F.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S., **On-line Training of Adaptive Neural Network Controllers**, IEEE Industrial Electronics Society IECON'94, Proceedings, Bologna, Italy, setembro 1994, pp. 92-114.

[CAVALCANTI 1995] CAVALCANTI, J. H. F. e FERNEDA, E., **Intelligent Control of an Inverted Pendulum – Training and Evolution**. In: SEMISH'95 – Conferência Latino-americana de Informática, 21^a, Anais. Canelas RS, 2v., v.1, p.627-637, 1995.

[CAVALCANTI 1995a] CAVALCANTI, J. H. F.; FERNEDA, E., **Intelligent Control of an Inverted Pendulum - Evolution**, SBAI'95, Curitiba PR, 10-12 setembro de 1995, pp. 121-126.

[CAVALCANTI 1995b] CAVALCANTI, J. H. F.; SALES, E. F. JR.; FERNEDA, E. **"Intelligent Control of an Inverted Pendulum**, IISBRN'95, São Carlos, São Paulo, outubro 1995.

[CAVALCANTI 1998] CAVALCANTI, J. H. F., **Sistemas Inteligentes; Redes Neurais e Lógica Fuzzy**, Campina Grande: (Não publicado), 135p. (Universidade Federal da Paraíba – Departamento de Engenharia Elétrica), 1998

[COPLAND 1969] COPLAND, A., **A Nova Música**, Editora Record, Rio de Janeiro, 1969.

[FRITSCH 1994] FRITSCH, E. F., **Compositor Automático de Melodias Musicais - CAMM**, Dissertação de Mestrado - CPGCC-UFRGS, Porto Alegre, RS, 1994.

[FRITSCH 1995] FRITSCH, E. F., VICCARI, R. M., **SETMUS: Uma Ferramenta Computacional para o Ensino da Música**, Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on

- [GLANZMANN 1995] GLANZMANN, JOSÉ HONÓRIO, **Expert Piano: Um Ambiente de Auxílio à Aprendizagem Musical**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.
- [GOMIDE 1994] GOMIDE, F. A. C. & GUDWIN, R. R., **Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy**, SBA - Controle e Automação. Volume 4, número 3/Setembro-Outubro, 1994.
- [GROOVE 1994] **Dicionário Groove de Música**, Jorge Zahar Ed., 1994.
- [GROOVER 1988] GROOVER, M. P., WEISS, M., NAGEL, R. N. & ODREY N. G., **Robótica - Tecnologia e Programação**, Ed. McGraw-Hill, 1988.
- [GUPTA 1996] GUPTA, M. M. e SINHA, N. K., **Intelligent Control Systems**, New Jersey: IEEE Press, 820p., 1996.
- [HEBB 1949] HEBB, D. O., **The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory**, New York, Wiley, 1949.
- [HOLANDA 1988] HOLANDA, A. B., **Dicionário da Língua Portuguesa**, Editora Nova Fronteira, Primeira Edição, 1988.
- [JÚNIOR 1997] JÚNIOR, ESDRAS F. S., **Sistema de Controle Inteligente para um Braço Robótico**, Dissertação de Mestrado, COPIN/UFPB, Campina Grande, 1997.
- [KAMM 1996] KAMM, L. J., **Understanding Electro-mechanical Engineering; An Introduction to Mechatronics**, Piscatawa, NJ, USA: IEEE Press, 1996.
- [KOVÁCS 1996] KOVÁCS, ZSOLT LÁSZIO, **Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações**, São Paulo - Edição Acadêmica, 1996.
- [KOVÁCS 1997] KOVÁCS, ZSOLT LÁSZIO, **O Cérebro e a sua mente: uma Introdução à Neurociência Computacional**, São Paulo - Edição Acadêmica, 1997.
- [LASKE 1989] LASKE, O., **Comment on the First Workshop on IA and Music in Minnessota**, In Perspective of New Music, No 2, Vol. 27, Washington, EUA, 1989.
- [LIU 1973] LIU, C. L. & LAYLAND J. W., **Scheduling Algorithms for Multiprogramming in Hard Real Time Environments**, JACM Vol. 20 Número 01, janeiro 1973, pp 46-61.

[LOVELOCK 1987] LOVELOCK, W., **História Concisa da Música**, Martins Fontes, São Paulo, SP, 1987.

[MANZOLLI 1995] MANZOLLI, J., **The Development of a Gesture Interfaces Laboratory**, Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on Computer Music, pp 267-273, Canela, RS, 1995.

[MANZOLLI 1996] MANZOLLI, J., OTSHUKI, W., **INTERASOM: A Desktop for Algorithmic Composition**, Anais do III Simpósio Brasileiro de Computação e Música, pp. 84-88, Recife, PE, 1996.

[MCCULLOCH 1943] MCCULLOCH, W. S. & PITTS, W., **Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, (Reedição)** The MIT - Press, London, England, 1989, pp 18-27.

[MIRANDA 1990] MIRANDA, E. R., **Machine Learning of Sound Attributes: Computer-Assistance in Concept Formation and Musical Invention**, Anais do III Simpósio Brasileiro de Computação e Música, pp. 84-88, Recife, PE, 1996.

[MEYER 1993] MEYER, YVES, **Wavelets – Algorithms & Applications**, Ed. CIP, Second Edition, 1993.

[MIZRAHI 1990] MIZRAHI, VICTORINE VIVIANE, **Treinamento em Linguagem C Curso Completo Módulo 1**, São Paulo, McGraw-Hill, 1990.

[MOORE 1996] MOORE, F. R., **Dreams of Computer Music - Then and Now**, Computer Music Journal, Vol. 20, No 1, pp. 25-41, MIT Press, EUA, 1996.

[NAUCK 1994] NAUCK, D. & KRUSE, R., **Choosing Appropriate Neuro-Fuzzy Models**, EUFFT'94, Aachen 1994, pp. 552-557.

[PENROSE 1993] PENROSE, ROGER, **A Mente Nova do Rei: Computadores, Mentes e as Leis da Física**, Rio de Janeiro, Ed. Campus, 1993.

[PÉREZ 1995] PÉREZ, M. J., FORNARI, J. E., DAMIANI, F., **Reconhecimento de Timbres Musicais através de Rede Neural Auto-organizável de Kohonen**, Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on Computer Music, pp 267-273, Canela, RS, 1995.

[POPE 1991] POPE, S. T., **The Well-Tempered Object: Musical Applications of Object-Oriented Software Technology**, MIT Press, EUA, 1991.

[POPE 1994] POPE, S. T., **A Taxonomy of Computer Music**, Computer Music Journal, Vol. 18. No 1, pp. 5-7, MIT Press, EUA, 1994.

[POZZOLI 1983] POZZOLI, **Guia Teórico-Prático (para o Ensino do Ditado Musical)**, Ed. RICORDI, São Paulo, 1983.

[PRIOLLI 1994] PRIOLLI, MARIA LUISA DE MATTOS, **Princípios Básicos da Música para a Juventude**, Vol. 1, Editora Casa Oliveira de Músicas LTDA., Rio de Janeiro, RJ, 1994.

[RATTON 1992] RATTON, M. BALLOUSSIER, **MIDI - Guia Básico de Referência**, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1992, pp. 01-03.

[RATTON 1992] RATTON, M. BALLOUSSIER, **Quantização – Princípios Básicos**, Informus Tutorial, mar/abr/1996.

[RICH, 1991] RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência Artificial**. Makron Books. São Paulo, 1991, pp. 39-74.

[ROADS 1996] ROADS, CURTIS, **The Computer Music Tutorial**, The MIT Press, 1996 Cambridge, Massachusetts - Londres - Inglaterra.

[ROSSING 1990] ROSSING, THOMAS D., **The Science of Sound**, Segunda edição, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1990.

[RUBIN 1996] RUBIN, DAVID M., **O Músico Desktop - Para usuários de PC e Mac**, Makron Books, São Paulo, 1996.

[SALANT 1990] SALANT, MICHAEL A., **Introdução à Robótica**, São Paulo, McGraw-Hill, 1990.

[SAMPAIO 1997] SAMPAIO, ALGEIR P., VIANA, A. B., ALSINA, P. J. & CAVALCANTI, J. H. F., **RITMUSROB - Um Acionador Percussivo Inteligente**, III Simpósio de Pesquisa e Extensão, UFRN - Natal, 1997.

[SAMPAIO 1999a] SAMPAIO, ALGEIR P., ALSINA, P. J. & CAVALCANTI, J. H. F., **Servo Mechanic Rhythmic System**, IV Brazilian Symposium of Computer, PUC-Rio, Rio de Janeiro - RJ, 1999.

[SAMPAIO 1999b] SAMPAIO, ALGEIR P., ALSINA, P. J. & CAVALCANTI, J. H. F., **Sistema de Acionamento Percussivo Inteligente – RITMUSROB**, IV Brazilian Conference on Neural Networks, ITA - São José dos Campos, SP, 1999.

[SAMPAIO 1999c] SAMPAIO, ALGEIR P., ALSINA, P. J. & CAVALCANTI, J. H. F., **Sistema Ritmista Robótico**, XV Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Águas de Lindóia, SP, 1999.

[SHAY 1996] SHAY, WILLIAN A., **Sistemas Operacionais**, São Paulo: Makron Books, 1996. 758p.

[SILVA 1998] SILVA, M. E. S., **De Agentes Racionais a Agentes Semióticos**, Dissertação de Mestrado, CPIN, UFPB, 1998.

[TANENBAUM 1995] TANENBAUM, A. S., **Sistemas Operacionais Modernos**, Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1995. 493p., 1995.

[TAUB 1984] TAUB, HEBERT, **Circuitos Digitais e Microprocessadores**, São Paulo, McGraw-Hill, 1984.

[TEIXEIRA 1997] TEIXEIRA, L. de M., **Da Representação do Conhecimento Musical ao Esboço Conceitual de uma Sociedade de Agentes em Harmonia**, Dissertação de Mestrado, COPIN, UFPB, 1997.

[UEBEL 1995] UEBEL, L. F., BOTELHO, S. S. C., SIMÕES, E. V. & BARONE, D. A. C., **Controle Inteligente de Robôs Móveis Autônomos, RAM x Fuzzy**. II Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, São Carlos, SP, 1995.

[VIANA 1998] VIANA, A. B., **Sistema Inteligente para o Ensino do Dedilhado Pianístico**, Dissertação de Mestrado, COPIN, UFPB, 1997.

[ZADEH 1973] ZADEH, L., **Fuzzy Logic Technology and Applications**, New York: IEEE Technical activities board, 575p., preface, p.xvii-xviii, 1994.

[ZADEH 1973] ZADEH, L., **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes**, IEEE Trans. On Systems Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, pp 28-44, 1973.

APÊNDICE A - POSICIONAMENTO DO PÊNDBULO INVERTIDO

A.1 Introdução

Neste apêndice será descrito o sistema físico tipo pêndulo, além de descrito o modelo matemático do pêndulo simples e o posicionamento do pêndulo invertido.

A.2 O Pêndulo Simples

Na figura A.1 é mostrado o esquema geral de um pêndulo simples. A equação 5.1, refere-se ao torque do pêndulo, onde, P representa o peso e M a massa, g a aceleração da gravidade, t é o tempo na forma contínua; L o comprimento do braço do pêndulo, e θ representa o ângulo entre o braço e a normal ao suporte do pêndulo que passa pelo joelho $J1$ do pêndulo que é acoplado ao motor CC e $Tl(t)$ é o torque de carga.

$$Tl(t) = (P/g) L^2 d^2\theta(t)/dt^2 + P L \text{sen} (\theta(t)) \quad (\text{A.1})$$

Na figura A.2 é mostrado o esquema de montagem de um braço rígido, com um peso a ele acoplado (círculo menor na figura A.2) e ao eixo do motor CC (círculo maior da figura A.2). Nessa montagem o eixo do motor é visto de perfil. No esquema da figura A.2 são mostradas 4 posições especiais do braço do pêndulo, representadas pelos ângulos θ entre o braço do pêndulo e a normal. Um pêndulo é dito ser um pêndulo invertido se é permitido o seu posicionamento no ângulo $\theta=\pi$ (ou $|\theta| > \pi/2$), como mostrado na figura A.2a. Considera-se que os ângulos são medidos no sentido horário.

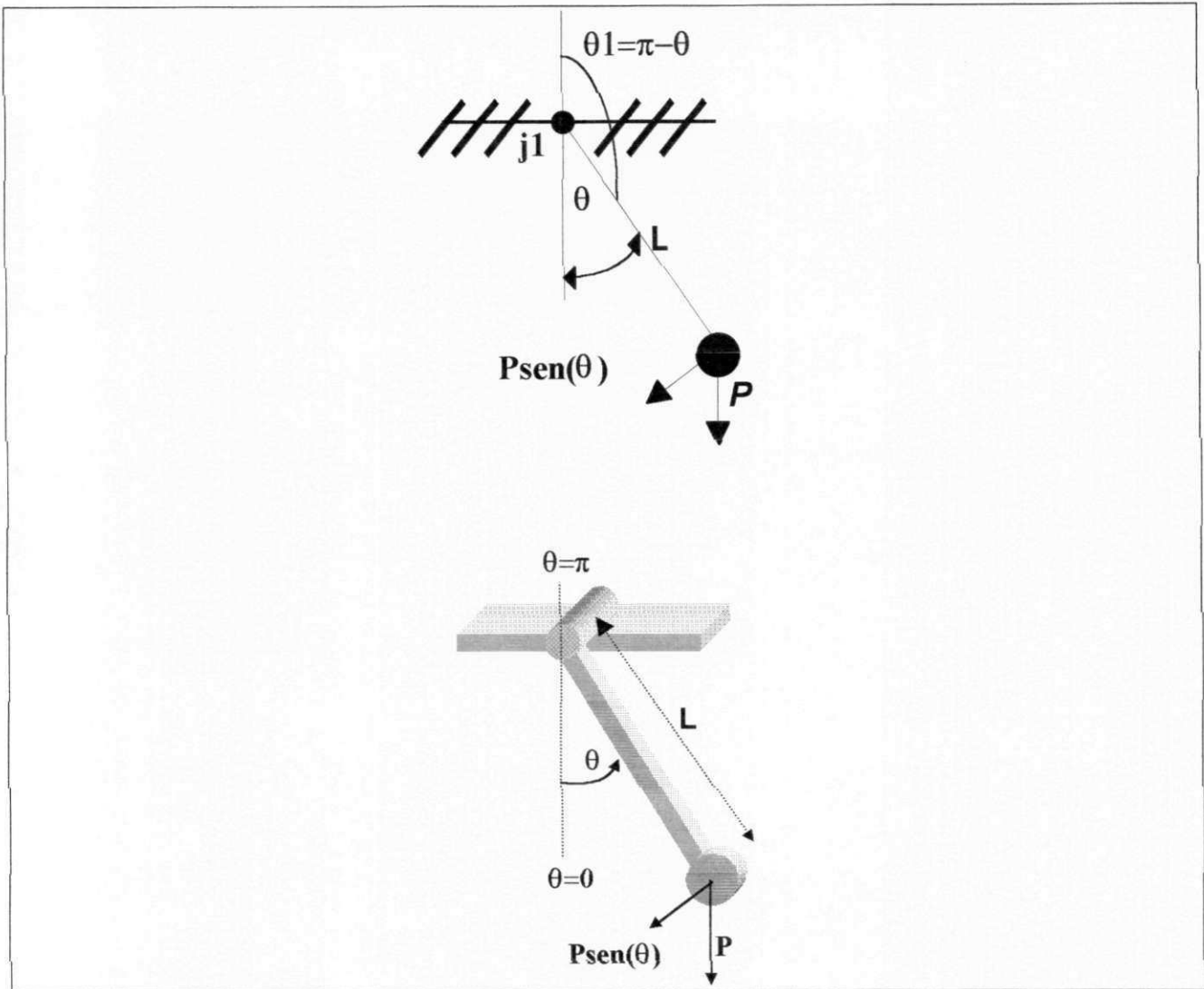


Figura A.1: Esquema Geral do Pêndulo Simples.

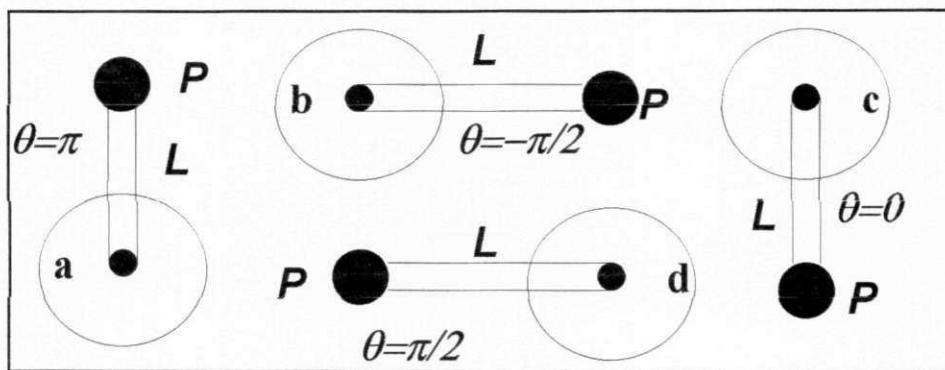


Figura A.2: O Posicionamento do eixo do motor CC.

$\theta(t+1)$ são representados em p.u. com valor de base 2π rd, $U(t)$ (tensão de armadura) representado em p.u. (por unidade) com valor de base 12 V, e $\Omega(t)$ (velocidade angular) representado no sistema p.u. (por unidade) com valor de base 2 rps. Na figura A.3 é mostrado o controlador neural adaptativo direto de posição do eixo do motor CC com $X1=U(t)$, $X2=\theta(t)$ e $X3=\dot{\theta}(t)$. W_{inp} representa os pesos entre os neurônios de entradas e os neurônios da camada escondida e W_{out} representa os pesos entre os neurônios da camada escondida e os neurônios da camada de saída.

O índice de desempenho $I(u)$ usado para a adaptação da RNMC do sistema motor CC e pêndulo invertido é definido na equação A.2.

$$I(U) = \frac{1}{2}(e_{t+1})^2 = \frac{1}{2}[\theta_r(t+1) - \theta(t+1)]^2 \tag{5.2}$$

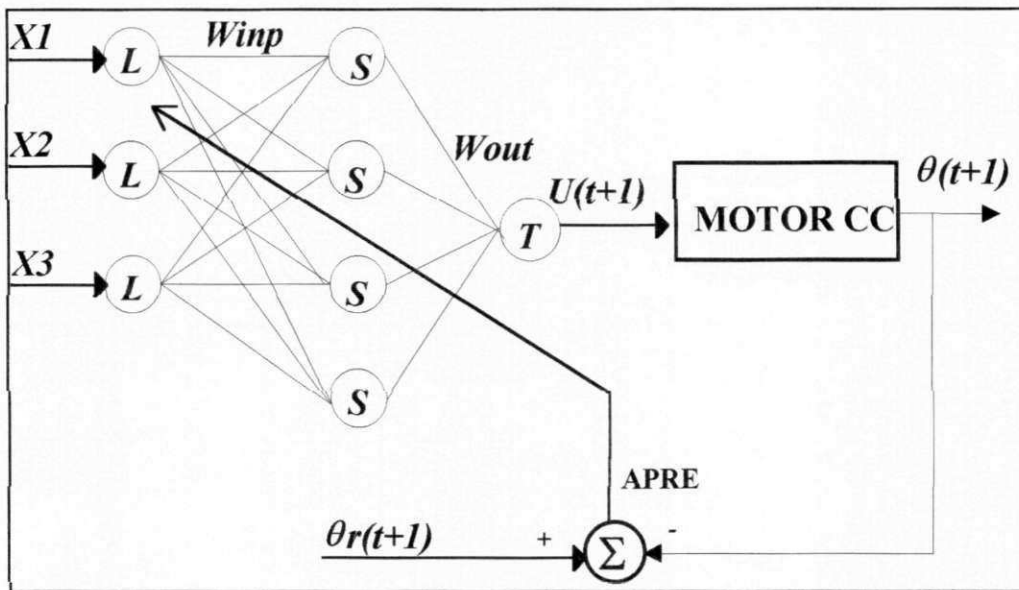


Figura A.3: Controlador neural de posição do eixo do motor CC.

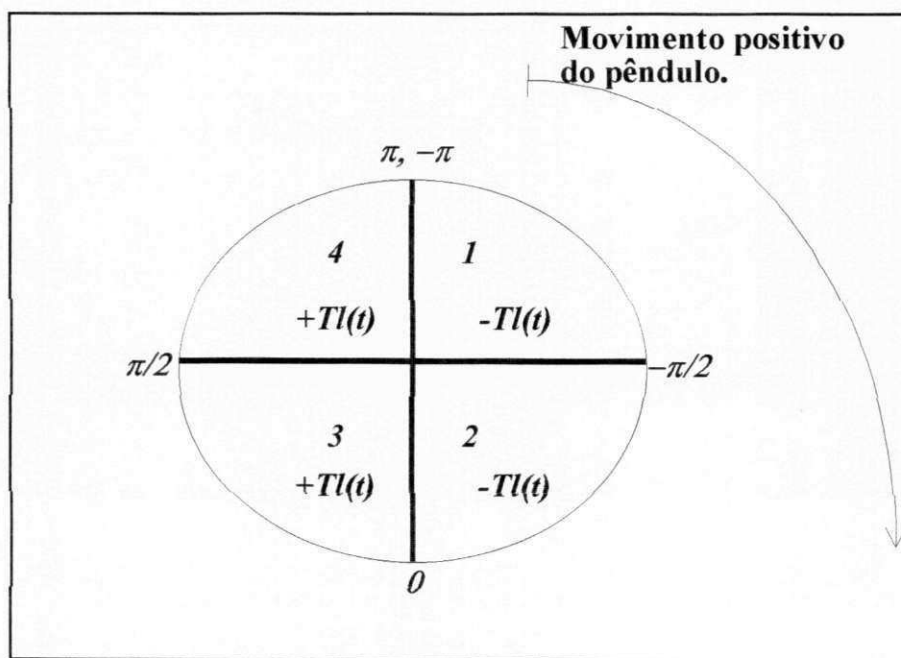
A.3 Posicionamento do pêndulo invertido

Na implementação experimental usou-se um pêndulo com comprimento $L = 0.1$ m e peso $P = 0.1$ Kg a fim de que, para determinados valores do ângulo $\theta(t)$, o torque $Tl(t)$ seja maior que o atrito viscoso do eixo do motor CC. Assim, quando o torque do motor for igual a zero, o pêndulo é movido para a posição em que $\theta = 0$.

Na equação A.1, o torque da carga $Tl(t)$ depende do deslocamento e também da aceleração do pêndulo. A partir das figuras A.1 e A.2, e considerando o pêndulo em repouso (estado estável)

- 1) O pêndulo estará no estado instável em $\theta(t) = \pi$ rd (Figura A.2a). Qualquer deslocamento do pêndulo fará $Tl(t) \neq 0$, levando o pêndulo ao ponto $\theta(t) = 0$ rd
- 2) Com o pêndulo em repouso, o torque $|Tl(t)|$ será máximo para $|\theta(t)| = \pi/2$ rd (ver Figura A.2b e A.2d).
- 3) O pêndulo estará no estado estável com $\theta(t) = 0$ rd (Figura A.2c). Qualquer movimento no pêndulo em torno de $\theta(t) = 0$ rd o fará retornar ao ponto $\theta(t) = 0$ rd.
- 4) O módulo do torque $Tm(t)$ gerado pelo motor CC deverá aumentar para estabilizar (posicionar e imobilizar) o pêndulo quando $|\theta(t)|$ crescer de 0 a $\pi/2$.
- 5) O módulo do torque $Tm(t)$ gerado pelo motor CC deverá diminuir para estabilizar o pêndulo quando $\theta(t)$ crescer de $|\theta(t)| = \pi/2$ a $|\theta(t)| = \pi$.

Na figura A.4 é mostrado um círculo com quatro quadrantes representando o torque de carga $Tl(t)$ gerado pelo pêndulo (ver [LIN 1992]) para diferentes ângulos $\theta(t)$ do pêndulo. O torque $Tm(t)$ gerado pelo motor CC (diretamente proporcional à tensão da armadura do motor CC) para estabilizar o pêndulo deve ter a mesma intensidade de $Tl(t)$ mas com sinal contrário. Os quadrantes foram definidos a partir do ponto de instabilidade em $\theta(t) = \pi$. Q1 foi definido no intervalo $-\pi \leq \theta(t) < -\pi/2$, Q2 foi definido para $-\pi/2 < \theta(t) < 0$, Q3 foi definido no intervalo $0 < \theta(t) < \pi/2$, e Q4 foi definido no intervalo $\pi/2 < \theta < \pi$. Os quadrantes podem ser vistos na função de pertinência θ_m de $\theta(t)$ mostrada na figura A.5. (θ_m representa a função de pertinência dos quadrantes de $\theta(t)$ e $\Delta U(t)$ representa o incremento em $U(t)$).



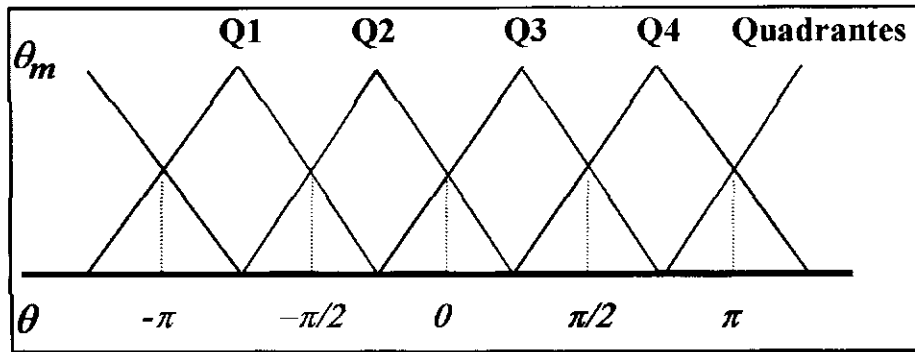


Figura A.5: Função de Pertinência do Círculo.

Considerou-se o torque $Tl(t)$ positivo nos quadrantes Q3 e Q4 e torque $Tl(t)$ negativo, nos quadrantes Q1 e Q2. Isto é, o torque $Tm(t)$, a ser gerado pelo motor CC para estabilizar o pêndulo, deve ser positivo quando o braço do pêndulo estiver posicionado nos quadrantes Q1 e Q2 e deve ser negativo quando o braço do pêndulo estiver posicionado nos quadrantes Q3 e Q4.

O posicionamento $\theta(t)$ do eixo do motor CC segue uma referência $\theta_r(t)$. No caso do pêndulo invertido, para cada quadrante do círculo de torque da figura A.4, existem diferentes valores de $U(t)$ capazes de sustentar o pêndulo invertido em $\theta(t) = \theta_r(t)$. O valor exato de $U(t)$ não é conhecido. Baseado nas características do sistema pêndulo invertido representadas pela equação A.1, no círculo de torque da figura A.4, e na função de pertinência da figura A.5, foram desenvolvidas as seguintes regras nebulosas para o treinamento seguido de controle neural.

Regra (1): Quando o braço do pêndulo estiver parado em Q1 ou Q2, $U(t)$ deve ser positivo;

$$\text{if } \theta_m == Q1 \text{ or } \theta_m == Q2 \text{ then } U(t) > 0;$$

Regra (2): Quando o braço do pêndulo estiver parado em Q3 ou Q4, $U(t)$ deve ser negativo;

$$\text{if } \theta_m == Q3 \text{ or } \theta_m == Q4 \text{ then } U(t) < 0;$$

Regra (3) e (4): Quando o braço do pêndulo estiver em Q1 ou Q4, $|\Delta U(t)|$ será crescente para posicionar e sustentar o pêndulo de $|\theta| = \pi$ rd a $|\theta| = \pi/2$ rd

$$\text{if } \theta_m == Q4 \text{ then } \Delta U(t) < 0;$$

$$\text{if } \theta_m == Q1 \text{ then } \Delta U(t) > 0;$$

Regra (5) e (6): Quando o braço do pêndulo estiver em Q2 ou Q3, $|\Delta U(t)|$ será decrescente para posicionar e sustentar o pêndulo de $|\theta| = \pi/2$ rd a $|\theta| = 0$ rd;

if $\theta_m == Q2$ then $\Delta U(t) > 0$;

if $\theta_m == Q3$ then $\Delta U(t) < 0$;

Durante o treinamento do controlador neural foram seguidas algumas regras adicionais, que não podem ser consideradas necessariamente regras nebulosas, obtidas do círculo de torque da figura A.4. Essas regras, consideradas como regras de apoio, foram indiretamente utilizadas no desenvolvimento das diferentes estratégias de controle do pêndulo invertido.

1) Não foram usados como referência os valores de $|\theta_r(t)| = \pi/2$ rd que é o ponto de maior torque gerado pelo pêndulo. Nesses pontos, a corrente na armadura do motor CC se aproxima do seu limite máximo.

2) Treinou-se a RNMC do controlador neural com valores do ângulo de referência próximo do ponto de estabilidade do pêndulo, ou $\theta_r(t) \cong 0$ rd (ver a figura A.4)

3) Cavalcanti et alii [CAVALCANTI 1994a] desenvolveram o conceito de estado passivo para permitir o treinamento em tempo real da RNMC. Basicamente, eles supuseram que o sistema representado pelo conjunto motor mais controlador neural (sistema global) tem pelo menos um estado de equilíbrio, e sem perda de generalidade, a origem pode ser considerada um desses estados. Representando-se o sistema motor CC na forma discreta por $x=f(x,u)$, eles definiram:

Definição 1 - Um ponto $x_e \in \mathcal{R}^n$ é um ponto de equilíbrio de $x = f(x,u)$ se existir uma entrada u_e tal que: $x_e = f(x_e, u_e)$.

Assim, particularmente, a RNMC da Figura A.3 pode ser treinada, usando-se a tensão de excitação da armadura u e o estado x_e , para fornecer na sua saída o valor u_e correspondente ao estado de equilíbrio. Baseado nessa estratégia, Cavalcanti et alii [CAVALCANTI 1994a] definiram o Estado Passivo do sistema global como:

Definição 2 - Um sistema dinâmico está no estado passivo quando estiver no ponto de equilíbrio com $x_e = f(x_e, u_e)$ e o controlador neural garante a excitação de controle u_e .

Os valores de $\theta_r(t)$ foram gerados para garantir os estados passivos durante o treinamento da RNMC. Isso garantiu que o pêndulo se movimentasse lentamente o que permitiu a simplificação na geração dos sinais usados no treinamento da RNMC.

mostradas três estratégias: TREIN; OSCIL, e ATRAC. Essas estratégias são ativadas de acordo com o estado do sistema pêndulo invertido (posição e velocidade do pêndulo). As variáveis binárias que representam as transições e as estratégias são INICIO, OSCIL e ATRAC.

Inicialmente INICIO = 1 e a regra lingüística número 7 é executada.

7) **if** INICIO **then** TREIN = 1

A estratégia TREIN é representada pelas regras 8 e 9 mostradas abaixo. ϕ é o valor do ângulo referência. Os símbolos $==$ e \cong são utilizados para representar a comparação entre os valores das variáveis, respectivamente a igualdade e a igualdade aproximada.

8) **if** TREIN **and** $\theta(t) == \phi$ **then** $\theta_r(t) = -\phi$ **and** NO = NO + 1

9) **if** TREIN **and** $\theta(t) == -\phi$ **then** $\theta_r(t) = \phi$ **and** NO = NO + 1

A variável NO (número de oscilações), mostrada na figura 5.10, é usada para indicar o fim da fase de treinamento. Após esta fase, a estratégia OSCIL é acionada (regra 10).

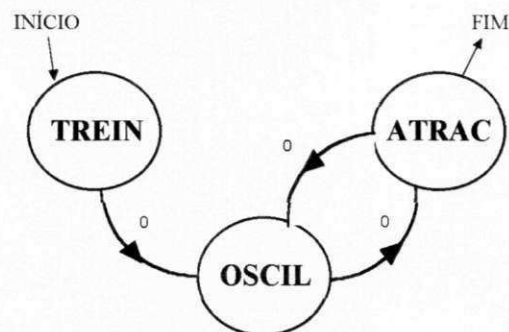


Figura 5.11: O Círculo das Estratégias.

10) **if** TREIN **and** $NO_r == M$ **then** TREIN = 0 **and** OSCIL = 1

A regra lingüística 11 é usada na estratégia OSCIL. π representa o incremento do ângulo referência.

11) **if OSCIL and $\theta(t) == \theta_r(t)$ then $\theta_r(t) == -\theta_r(t) - \omega * \text{SGN}(\theta_r(t))$ and NO = NO + 1**

A estratégia de atração (ATRAC) é acionada sob as condições mostradas na regra linguística

12. Isto é, quando o braço do pêndulo se aproximar do objetivo.

12) **if OSCIL and $|\theta(t)| \cong \pi$ then ATRAC = 1 and OSCIL = 0 and $|\theta_r(t)| = \pi$ and NO = 0.**

Durante a estratégia ATRAC a variável NO (número de oscilações) é incrementada quando o pêndulo atravessa, com velocidade não nula, o ponto $\theta(t) = \theta_r(t)$ (ver regra 13).

13) **if ATRAC and $\theta(t) == \theta_r(t)$ and $(\theta(t) - \theta(t-1)) \neq 0$ then NO = NO + 1**

A estratégia OSCIL é reativada (regras 14 e 15) quando o pêndulo ultrapassa um número de oscilações máximo (50 oscilações) ou o pêndulo se desloca para um dos quadrantes inferiores (Q_2 ou Q_3).

14) **if ATRAC and $\text{NO}_f == G$ then OSCIL = 1 and ATRAC = 0 and $\theta_r(t) = 0$ and NO = 0**

15) **if ATRAC and $(\theta_m == Q_2$ or $\theta_m == Q_3)$ then OSCIL = 1 and ATRAC = 0 and $\theta_r(t) = 0$**

A estratégia OSCIL se encarrega de posicionar o pêndulo em $\theta(t) = 0$. As regras linguísticas 6 e 7 são usadas para normalizar o ângulo do pêndulo entre $-\pi$ e π .

APÊNDICE B – INSTRUMENTOS DE PERCUSSÃO

B.1 Introdução

Neste apêndice será descrita a execução de ritmos, em termos apropriados, que é concebida nos instrumentos de percussão.

B.2 Instrumentos de Percussão

Os instrumentos de percussão podem ser os instrumentos musicais mais antigos (à exceção da voz humana), e têm experimentado recentemente um ressurgimento no interesse e na popularidade. Muitos instrumentos de percussão foram desenvolvidos recentemente e estão ainda no estágio experimental. Ainda, há relativamente pouco material publicado na área de acústica de instrumentos de percussão [ROSSING 1990].

A execução de um instrumento de percussão pode ser feita sacudindo-se ou percutindo-se uma membrana, placa ou barra de metal, madeira ou outro material rígido [GROVE 1994]. De família grande, muitos são os instrumentos de percussão, e há várias maneiras para os classificar. São classificados às vezes em quatro grupos: idiofones (xilofone, marimba, címbalos, gongos, etc.); membranofones (tambores); aerofones (assobios, sirenes); e cordofones (piano).

Os instrumentos de percussão usam geralmente um ou mais dos seguintes tipos básicos de vibradores: cordas, barras, membranas, placas, colunas do ar, ou câmaras de ar. Os primeiros quatro são mecânicos, e os dois últimos são pneumáticos. Dois deles (a corda e a coluna do ar) tendem a produzir sobretons harmônicos; os outros, no geral, não. As barras, as membranas, e as placas são três classes de vibradores cujas modalidades de vibração não são relacionadas harmoniosamente. Assim os sobretons que soam não serão harmônicos do tom fundamental. Os sobretons enarmônicos destes vibradores complexos dão aos instrumentos de percussão seus timbres distintivos [ROSSING 1990]. A Fig. B.1 mostra alguns instrumentos de percussão [GROVE 1994].

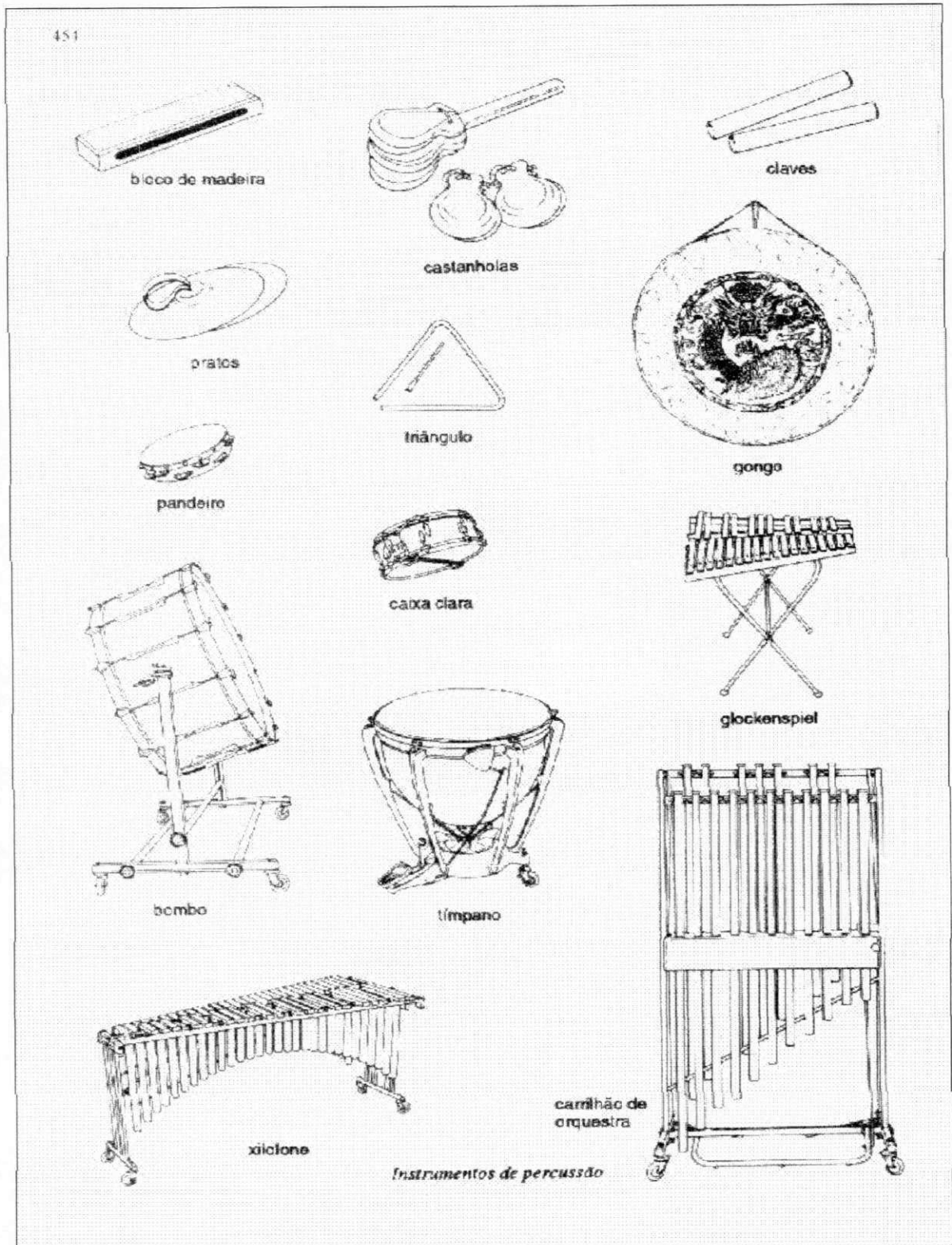


Figura B.1: Instrumentos de Percussão.

B.2.1 Fuste

O fuste é o corpo de um tambor e tem a função de ressonador.

B.2.2 Maceta

Maceta é uma antiga denominação para uma baqueta com cabeça grande e acolchoada com que se percute o bombo.

B.2.3 Baqueta

A baqueta é uma peça de madeira curta e afilada, com que se percutem os instrumentos de percussão. Pode ter a cabeça coberta de feltro, couro ou material semelhante, conforme o instrumento executado ou o efeito pretendido. É, em geral, usada aos pares.

B.2.4 Atabaque

O atabaque é um tambor com som de altura indeterminada introduzido no Brasil pelos escravos africanos. Ele compõe a orquestra rítmica do candomblé obedecendo, ritualmente, tamanhos, tessituras e denominações próprias: "rum", o maior e de tessitura grave; "rumpi", de tamanho intermediário e de tessitura média; e "lé", o menor e de tessitura aguda. Tem fuste longo, afunilado em direção à base, e uma só membrana; é tocado com as mãos no ritual "congo" e com baquetas finas no ritual "keto".

B.2.5 Bombo

O bombo é o maior de todos os tambores orquestrais, com som de altura indeterminada. Ele tem a forma de um fuste cilíndrico de madeira com membranas (de pele animal ou sintética) estendidas sobre ambos os lados e percutidas por baquetas. Em orquestras, ele é tocado na posição vertical, o que pode variar quando usado em outros tipos de conjuntos. No Brasil, ele também é conhecido como "bumbo", "grande caixa", "zabumba", e "zé pereira".

B.2.6 Bateria

A bateria é um conjunto de instrumentos de percussão acoplados adequadamente para serem tocados por um só músico. Ela possui um bombo (ou bumbo, percutido por um pedal), uma caixa clara, um par de pratos a pedal, e pratos suspensos. Ela admite outras percussões e acessórios subsidiários (como a vassourinha) de acordo com o estilo da música a ser tocado.

B.2.7 Surdo

O surdo é a denominação dos tipo de tambor de marcação da bateria de uma escola de samba. Ele tem um "som surdo", pouco sonoro, tambor e caixa sem bordões. É também denominado ("caixa surda", "tambor surdo"), de sonoridade opaca, utilizados para marcação rítmica.

B.2.8 Tambor

O tambor é um instrumento de percussão que consiste de uma pele animal (ou sintética), conhecida como "membrana", esticada sobre uma moldura, denominada "fuste", que pode ser de madeira, metal, cerâmica ou osso. Os tambores são conhecidos em praticamente todas as eras e culturas; em sua maioria, produzem som sendo percutidos com as mãos ou com baquetas. Da família dos membranofones, os tambores podem também ser sacudidos, friccionados (quando a membrana, ou uma vareta ou cordão em contato com ela, é esfregada) e até mesmo dedilhados (quando uma corda presa à membrana, ao transferir-lhe suas vibrações, a faz soar). Os tambores assumem variados formatos: semi-esféricos, cilíndricos, em forma de barril, de cone duplo, de ampulheta (cintados), cônicos ou calciformes, podendo ainda ter fuste estreito (como o pandeiro).

Os tambores estão entre os mais antigos de todos os instrumentos. Em muitas áreas são usados para transmitir mensagens, ou servem a fins sacros ou ritualísticos. Eles estão representados na arte do antigo Egito, Assíria, Índia e Pérsia. Eram conhecidos dos gregos e dos romanos. Tambores do tipo pequenos *naqqaras* e tamboris, de origem árabe ou sarracena, foram introduzidos na Europa durante as cruzadas do século XIII. Timbales maiores chegaram ao ocidente, provenientes do império Otomano, durante o século XV.

Na orquestra, os tambores de membrana têm som de altura determinada (tímpanos) ou indeterminada (bombo, tambor tenor e caixa clara). O tambor bombo consiste de um fuste cilíndrico de madeira, com membranas estendidas sobre as duas extremidades, ou "lados". O maior dos tambores orquestrais, é em geral tocado de pé, o instrumento apoiado verticalmente num suporte ou suspenso numa estrutura. A batida simples padrão se faz com uma baqueta de cabeça grande coberta de feltro.

O tambor caixa clara, de pequenas dimensões, consiste de um fuste cilíndrico, de madeira ou metal, com ambos os lados recobertos por uma membrana de pele animal ou sintética. Acoplados à membrana inferior há oito ou mais bordões (cordas de tripa, de metal, ou náilon capeado de metal), cuja vibração dá à caixa clara o seu timbre brilhante característico. É tocada com baquetas de madeira, arredondadas na cabeça e utiliza padrões como o "redoble" e ornamentos que incluem uma, duas ou três notas de adorno ("flam", "drag", "ruff" etc.) A caixa clara mais antiga que se conhece é o tamboril medieval, representado na arte do início do século XIII e do século XIV como um tambor com cordões tensionados e um bordão. A música escrita originalmente para a caixa clara é de caráter militar, sobretudo instruções de sinalização e marcação de passo.

O tambor tenor tem fuste cilíndrico, sendo pouco maior no diâmetro (c. 45 cm) do que na altura (c. 36 cm). Sua sonoridade fica entre a do bombo e a da caixa clara sem bordões; é tocada com uma baqueta de cabeça rija ou acolchoada [GROVE 1994].

B.2.9 Tamborim

O tamborim é um pequeno tambor, com pele em um dos lados, que o executante segura com a mão e percute com uma baqueta. O tamborim pode ter fuste de metal ou acrílico e membrana de náilon.

B.2.10 Tantã

O tantã é um instrumento de percussão, um tambor de madeira fendida, utilizado para fins musicais e de mensagens. Os tantãs são construídos a partir de um tronco de árvore e são munidos de uma fenda na parte superior por onde se esvazia o cerne, deixando-se as paredes do instrumento com espessuras variáveis para dessa maneira se obter sons diferentes.

B.2.11 Timbales

Os timbales são tambores geminados, com fuste cilíndrico de metal e uma só membrana, percutidos com baquetas de madeira. Têm como característica de execução o toque simultâneo no aro e na membrana, denominado "estalo".

B.2.12 Tímpanos

Os tímpanos são os mais importantes instrumentos de percussão da orquestra, utilizados por todos os grandes compositores desde o séc. XVIII, em parte por terem som de altura determinada. As notas podem ser alteradas durante a execução de acordo com a extensão de cada tambor. Na orquestra moderna, conjunto de tímpanos é formado por quatro tambores: baixo (*ré-lá*), tenor (*fá-dó*), contralto (*si bemol-fá*) e soprano (*ré-lá*). Um quinto tambor, sopranino ou piccolo (*fá-fá*) foi usado por Stravinski na Sagração da primavera e eventualmente é encontrado em partituras contemporâneas. A afinação é efetuada tencionando-se as membranas através de tarraxas operadas manualmente e, nos modelos atuais, por meios de pedais. As membranas são feitas de pele animal ou sintética; o fuste, de forma semi-esférica, é de cobre (alguns fabricantes o fazem em fibra de vidro). Os tímpanos são tocados com um par de baquetas, num ampla variedade de formatos e materiais, de acordo com os efeitos pretendidos pelo compositor [GROVE 1994].

B.2.13 Zabumba

A zabumba é um grande tambor cilíndrico, uma variável do bombo, utilizado em manifestações folclóricas ou na execução de ritmos populares como o baião.