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

Alexandre Bezerra Viana

Sistema Inteligente para o
Ensino do Dedilhado Pianístico - SIEDP

Dissertação submetida ao curso de Pós-Graduação em Informática do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Informática.

Área de Concentração: Ciência da Computação
Sub-Área: Inteligência Artificial

Orientadores: José Homero Feitosa Cavalcanti, D.Sc
Pablo Javier Alsina, D.Sc

Campina Grande, Junho de 1998



V614s Viana, Alexandre Bezerra
Sistema inteligente para o ensino do dedilhado
pianístico - SIEDP / Alexandre Bezerra Viana. - Campina
Grande, 1998.
78 f.

Dissertacao (Mestrado em Informatica) - Universidade
Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

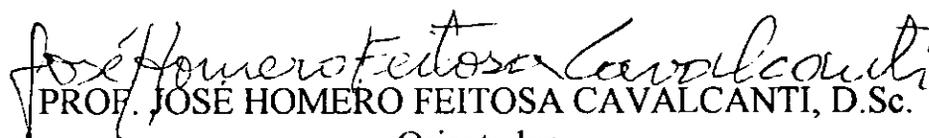
1. Inteligencia Artificial 2. Computer Music 3.
Algoritmo Generico 4. Dissertacao - Informatica I.
Cavalcanti, Jose Homero Feitosa II. Alsina, Pablo Javier
III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)
IV. Título

CDU 004.8(043)

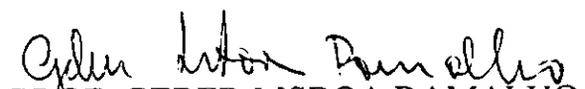
SISTEMA INTELIGENTE PARA O ENSINO DO DEDILHADO
PLANÍSTICO - SIEDP

ALEXANDRE BEZERRA VIANA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22.06.1998


PROF. JOSÉ HOMERO FEITOSA CAVALCANTI, D.Sc.
Orientador


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


PROF. GEBER LISBOA RAMALHO, D.Sc
Examinador


PROF. EDILSON FERNEDA, Dr.
Examinador

CAMPINA GRANDE - PB

*A meus pais Laelson e Clailze
por tudo o que sou.*

Agradecimentos

Agradeço em especial aos meus orientadores, Homero e Pablo, pela orientação, paciência, incentivos e apoio. Meus sinceros agradecimentos.

A Edilson Ferneda e ao meu tio Marcelo Grilo pela grande força dada nos momentos em que mais precisei.

Ao meu guru e grande admirador, José Alberto Kaplan pelos grandes ensinamentos na arte do piano e na jornada da vida.

A meu amigo Luciênio pelas discussões sobre música que muito ajudaram neste trabalho; A minha grande amiga Flávia Augusta pela ajuda em programação, e que com carinho me transmitiu muita força de vontade; ao colega Esdras Ferreira pela companhia no NEUROLAB; Algeir Sampaio, pelas cavalgadas paralelas dos trabalhos; A Everaldo, meu muito obrigado pela ajuda na construção do robô; Ao companheiro Ricardo pelas orientações no software de controle do robô; A Juracy pelas discussões em programação; Lígia Moreira pelas leituras, correções e sugestões que foram muito importantes para a conclusão deste trabalho.

André, Ana Emília e Leonardo, meus irmãos: muito obrigado pelo o carinho de vocês.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em especial à Escola de Música pela dispensa das atividades letivas que foram essenciais para o pleno desenvolvimento das pesquisas voltadas ao ensino da música.

À CAPES, a qual é a principal financiadora deste trabalho.

Por fim a todos que indiretamente contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

<i>Agradecimentos</i>	<i>iii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>vii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>ix</i>
LISTA DE EQUAÇÕES	<i>x</i>
RESUMO	<i>xi</i>
ABSTRACT	<i>xii</i>
1. Introdução	<i>1</i>
1.1 Breve História da Música Pianística	1
1.1.1 A Técnica Pianística.....	1
1.1.2 Dedilhado Pianístico Ótimo.....	2
1.2 Motivação da Dissertação	3
1.3 Objetivos da Dissertação	4
1.4 Descrição do Sistema Proposto	5
1.5 Organização da Dissertação	5
2. O Piano e o Dedilhado Pianístico	7
2.1 Introdução	7
2.2 O Piano	7
2.3 Definições Musicais	10
2.4 O Dedilhado Pianístico	11
2.5 Considerações importantes sobre o dedilhado.	13
2.5.1 Passagem especial dos dedos polegar e mínimo.....	13
2.5.2 Passagem dos dedos por cima e por baixo.....	13
2.5.3 Considerações sobre a peculiaridade de dedos individuais.....	14
2.5.4 Repetição do mesmo dedilhado em mudanças de posições de oitavas.....	14
2.5.5 Dedilhado em seqüências	14
2.5.6 Frascado.....	15
2.6 Conclusões	17
3. O Sistema Inteligente	18
3.1 Introdução	18
3.2 Os Sistemas Inteligentes	18
3.3 Os Sistemas Especialistas	19
3.3.1 Vantagens dos Sistemas Especialistas	20
3.4 O Algoritmo Genético	22
3.4.1 Fundamentos dos Algoritmos Genéticos	22
3.5 O Sistema Inteligente Implementado	25
3.6 Princípios Gerais da Escolha do Melhor Dedilhado	26
3.7 Características dos movimentos da mão	28

3.8	Cálculo do Comprimento do Dedilhado	30
3.8.1	Movimentos diretamente relacionados	30
3.8.2	Direções de movimentos inversos	32
3.8.3	Dedilhado igual e outra direção das notas.....	33
3.8.4	Notas iguais e outra direção de dedilhado.....	33
3.9	O Sistema Especialista implementado	34
3.10	O Algoritmo Genético implementado	35
3.11	Resultados Obtidos.....	36
3.11.1	Melodia com 5 notas	37
3.11.2	Melodia com 6 notas	38
3.11.3	Melodia com 7 notas	40
3.11.4	Melodia com 8 notas	41
3.12	Conclusões	43
4.	<i>A Mão Robótica</i>	44
4.1	Introdução	44
4.2	A Robótica	44
4.2.1	O que é um robô?	44
4.2.2	Partes de um manipulador robótico	44
4.2.3	Base Fixa	45
4.2.4	Braço Articulado	45
4.2.5	Unidade de Controle.....	46
4.3	Robôs músicos	47
4.4	O Robô Desenvolvido para o Sistema Inteligente.....	49
4.5	Escalonamento das Tarefas.....	53
4.6	Conclusões	55
5.	<i>Conclusões</i>.....	56
5.1	Conclusões Finais	56
5.2	Trabalhos Futuros.....	57
	<i>Bibliografia</i>	59
	<i>Apêndice A - O Software SIEDP</i>.....	65
A.1.	Introdução	65
A.2.	Descrição Geral do SIEDP	65
A.3.	Os MENU do programa SIEDP.....	65
A.3.1.	O menu <i>Arquivo</i>	65
A.3.2.	O menu <i>SI</i>	67
A.3.2.1	Modo Automático.....	67
A.3.2.2	Modo Manual.....	68
A.3.3.	O menu <i>SE</i>	68
A.3.4.	O menu <i>Genético</i>	69
A.3.5.	O menu <i>Opções</i>	70
A.3.6.	O menu <i>Ajuda</i>	71
A.4.	Conclusões	72
	<i>Apêndice B. O Executivo em Tempo Real</i>.....	73
B.1.	Introdução	73

B.2. Escalonador em Tempo Real.....	73
B.3. Conclusões	74
<i>Apêndice C. O Padrão MIDI.....</i>	75
C.1. Introdução	75
C.2. História do MIDI.....	75
C.3. Características do MIDI	75
C.4. Mensagens MIDI	77
C.5. Conclusões	78

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. EXEMPLO DE DEDILHADO PARA UMA SEQUÊNCIA DE 4 NOTAS.	2
FIGURA 1.2. VISÃO GERAL DO SI PARA A ESCOLHA DO MELHOR DEDILHADO.....	5
FIGURA 2.1. A AÇÃO DE UM PIANO DE CAUDA MODERNO.	9
FIGURA 2.2. EXEMPLO DE TERÇAS PARALELAS.	12
FIGURA 2.3. DEDILHADO NUMA ESCALA DA RAPSODIA DE LISZT.	13
FIGURA 2.4. INVENÇÃO NO. 1 À DUAS VOZES DE BACH.....	15
FIGURA 2.5. DEDILHADO PARA UMA FRASE DE BACH.	15
FIGURA 3.1. IDÉIA BÁSICA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA.....	20
FIGURA 3.2. OPERADOR CRUZAMENTO.....	23
FIGURA 3.3. O OPERADOR MUTAÇÃO.	24
FIGURA 3.4. FLUXOGRAMA DO ALGORITMO GENÉTICO.....	24
FIGURA 3.5. ARQUITETURA DO SISTEMA INTELIGENTE.	25
FIGURA 3.6. JANELA PRINCIPAL DO <i>SOFTWARE</i> SIEDP.	26
FIGURA 3.7. ATRIBUIÇÃO DOS NÚMEROS DAS TECLAS DO PIANO.	26
FIGURA 3.8. NUMERAÇÃO DOS DEDOS DA MÃO DIREITA.	27
FIGURA 3.9. EXEMPLO DA ESCOLHA DE UM DEDILHADO NUMA FRASE MUSICAL.	28
FIGURA 3.10. CAMINHO QUE A MÃO PERCORRE DURANTE O DEDILHADO.....	29
FIGURA 3.11. INSTANTES DO MOVIMENTO DA MÃO.....	29
FIGURA 3.12. EXEMPLO DE MOVIMENTO DIRETAMENTE RELACIONADO.....	31
FIGURA 3.13. EXEMPLO DE MOVIMENTO INVERSO.....	32
FIGURA 3.14. EXEMPLO DE DEDILHADO IGUAL E NOTAS DIFERENTES.....	33
FIGURA 3.15. EXEMPLO DE NOTAS IGUAIS E DEDILHADO DIFERENTE.	34
FIGURA 3.16. EXEMPLO DO CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE UM TRECHO MUSICAL ASCENDENTE.	34
FIGURA 3.17. EXEMPLO DE UMA REGRA (ESCALA MAIOR ASCENDENTE).	35
FIGURA 3.18. EXEMPLO DE MELODIA DE CINCO NOTAS.....	37
FIGURA 3.19. TELA DO SIEDP COM RESULTADO DA PE.	38
FIGURA 3.20. EXEMPLO DE UMA MELODIA COM 6 NOTAS.	39
FIGURA 3.21. CURVA CM X ITER PARA UMA MELODIA DE 6 NOTAS.....	40
FIGURA 3.22. EXEMPLO DE MELODIA COM 7 NOTAS.	40
FIGURA 3.23. CURVA CM X ITER PARA UMA MELODIA DE 7 NOTAS.....	41
FIGURA 3.24. EXEMPLO DE MELODIA COM 8 NOTAS.....	42
FIGURA 3.25. CURVA CM X ITER PARA UMA MELODIA DE 8 NOTAS.....	42
FIGURA 4.1. CONTROLE EM MALHA FECHADA.....	46
FIGURA 4.2. CONTROLE EM MALHA ABERTA.....	47
FIGURA 4.3. WABOT – ROBÔ PIANISTA.....	47

FIGURA 4.4. MUBOT. ROBÔ MÚSICO. (VIOLONCELLO)	48
FIGURA 4.5. MUBOT. ROBÔ MÚSICO. (VIOLINO)	48
FIGURA 4.6. FOTO DA MÃO ROBÓTICA.....	49
FIGURA 4.7. DETALHES MECÂNICOS DA MÃO.....	49
FIGURA 4.8. UM MOTOR DE PASSO DE ÍMÃS PERMANENTES DE 4 FASES.....	50
FIGURA 4.9. ACIONAMENTO NO QUAL SE EXCITA APENAS UMA FASE POR VEZ.....	51
FIGURA 4.10. MECANISMOS DE ACIONAMENTO DA MÃO ROBÓTICA.....	51
FIGURA 4.11. CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO ROBÔ.....	52
FIGURA 4.12. EXEMPLO DE MELODIA A SER EXECUTADA PELO ROBÔ.....	53
FIGURA 4.13. TAREFAS DA MELODIA DA FIGURA 4.12.....	54
FIGURA A.1. EXECUÇÃO DE UMA MELODIA.....	66
FIGURA A.2. CONFIRMAÇÃO DE ATUALIZAÇÃO DE ARQUIVO.....	67
FIGURA A.3. MENU <u>S</u> I DO SIEDP.....	67
FIGURA A.4. QUESTÃO DO SI (MELODIA É REGRA).....	67
FIGURA A.5. QUESTÃO DO SI (MELODIA NÃO É REGRA).....	68
FIGURA A.6. MENU <u>S</u> E DO SIEDP.....	68
FIGURA A.7. EXPLICAÇÃO DE REGRA.....	69
FIGURA A.8. MENU <u>G</u> ENÉTICO E SUAS SUB-OPÇÕES.....	70
FIGURA A.9. MENU OPÇÕES DO SIEDP.....	71
FIGURA A.10. OPÇÃO ALTERAR ITERAÇÃO.....	71
FIGURA A.11. A OPÇÃO SOBRE.....	71
FIGURA B.1. FALSO CÓDIGO DO ETR.....	74
FIGURA C.1. O MIDI THRU REPASSA OS DADOS QUE CHEGAM NO MIDI IN.....	76
FIGURA C.2. CIRCUITO MIDI (IN, OUT E THRU).....	76
FIGURA C.3. CÓDIGO FONTE DE EXECUÇÃO DE UMA NOTA MIDI.....	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. ALGUMAS REGRAS E SEUS DEDILHADOS CORRESPONDENTES.	17
TABELA 3.1. RESULTADO DA PP OBTIDA DO EXEMPLO DA FIGURA 3.19.....	38
TABELA 3.2. RESULTADO DO EXEMPLO DA FIGURA 3.20.....	39
TABELA 3.3. RESULTADO PARA UMA MELODIA DE 7 NOTAS.	41
TABELA 3.4. RESULTADO PARA UMA MELODIA DE 8 NOTAS.	42
TABELA 4.1. LISTA DE TAREFAS.....	53

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 3.1. PROBABILIDADE DE SELEÇÃO.	23
EQUAÇÃO 3.2. COMPRIMENTO DE UMA FRASE MUSICAL (EXPANDIDO).....	30
EQUAÇÃO 3.3. COMPRIMENTO DE UMA FRASE MUSICAL.....	30
EQUAÇÃO 3.4. COMPRIMENTO DO DEDILHADO COM DIREÇÕES IGUAIS.	31
EQUAÇÃO 3.5. COMPRIMENTO ENTRE O POLEGAR E O INDICADOR.....	31
EQUAÇÃO 3.6. COMPRIMENTO ENTRE OS DEDOS INDICADOR, MÉDIO E ANULAR.	32
EQUAÇÃO 3.7. COMPRIMENTO ENTRE OS DEDOS ANULAR E MÍNIMO.....	32
EQUAÇÃO 3.8. COMPRIMENTO DO DEDILHADO COM DIREÇÕES OPOSTAS.	33
EQUAÇÃO 3.9. COMPRIMENTO DO DEDILHADO COM DEDOS IGUAIS.	33
EQUAÇÃO 3.10. COMPRIMENTO DO DEDILHADO COM NOTAS IGUAIS.	33
EQUAÇÃO 3.11. CÁLCULO DO COMPRIMENTO MÉDIO (CM).	39

RESUMO

Esta dissertação descreve o projeto, a implementação, a montagem de um protótipo, e os resultados experimentais obtidos de um Sistema Inteligente desenvolvido para o Ensino do Dedilhado Pianístico (SIEDP). O SIEDP é baseado nos paradigmas Algoritmo Genético e Sistemas Especialistas, oriundos da área da Inteligência Artificial. Apresenta-se o software desenvolvido para encontrar o dedilhado ótimo de melodias pianísticas. Também são apresentados detalhes mecânicos e de hardware obtidos da construção de uma mão robótica capaz de executar as melodias pianísticas. O propósito do SIEDP é encontrar o dedilhado de uma melodia pianística e auxiliar os estudantes de música na visualização dos movimentos necessários na execução da melodia.

ABSTRACT

This dissertation describes the project, the implementation, the assembly of a prototype, and the obtained experimental results of an Intelligent System developed for Piano Fingering Teaching (SIEDP). The SIEDP is based on the Genetic Algorithm and Expert Systems paradigms, which are originated from Artificial Intelligence area. The software developed to find the optimum fingering of piano melodies is described. Mechanical and hardware construction details of a robotics hand capable to play the piano melodies are presented. The purpose of developed SIEDP is both to find the fingering of a piano's melody and to aid the music students in the visualisation of the movements needed to play the melody.

1. Introdução

1.1 Breve História da Música Pianística

Desde os primórdios que o homem vive em busca de novos conhecimentos a fim de manter sua sobrevivência. Com a sua grande capacidade de criação e percepção que se foi desenvolvendo ao longo dos anos, o homem conseguiu certas habilidades até então inimagináveis. De certo modo, os sons o acompanhavam desde o seu surgimento, como os cantos dos pássaros, o rumor infinito das águas, o murmúrio do riacho, etc. Porém este sem muita preocupação em explorá-lo [PAHLEN, 1991].

O homem criou diferentes instrumentos: bombo, flauta, etc., até chegar aos instrumentos complexos como o piano. O piano, também chamado de pianoforte (por ter a capacidade de dinâmica sonora) começou a ser construído por volta de 1698 pelo italiano Bartolomeo Cristofori [GROVE, 1994]; [TURNER, 1997]. Naquela época, de todos os instrumentos de teclado, o cravo era o que predominava. Com a chegada do piano e com seu grande poder de dinâmica sonora, surgiram novas dificuldades técnicas de execução instrumental, as quais o homem vem conseguindo superar com sucesso.

O ponto de partida natural para uma avaliação da música clássica instrumental é a composição para solo de teclado, na qual uma certa transformação estilística, coincidindo com a tendência convergente dos diferentes estilos nacionais, reflete-se na ascensão do pianoforte e no declínio do cravo [RUSHTON, 1988].

1.1.1 A Técnica Pianística

A técnica pianística tem passado por diversos estágios, os quais são relatados na literatura musical [LAROUSSE, 1964]; [RUSHTON, 1988]. No princípio as cordas eram feitas de tripa de animal e sua sustentação (armação) era feita por mecanismos de madeira. Com o tempo as cordas passaram a ser feitas de metal e a armação de aço. O piano, que antes tinha um som bastante opaco, ganhou brilho na sonoridade e novos adeptos foram surgindo para esse novo instrumento que aos poucos conquistou muita popularidade. Com o aparecimento dos grandes estudiosos e gênios da música erudita,

foi-se aos poucos dando um novo rumo ao poder desse novo instrumento.

A literatura musical pianística [PAHLEN, 1991]; [BENNETT, 1988] descreve um grande avanço em termos de técnica da execução instrumental. No princípio, os dedos polegar e mínimo não eram utilizados. Depois, se faziam passagens do dedo médio sobre o anular, até a fase atual em que todos os dedos são tecnicamente utilizados.

1.1.2 Dedilhado Pianístico Ótimo

A música é construída por sucessões de sons agrupados por grau conjunto (esquema de caráter escalístico) ou graus disjuntos (tipo arpejos ou acordes), ou por uma mistura de ambos. Portanto, o número de combinações de sons possíveis é enorme. Os dedilhados, isto é, as diversas associações de dedos necessárias para executar uma obra musical, são enormes. Na Figura 1.1 é mostrada uma mão direita com os seus dedos numerados de 1 a 5. Uma seqüência de apenas quatro notas, dependendo do contexto onde está inserida, pode ser digitada, pelo menos de 17 maneiras diferentes [KAPLAN, 1987].

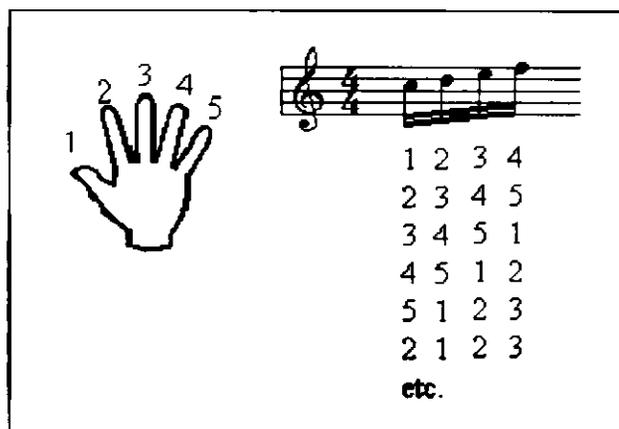


Figura 1.1 Exemplo de dedilhado para uma seqüência de 4 notas.

Os estudantes de piano freqüentemente acham muito aborrecido exercitar o posicionamento dos dedos. Entretanto para tocar bem piano é importante colocá-los corretamente. Os profissionais sabem com que dedo vão tocar cada nota de uma peça antes de executá-la. Um bom dedilhado é muito importante para uma execução homogênea [TURNER, 1997].

O dedilhado pianístico ótimo, é aquele em que o aluno consegue executar um trecho musical da forma mais cômoda possível (sem tensões musculares). Assim, quando o trecho exigir velocidade de execução, o pianista poderá fazê-lo da melhor maneira possível. A execução do trecho musical tem de ocorrer da forma como o compositor o escreveu: apenas com as notas escritas na partitura, no tempo certo, contudo, valorizando a interpretação musical do pianista que é baseada no estilo da obra. Uma obra musical do período barroco, jamais poderia ser interpretada da mesma forma que uma obra do período romântico. Dependendo das características físicas da mão de um aluno, um dedilhado pode ser melhor do que outro. Convém ao professor determinar a característica física da mão de um determinado aluno e a partir dessas informações, propor um dedilhado pianístico ótimo.

1.2 Motivação da Dissertação

Hoje em dia é comum se encontrar no mercado diversos tipos de softwares musicais, para a utilização em computadores pessoais equipados com placa de som e interface MIDI. Muitos deles voltados para o auxílio da edição musical, outros para ajuda na composição, outros apenas para o ensino de harmonia, etc. O ENCORE da Passport®, é um bom exemplo de software voltado para o auxílio de composição musical e edição de partituras. O FINALE, da Coda® Music é um editor de partituras de alto nível, porém de difícil entendimento. Ou seja, existe uma infinidade de softwares, mas nenhum deles que se proponha ao ensino do dedilhado pianístico. Não se conhece nenhum software que tenha sido desenvolvido para encontrar um melhor dedilhado para uma peça musical pianística. Alguns autores sugeriram um sistema para encontrar o melhor dedilhado para obras violonísticas utilizando algoritmo de Viterbi e Redes Neurais Artificiais [SAYEGH, 1989].

No Brasil, diversas universidades têm desenvolvido pesquisas utilizando a Inteligência Artificial na música. TEIXEIRA [1997], por exemplo, propõe um modelo de representação e manipulação do conhecimento musical que permite a sua utilização de forma coerente em um ambiente computacional, voltado ao ensino de Harmonia. Já na dissertação de GLANZMANN [1995], propõe-se um novo ambiente de estudo que forneça assistência ao aluno de música. O ambiente *Expert Piano* reúne as

características de um assistente especialista com as tecnologias músico-computacionais e multimídia.

Um dos maiores problemas que os alunos das Escolas de Música e Conservatórios encontram, é justamente o de desenvolver um dedilhado adequado para uma obra musical pianística. A leitura rítmica, a leitura simultânea de duas pautas, e o não conhecimento do dedilhado, são os principais obstáculos para os alunos principiantes em fase inicial de estudo de uma obra musical. Assim, os professores têm de encontrar o melhor dedilhado para seus alunos, têm de demonstrá-lo executando a obra musical repetidas vezes para o aluno, e ainda ajudá-los nos outros itens necessários para uma melhor aprendizagem musical. Um dos problemas principais enfrentados pelos professores de piano é a correção de vícios adquiridos pelo aluno quando este estuda sozinho [GLANZMANN, 1995].

O desenvolvimento de um Sistema Inteligente, com uma interface amigável, acoplado a um robô que execute essas obras musicais mostrando o dedilhado correto, será de grande interesse aos conservatórios musicais, mais especificamente para os alunos de piano. Atualmente, com o avanço e o baixo custo dos computadores, é possível o desenvolvimento de Sistemas Inteligentes para auxiliar os professores de piano no ensino do dedilhado pianístico aos seus alunos.

1.3 Objetivos da Dissertação

Dentro do exposto na seção anterior, o objetivo desta dissertação é desenvolver um Sistema Inteligente para o Ensino do Dedilhado Pianístico, para permitir um melhor aprendizado aos alunos de piano. O Sistema Inteligente deverá ser capaz de encontrar o dedilhado pianístico ótimo e, acoplado a um robô ou usando a interface MIDI, mostrar a forma de execução melódica da música. Dessa forma, os alunos poderão desenvolver mais rapidamente as músicas que estão estudando e, conseqüentemente, diminuir a presença do professor durante o estudo da peça musical, tornando-o mais estimulante para o aluno e menos cansativo para ambos.

1.4 Descrição do Sistema Proposto

A Figura 1.2 mostra o esquema geral do Sistema Inteligente (SI) desenvolvido para a ensino do dedilhado pianístico. O SI possui como bloco principal um Sistema Especialista (SE) acoplado a um Algoritmo Genético (AG) para a escolha da seqüência do dedilhado. Inicialmente, o pianista deve fornecer ao SI a entrada de dados, ou seja, a seqüência melódica. O SI, usando o SE ou o AG, analisa e prepara a melhor seqüência do dedilhado para a melodia em questão, e a envia para a execução melódica que pode ser no próprio computador usando as facilidades do MIDI ou, acionando uma mão robótica sobre um teclado musical convencional.

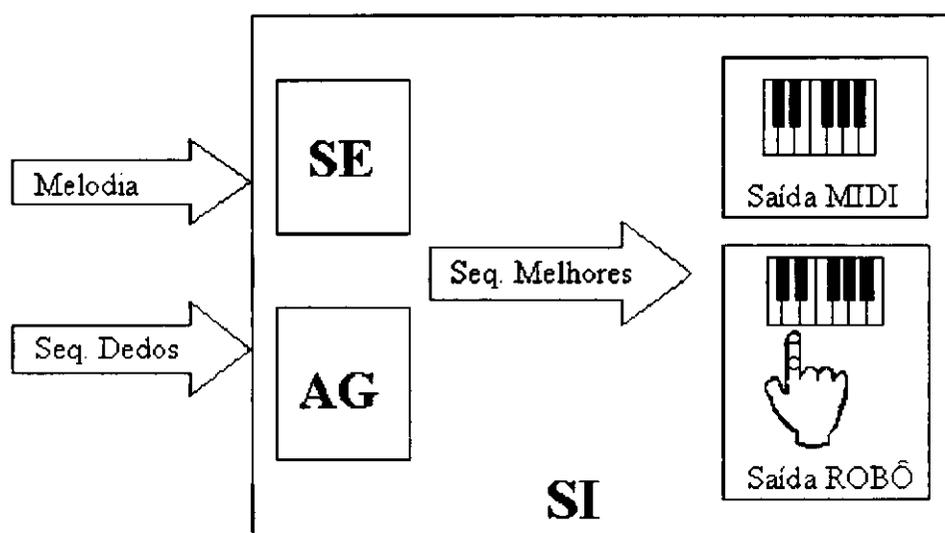


Figura 1.2. Visão geral do SI para a escolha do melhor dedilhado.

1.5 Organização da Dissertação

Esta dissertação foi organizada em 5 capítulos e 3 apêndices.

No capítulo 2 será descrito o piano, desde seu surgimento até os dias de hoje, e como os pianistas desenvolveram ao longo dos anos uma técnica toda especial para o dedilhado. Serão mostrados alguns exemplos para que seja melhor entendido o cálculo do comprimento do dedilhado pianístico, desenvolvido no capítulo 3.

No 3º capítulo será mostrado o SI. Faz-se uma introdução aos SEs e o AG é

descrito, mostrando-se como o dedilhado pianístico ótimo é encontrado além dos resultados obtidos em algumas melodias simples.

No capítulo 4 serão apresentados o projeto e a implementação da Mão Robótica utilizada para a execução das melodias para piano e as pesquisas feitas na construção de robôs músicos.

Finalmente, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões desta dissertação, junto com as perspectivas de trabalhos futuros.

Os três apêndices são: O *software* SIEDP (Apêndice A), O Executivo em Tempo Real (Apêndice B), e o padrão MIDI (Apêndice C).

2. O Piano e o Dedilhado Pianístico

2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição do instrumento musical, o piano. A seguir descrevem-se algumas técnicas utilizadas para aplicar um dedilhado ótimo a um trecho melódico, as quais são resultantes da experiência dos especialistas da área ao longo dos últimos séculos. Por último, são apresentadas algumas regras de dedilhado específicas (pentacordes, escalas, arpejos, etc.).

2.2 O Piano

PIANO: Instrumento de teclado que se distingue pelo fato de suas cordas serem percutidas por martelos, em vez de pinçadas (como no cravo), ou percutidas por tangentes (como no clavicórdio). Desempenhou um papel fundamental na vida musical profissional e doméstica a partir da segunda metade do séc. XVIII, não apenas porque pode fazer soar dez ou mais notas de uma só vez, e assim permitir a execução de praticamente qualquer tipo de peça da música ocidental, mas também porque pode ser tocado tanto de modo *piano* como *forte* (daí o nome), de acordo com o toque, que produz sua vasta gama expressiva [GROVE, 1994].

O piano de cauda moderno consiste de seis elementos principais: as cordas – três para cada nota (da região média para a alta), depois duas para cada, exceto para o grave extremo, com apenas uma; a maciça estrutura de metal que sustenta a considerável tensão das cordas (c. 16.400Kg); a tábua de harmonia, de madeira, debaixo das cordas, sem a qual a sonoridade seria tênue e diluída; a caixa harmônica que abrange tudo o que se descreveu acima; a ação, compreendendo as teclas (normalmente 88), os martelos e o mecanismo que os opera; e os pedais. O pedal à direita (o pedal de sustentação) levanta os abafadores das cordas, acrescentando duração e ressonância ao som, ainda que as mãos tenham sido retiradas das teclas; o da esquerda (o pedal “una corda” ou da surdina) reduz o volume, ou deslocando a ação lateralmente, para que os martelos atinjam uma corda a menos, ou, nos pianos de armário, aproximando os martelos das

cordas para que seu impacto seja diminuído, ou até mesmo pela simples interposição de um pedaço de feltro. Alguns pianos têm um pedal central, geralmente o pedal tonal, que permite ao executante a sustentação de um grupo selecionado de notas, ao mesmo tempo em que continua a abafar as cordas restantes; mais raramente, o terceiro pedal é um mecanismo abafador do som, para fins de exercício.

Os primeiros pianofortes foram fabricados por Bartolomeo Cristofori, que começou a elaborá-los em 1698. Ele era o encarregado dos instrumentos na corte dos Medici em Florença e sua invenção, que ele chamou de *gravicembalo col piano e forte* (“cravo com suave e forte”), tem um número notável de aspectos em comum com as versões posteriores e mais desenvolvidas do instrumento, especialmente o sofisticado “mecanismo de escape”, que impedia que o martelo voltasse a ferir a corda que este havia acabado de percutir. A idéia de Cristofori foi adotada na Alemanha por Silbermann, cujos aperfeiçoamentos tiveram a aprovação de J.S. Bach em 1747. O principal impulso da fabricação de pianos na Alemanha e na Áustria, no entanto, concentrou-se no desenvolvimento do piano segundo as mesmas linhas do clavicórdio. Isso levou à invenção da “Prelmechanik” (uma ação simples em que o martelo fica na frente do executante, e preso à tecla), ou “ação vienense”, a qual, tal como desenvolvida particularmente pela família Stein, deu origem ao característico pianoforte vienense, cuja leveza de toque e sutileza de nuances garantiu sua popularidade até o séc. XIX. A escola inglesa começou com Johann Zumpe, sócio de Silbermann, que começou a fabricar pianos de mesa (com a forma de um clavicórdio) em Londres, em 1760; estes foram entusiasticamente aprovados por J.C. Bach, e aperfeiçoados por John Broadwood, Robert Stodart e Americus Backers, todos eles importantes no desenvolvimento do piano inglês. A “ação inglesa” foi desenvolvida primeiramente por Backers no início dos anos 1770; Stodart patenteou-a em 1777 e a firma Broadwood adaptou-a e aprimorou-a. Outras melhorias na ação foram realizadas na França, por Sébastien Erard, o qual, ao mesmo tempo em que seguia principalmente modelos ingleses, fez modificações na ação para melhorar a repetição de notas.

No final do séc. XVIII, a idéia de usar uma armação de ferro para suportar a tensão das cordas foi desenvolvida na Inglaterra e nos EUA. Muitas firmas envolveram-se nesse processo, incluindo a de John Isaac Hawkins, um fabricante inglês que trabalhava nos EUA, o qual inventou o piano de armário e um novo sistema de suporte

metálico; Broadwood e Erard também usaram o metal, mas o primeiro fabricante a usar uma moldura de ferro vazada em um único molde, incluindo a placa com os pinos de engate, foi Alpheus Babcock, que trabalhou em Boston e em Filadélfia, e patenteou sua invenção em 1825. O uso de molduras de ferro, que permitiam maior tensão e, assim, cordas mais grossas e uma sonoridade mais plena e vibrante, foi o último desenvolvimento fundamental na história do piano. A tensão das cordas seria posteriormente distribuída através da moldura pelo sistema de “cordas cruzadas”, no qual um grupo de cordas é estendido diagonalmente sobre o outro [GROVE, 1994].

A Figura 2.1 mostra a ação de um piano de cauda moderno. Quando a tecla é pressionada, o movimento é transmitido por meio do piloto para a alavanca interna; a lingüeta então atua sobre o rolete, que faz o martelo avançar para a corda. O botão de escape aciona a projeção de lingüeta para a frente, e depois a lingüeta recua, permitindo que o martelo prossiga em seu movimento para ferir a corda e iniciar a descida; ele é então apanhado e retido pelo engate e pela alavanca de repetição, enquanto a tecla continuar pressionada. Se a tecla for parcialmente liberada, o martelo fica livre, e o rolete é acionado diretamente pela alavanca de repetição; torna-se possível, assim, ferir novamente a corda pressionando a tecla uma segunda vez (a lingüeta só acionará novamente o rolete quando a tecla estiver liberada a meio curso, quando então um pleno golpe do martelo se torna novamente possível).

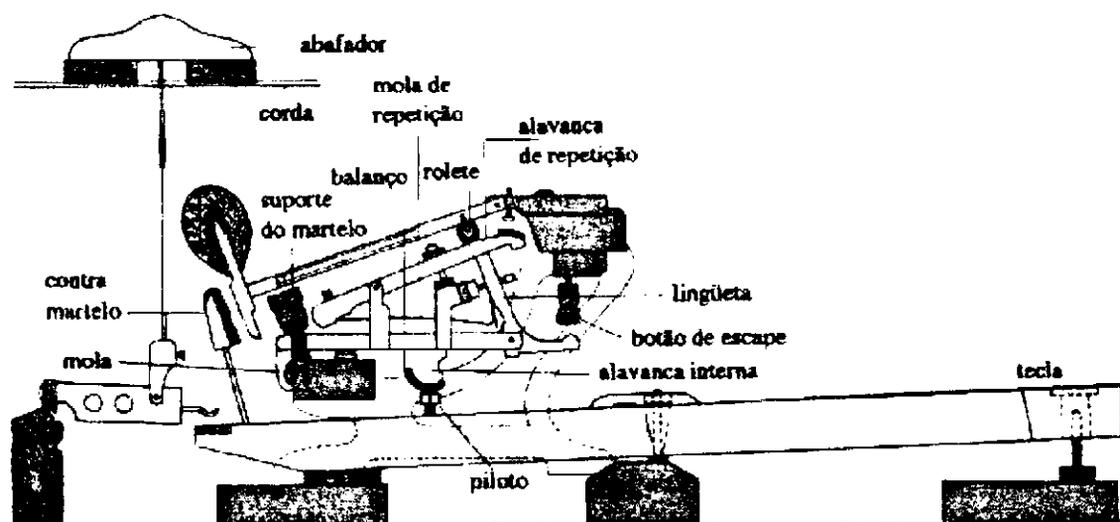


Figura 2.1. A ação de um piano de cauda moderno.

2.3 Definições Musicais

A seguir serão apresentadas algumas definições [GROVE, 1994] que são utilizadas nesta dissertação.

Altura - o parâmetro de um som que determina sua posição na escala.

Ritmo - a subdivisão de um lapso de tempo em seções perceptíveis; o grupamento de sons musicais, principalmente por meio de duração e ênfase.

Acorde - o soar simultâneo de duas ou mais notas.

Intervalo – a distância entre duas alturas.

Melodia – uma série de notas musicais dispostas em sucessão, num determinado padrão rítmico, para formar uma unidade identificável.

Escala – uma seqüência de notas em ordem crescente de altura ascendente ou descendente. É longa o suficiente para definir sem ambigüidades um modo ou tonalidade, e começa ou termina na nota fundamental daquele modo ou tonalidade. Uma escala é **DIATÔNICA** se a seqüência de notas baseia-se num gênero de 8ª que consiste em cinco tons e dois semitons; as escalas **MAIOR** e **MENOR** natural são diatônicas. Uma escala **CROMÁTICA** baseia-se numa 8ª de 12 semitons. A **ESCALA DE TONS INTEIROS** é formada unicamente de tons inteiros. Uma escala **PENTATÔNICA** tem cinco alturas dentro da 8ª.

Oitava - o intervalo entre duas notas separadas por sete graus da escala diatônica, dando uma razão de freqüência de 1:2.

Arpejo - é a sucessão de notas de um acorde que soam em seqüência; na música para teclado, a dispersão e expansão de um acorde.

Sétima da dominante – acorde consistindo de uma tríade maior sobre o quinto grau da escala (a dominante) com o acréscimo de 7ª menor a partir da fundamental.

Sétima diminuta – acorde consistindo de três terças menores superpostas.

2.4 O Dedilhado Pianístico

O dedilhado pianístico, é um dos recursos mais importantes com que o pianista conta para que a interpretação de uma obra musical seja a melhor possível. Um dedilhado ótimo, faz com que o pianista não só possa interpretar melhor a música, pois o mesmo terá comodidade com a execução da obra, como também acelera o processo de aprendizado da peça musical.

CLARKE [1997] relatou uma entrevista feita a sete pianistas. Na entrevista perguntou-se aos pianistas o que eles tinham a dizer sobre o dedilhado. Todos eles estavam se apresentando regularmente, ou já haviam se apresentado. A entrevista foi gravada em vídeo e depois transcrita. Foi utilizado como exemplo a abertura de uma sonata de Mozart. A entrevista considerou diferentes dedilhados possíveis de uma determinada passagem da obra: no dedilhado das escalas e das teclas pretas; no efeito da transposição, pedal e tempo; o dedilhado dos compositores e editores e a distribuição da mão; o dedilhado na leitura a primeira vista; na prática de leitura e memorização para uma apresentação; na importância dos fatores de interpretação, aprendizagem e psicológico/motor; e na história pessoal dos entrevistados e na aproximação para o ensino do dedilhado. Muitos problemas relatados pelos pianistas incluíram o seguinte: a relação entre o dedilhado aprendido (de professores, livros, tentativa e erro) e o dedilhado ensinado; o papel de decisões inconscientes (o “melhor” dedilhado pode ser fácil de identificar, mas difícil de explicar a sua origem); influências musicais sobre o dedilhado e o papel do dedilhado na interpretação; o efeito da interpretação induzido pelos dedilhados dos compositores; o conforto e o “feeling” de um dedilhado; e o balanço e a mobilidade das mão.

A seguir serão apresentados detalhes de um dedilhado ótimo desenvolvido para alguns trechos melódicos. É importante lembrar que, um dedilhado pianístico “ótimo” está inserido em características que vão desde a anatomia da mão humana, até critérios técnicos, como execuções de terças paralelas. O exemplo da Figura 2.2 mostra um trecho do estudo No. 6 Op. 25 de Chopin onde a mão direita executa apenas terças paralelas.

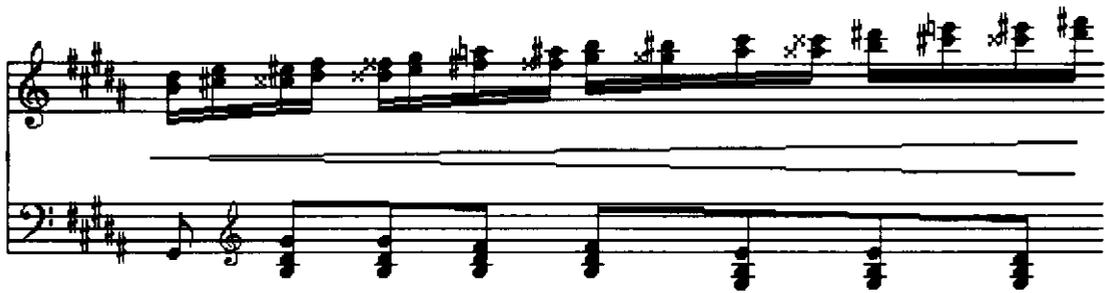


Figura 2.2. Exemplo de terças paralelas.

A escolha de um dedilhado ótimo é muito importante para se obter uma boa interpretação musical. Da mesma forma, ele cria condições preliminares para as soluções mais comuns dos problemas físicos que ocorrem na mão. Se fossem omitidas considerações com relação ao conforto, o dedilhado escolhido poderia se tornar inexecutável quando a melodia fosse tocada numa velocidade maior. Mais grave ainda seria se se desse atenção apenas ao dedilhado porque o resultado entraria em contradição com o conceito musical.

As regras do dedilhado tem surgido da experiência prática. No entanto, algumas dessas regras entram em contradição com outras, pois, o efeito musical deve determinar qual delas é mais indicada do que outra em um determinado caso. Por esta razão, o professor deve ensinar ao aluno o dedilhado de uma forma genérica para que ele sempre possa encontrar o melhor dedilhado de uma determinada música.

Um dedilhado lógico torna-se rapidamente associado com as posições das respectivas teclas, onde poucas repetições são necessárias para que a memorização ocorra. Durante a prática, muitos dedilhados tornam-se automatizados ao ponto que eles podem ser aplicados sem muita necessidade de pensamento, mesmo que o seu uso seja durante a leitura musical. (Os dedilhados chamados “instrutivos” causam mais prejuízo do que benefícios. Particularmente este é o princípio: “O mais difícil, o mais útil,” porque ele oculta a automatização dos atuais dedos) [GÁT, 1965].

2.5 Considerações importantes sobre o dedilhado.

2.5.1 Passagem especial dos dedos polegar e mínimo.

No caso em que se alternem em teclas brancas e pretas, o primeiro e o quinto dedos devem ser colocados sobre as teclas brancas para que a distância entre eles diminua. Usar o polegar sobre as teclas pretas força os outros dedos a se curvarem consideravelmente, se eles também não estiverem sobre teclas pretas. A passagem dos dedos por cima do polegar e este por baixo dos outros dedos é feita dificilmente pelos menores dedos caso seja necessário passar por teclas pretas. Portanto, para que as escalas sejam tocadas suavemente, é necessário que o polegar seja colocado nas teclas brancas.

Em função da expressão musical, o polegar e o dedo mínimo podem ser colocados nas teclas pretas. Assim, no exemplo abaixo, na escala da Rapsódia Espanhola de Liszt (Figura 2.3), o polegar e o dedo mínimo devem ser colocados nas teclas pretas para que haja uma diminuição de uma passagem por baixo, obtendo-se um efeito glissando da escala. Em geral, os efeitos de sonoridade são produzidos desta forma mais facilmente, porque o menor dedo -sendo colocado na tecla preta- também induz os outros dedos a executarem movimentos menores. Já que a passagem dos dedos diminuíram nesta solução, a adaptação vertical do movimento do braço e sua rotação, também, terão que ajudar mais ainda na clareza sonora da música.

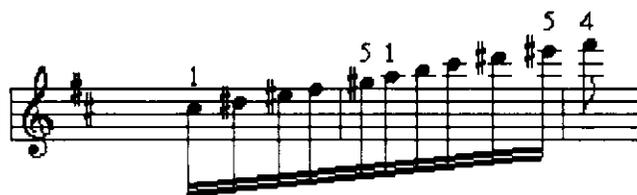


Figura 2.3. Dedilhado numa escala da Rapsodia de Liszt.

2.5.2 Passagem dos dedos por cima e por baixo

Torna-se fácil passar o polegar por baixo se os dedos que o sucedem estiverem em teclas pretas. Similarmente, a passagem por cima será mais fácil se o polegar tiver

acabado de tocar numa tecla branca e a sua próxima tecla a ser tocada for uma tecla preta. O movimento lateral do polegar necessita de um espaço considerável, porque as passagens por cima e por baixo são executadas quando o dedo está sobre uma tecla branca.

2.5.3 Considerações sobre a peculiaridade de dedos individuais

Na escolha do dedilhado, temos que levar em conta a estrutura anatômica de cada dedo. No cálculo de sua variação de tamanho, massa e situação, cada dedo é apropriado para uma solução de diferentes problemas. No entanto, deve-se chamar a atenção de que não existem coisas ruins ou más, dedos fracos ou fortes. Cada um dos dedos é apropriado para se tocar, se aplicado corretamente. O polegar é utilizado para tocar notas independentes apenas quando elas forem forte ou fortíssimo. O dedo mínimo é empregado apenas para o término de escalas diatônicas, mas, como ficou provado no estudo em A menor de Chopin, ele é excelente nas escalas cromáticas. Por esta razão, o mesmo tema soará inteiramente diferente se mudássemos o dedilhado, porque cada dedo requer adaptações diferentes e se requisitado por movimentos complementares.

2.5.4 Repetição do mesmo dedilhado em mudanças de posições de oitavas

A repetição de um movimento numa mesma posição e sob as mesmas circunstâncias facilita a automatização. No entanto, uma das regras mais antigas do dedilhado é que deve ser aplicado o mesmo dedilhado em sucessivas escalas de oitavas diferentes. Isto aplica-se não apenas em escalas, mas também em todas as outras formas e para temas que devem ser tocados com o mesmo dedilhado quando reaparecerem em diferentes registros de tom, mesmo quando provar ser inconveniente para a mesma extensão, por exemplo, em registros de tom muito alto ou baixo.

2.5.5 Dedilhado em seqüências

Todo tema deve ser tocado com o mesmo dedilhado quando surgir em registro diferente. Também se deve utilizar o mesmo dedilhado quando surgirem seqüências. Assim, na execução de seqüências, cada membro de uma seqüência deve ser tocado se possível com o mesmo dedilhado a fim de se conseguir repetições mais concisas. Uma exceção deve ser feita se houver inconveniência de movimentos (p.e. se o polegar ou o

Dedilhados adequados também ajudam na acentuação. Quando na repetição de acentos, as notas acentuadas devem sempre ser tocadas pelo mesmo dedo. As notas acentuadas devem ser golpeadas -sempre que possível- pelo polegar.

A Tabela 2.1 mostra as regras de dedilhado para escalas maiores e menores harmônicas, arpejos de tônica, arpejos de 7^a da dominante, e arpejos de 7^a diminuta. Na coluna **Tonalidade** tem-se as cifras referentes as tonalidades. Na coluna **Escala** tem-se o dedilhado para as sete notas da escala. Se o estudante quiser continuar executando a escala seguindo o registro ascendente ou descendente, faz-se apenas a repetição do dedilhado. Caso a escala termine na tônica uma 8^a a cima, o estudante deve colocar o 5^o dedo. Se a escala terminar na tônica uma 8^a abaixo, coloca-se o 1^o dedo (polegar). O mesmo se dá nos colunas dos **Arpejos**.

Tabela 2.1. Algumas regras e seus dedilhados correspondentes.

	Tonalidade	Escala	Arp. Tônica	Arp. 7 Dom	Arp. 7 Dim
MAIORES					
	C	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	G	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	D	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	A	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	E	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	B/Cb	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	F#/Gb	2,3,4,1,2,3,1	1,2,3	2,3,4,1	2,3,4,1
	C#/Db	2,3,1,2,3,4,1	4,1,2 1,2,3	4,1,2,3	4,1,2,3
	Ab	3,4,1,2,3,1,2	4,1,2	4,1,2,3	4,1,2,3
	Eb	2,3,4,1,2,3,1	4,1,2	2,3,4,1	3,4,1,2
	Bb	1,2,3,1,2,3,4	4,1,2	4,1,2,3	3,4,1,2
	F	1,2,3,4,1,2,3	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
MENORES					
	C	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	G	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	D	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	A	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	E	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	B	1,2,3,1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4
	F#	3,4,1,2,3,1,2	4,1,2	4,1,2,3	4,1,2,3
	C#	3,4,1,2,3,1,2	4,1,2	4,1,2,3	4,1,2,3
	Ab	3,4,1,2,3,1,2	4,1,2	4,1,2,3	4,1,2,3
	Eb	3,1,2,3,4,1,2	2,3,1	4,1,2,3	3,4,1,2
	Bb	4,1,2,3,1,2,3	2,3,1	4,1,2,3	3,4,1,2
	F	1,2,3,4,1,2,3	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4

2.6 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado uma descrição sucinta do piano desde a sua invenção por Bartolomeo Cristofori até os dias de hoje, e como a técnica do dedilhado passou por diversos estágios. Apresentaram-se algumas pesquisas feitas na área do dedilhado pianístico. Também foi descrito a relação dos dedos da mão com o teclado e como proceder na escolha do melhor dedilhado pianístico. No capítulo seguinte será mostrado como encontrar o dedilhado ótimo utilizando as ferramentas SE e AG.

3. O Sistema Inteligente

3.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se o Sistema Inteligente desenvolvido para a obtenção do dedilhado pianístico ótimo de uma melodia musical. O Sistema Inteligente utiliza o Algoritmo Genético e um Sistema Especialista para encontrar o dedilhado ótimo. Inicialmente faz-se uma sucinta descrição dos Sistemas Especialistas e dos Algoritmos Genéticos. A seguir são mostrados como estas ferramentas são utilizadas para encontrar o dedilhado ótimo.

3.2 Os Sistemas Inteligentes

Os Sistemas Inteligentes (SIs) possuem a capacidade de simular alguns níveis de aprendizagem e conhecimentos de determinadas atividades humanas. Eles usam essa capacidade para resolver problemas que não podem ser solucionados usando uma rotina algorítmica ou outra técnica da ciência da computação. Os SIs são utilizados no reconhecimento de voz, criação de robôs, etc. [ANTSAKLIS, 1994]. Também eles utilizam uma grande variedade de técnicas: de modelos cerebrais (redes neurais) passando por modelos da mente (sistemas baseados em regras), até modelos de evolução (algoritmo genético). Os SIs não são fáceis de serem implementados e requerem técnicas de programação que não são utilizadas nos métodos convencionais da computação.

A incorporação de técnicas inteligentes pode fazer com que os sistemas fiquem mais produtivos e pode favorecer a revisão dos problemas considerados intratáveis por outras técnicas que necessitam ações mais drásticas. Eles são uma ferramenta útil para explorar as características de sistemas existentes e então permitir que haja um melhoramento no desempenho. Isto aumenta a produtividade e inibe fracas tomadas de decisões pelo sistema [JOHN, 1995].

As principais abordagens dos SI são a simbolista e a conexionista. Os sistemas

desenvolvidos conforme o simbolismo são baseados no aprendizado teórico, dependem da aquisição de conhecimento. Eles são mais adequados para problemas de dedução lógica e possuem boa capacidade de explicação. Os sistemas conexionistas usam as redes neurais artificiais que simulam o funcionamento do cérebro humano [ANDRADE, 1997].

3.3 Os Sistemas Especialistas

Os Sistemas Especialistas (SE) surgiram na década de 1960 e foram usados na solução de problemas em várias áreas, tais como: química, geologia, medicina, bancos, seguros, etc. [ENCARTA, 1997]. Os SEs são considerados como uma área de aplicação da IA. Eles utilizam conhecimentos especializados para a resolução de problemas no mesmo nível de um especialista humano [GIARRATANO, 1989].

Os SE são programas de computadores que tomam decisões ou resolvem problemas usando o conhecimento e as regras definidas por um especialista humano de uma determinada área. Um bom exemplo de um SE é o MYCIN, que é baseado em regras. Ele usa o raciocínio inexato (estatística), e é aplicado na diagnose médica de terapias apropriadas para pacientes com infecções bacterianas [RICH, 1994].

Antigamente os SEs continham exclusivamente conhecimentos de especialistas. Hoje em dia, o termo SE é freqüentemente e erroneamente aplicado a qualquer sistema que utilize uma tecnologia oriunda da área dos SEs. A Figura 3.1 mostra a idéia fundamental do SE baseado em conhecimento. O usuário insere fatos ou outras informações para o SE e recebe como respostas informações inteligentes ou especialistas representadas pelo conhecimento.

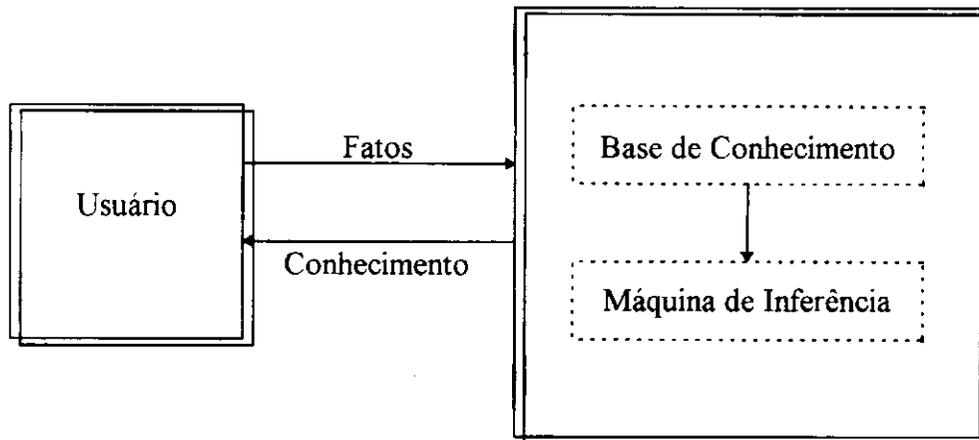


Figura 3.1. Idéia básica de um Sistema Especialista.

Os principais componentes de um SE são a base de conhecimento, a máquina de inferência e a interface do usuário.

A Base de Conhecimento armazena regras refletindo caminhos de raciocínio empregados pelos peritos e, assim, pelo sistema na resolução de um problema específico [CHORAFAS, 88]. Uma maneira de modelagem é utilizando-se as regras de produção **and/or – if/then**. Este formato mostra as regras com simplicidade, de maneira muito semelhante à linguagem natural.

A Máquina de Inferência controla o processo de chamada das regras que fazem parte da solução do problema inserido no sistema.

É de fundamental importância que a Interface do Usuário seja bem desenvolvida, uma vez que é através dela que o usuário poderá alterar os dados e visualizar os resultados obtidos. O software do SE deve ser capaz de mostrar quais as regras usadas para chegar à solução, ou porque uma determinada resposta não se encaixa no sistema. Portanto, a Capacidade de Explicação é fundamental para que o usuário saiba onde está o erro e poder aprender com ele.

3.3.1 Vantagens dos Sistemas Especialistas

Os SEs possuem um grande número de características importantes em relação à outras áreas da IA, tais como:

Utilidade Aumentada. Pode-se utilizar em qualquer computador. Um SE é um banco de

dados de informações dos especialistas.

Redução de custo. O custo do fornecimento de experiências é reduzido para cada usuário.

Redução de riscos. SEs podem ser utilizados em ambientes que podem causar risco de vida ao homem.

Conhecimento Permanente. A experiência adquirida pelo SE é conservada para sempre. Diferentemente do conhecimento de especialistas humanos, os quais podem se aposentar, desistir, ou morrer. Os conhecimentos dos SEs permanecerão disponíveis indefinidamente.

Múltiplas experiências. O conhecimento de vários especialistas podem ser incorporados de forma a trabalharem simultânea e continuamente em um problema em qualquer hora do dia ou da noite.

Aumento da Confiabilidade. Os SEs tem a confiabilidade aumentada já que não haverá uma outra decisão, como por exemplo a opinião de uma outra pessoa.

Explicação. Os SEs podem explicar com detalhes as escolhas por eles feitas.

Resposta Rápida. Algumas aplicações requerem respostas rápidas ou em tempo-real. Dependendo do software e do hardware utilizado, um SE pode responder mais rápido e ser mais utilizável do que um ser humano.

Estabilidade, sem emoção e respostas completas todas as vezes. Esta pode ser a característica mais importante, já que em situações de emergência, um especialista humano não pode operar no limiar de sua eficiência devido ao *stress* ou cansaço.

Tutor Inteligente. Os SEs podem atuar como um tutor inteligente permitindo ao estudante executar aplicativos prontos, explicando o raciocínio do sistema.

Banco de Dados Inteligente. Os SEs podem ser usados no acesso a banco de dados de uma forma inteligente.

3.4 O Algoritmo Genético

A medida do esforço do dedilhado pianístico ótimo é um problema NP completo [SAYEGH, 1989]. Diversos pesquisadores [HOLLAND, 1992] têm usado Algoritmos Genéticos para resolver problemas de otimização do tipo NP completo.

Algoritmo Genético (AG) é um procedimento iterativo que mantém uma população de estruturas (chamadas indivíduos, espécies ou cromossomos) para representar possíveis soluções de um determinado problema. [GREFENSTETTE, 1986].

Os AG se baseiam nos mecanismos da evolução dos seres vivos. Algumas soluções de um problema são combinadas através dos operadores genéticos específicos inspirados na Seleção Natural de Charles Robert Darwin (1809-1882), no Cruzamento e na Mutação.

3.4.1 Fundamentos dos Algoritmos Genéticos

O Algoritmo Genético, originalmente formulado por Holland (1975), foi usado inicialmente como um dispositivo de modelagem para a evolução orgânica. Depois, De Jong (1975) demonstrou que o AG também podia ser usado em problemas de otimização e que resultados ótimos poderiam ser produzidos.

Um algoritmo genético é um método estocástico de otimização para problemas da seguinte forma:

$$\text{Maximizar } f(s), \text{ sujeito a } : s \in \Omega = \{0,1\}^n$$

onde, $f: \Omega \rightarrow R$ é chamado *função "fitness"* e os vetores s , binários n -dimensionais em Ω , são chamados *strings* ou cromossomos. Os vetores s , que representam diferentes soluções do problema, funcionam de modo a emular e modelar cromossomos biológicos e a função $f(.)$ é uma medida da "aptidão" dos mesmos para solucionar o problema em questão. A característica mais marcante dos algoritmos genéticos é que os mesmos mantêm uma coleção de amostras do espaço de busca Ω , em lugar de um simples ponto do mesmo. Esta coleção $s(i) = \{s_1, \dots, s_m\}$ é chamada de "População" de cromossomos, a qual é modificada a cada "Geração" i (iteração do algoritmo genético) através de

operadores genéticos: Seleção, Mutação e Cruzamento. A população inicial é gerada aleatoriamente. Populações grandes não implicam necessariamente em melhores resultados. Os cromossomos são representados numa palavra binária. Cada bit do cromossomo é chamado de gene.

A Seleção é implementada através de um dos métodos mais usados, o método da Roleta, ou seja, os m cromossomos da nova geração são selecionados a partir da geração anterior, de acordo com uma probabilidade p_s , proporcional à função *fitness* relativa de cada cromossomo:

Equação 3.1. Probabilidade de seleção.

$$p_s(S_i) = \frac{f(S_i)}{\sum_{j=1}^m f(S_j)}$$

Os cromossomos sobreviventes ao processo de seleção são submetidos a cruzamento. Separados aleatoriamente aos pares, um lugar de cruzamento é escolhido através de um número inteiro randômico k para cada par selecionado. Os *bits* localizados após o bit k dos cromossomos de um par dado são intercambiados de acordo com uma probabilidade de cruzamento p_c , normalmente elevada ($0.6 < p_c < 0.99$). A Figura 3.2 ilustra o cruzamento entre dois cromossomos (palavras A e B) que geram os cromossomos representados pelas palavras C e D. O conjunto de bits em negrito do cromossomo A são trocados pelo conjunto de bits em negrito do cromossomo B. O número e a posição do conjunto de bits são escolhidos aleatoriamente.

$$\begin{array}{l} \mathbf{A} = \quad \boxed{00101001} \quad \mathbf{C} = \quad \boxed{00101010} \\ \mathbf{B} = \quad \boxed{00001010} \quad \mathbf{D} = \quad \boxed{00001001} \end{array}$$

Figura 3.2. Operador Cruzamento.

A mutação consiste na complementação estocástica de cada bit da população de acordo com uma probabilidade p_m , normalmente baixa (por exemplo, $p_m=1/n$). Valores razoáveis para a probabilidade de mutação são $0.001 < p_m < 0.01$. As mutações nos genes dos cromossomos são usualmente geradas de forma aleatória, mas os métodos são determinísticos e em geral podem ser considerados como sendo do tipo genético com regras de mutações determinísticas. A Figura 3.3 mostra o desenho de dois

cromossomos com 8 bits cada que ilustra a ocorrência de uma mutação no terceiro bit do cromossomo da palavra A que gera o cromossomo da palavra B. O bit mutante está indicado em negrito. O cromossomo da palavra B é resultante da mutação num dos bits do cromossomo da palavra A.

A =

0	0	1	0	1	0	1	0
---	---	----------	---	---	---	---	---

 B =

0	0	0	0	1	0	1	0
---	---	----------	---	---	---	---	---

Figura 3.3. O Operador Mutação.

A Figura 3.4 apresenta o fluxograma do AG padrão. 1)Primeiramente tem-se a geração da população inicial, normalmente feita aleatoriamente, a seguir 2) a função objetivo “fitness” avalia se já se encontrou o resultado desejado. Caso afirmativo, o AG pára. Caso contrário, os métodos de 3) seleção, 4) cruzamento, 5) mutação são postos em ação para se conseguir o resultado desejado. Avalia-se novamente a 6) função “fitness”. Repetem-se os passos 3-6 enquanto for necessário até que se consiga o resultado esperado.



Figura 3.4. Fluxograma do Algoritmo Genético.

3.5 O Sistema Inteligente Implementado

A Figura 3.5 mostra a arquitetura do SI desenvolvido para a ensino do dedilhado pianístico. O SI possui como bloco principal um SE e um AG que são utilizados para a escolha do dedilhado pianístico ótimo. Na versão atual do SI, apenas as teclas brancas estão sendo utilizadas. O pianista deve fornecer ao SI dois vetores de dados. Um deles com a seqüência melódica (**Melodia**) e o outro com um dedilhado qualquer (**Seq. Dedos**). Inicialmente o SI verifica se à melodia inserida pelo usuário (ou lida de um arquivo) pode ser associada uma regra de dedilhado padrão. Em caso afirmativo, o SI ativa o SE que após a análise da melodia, apresenta na tela as características da regra encontrada. A regra pode ser um pentacorde, escala, arpejo, etc. Caso negativo, o SI pergunta ao usuário se ele deseja utilizar o AG para encontrar o melhor dedilhado. Após a escolha do dedilhado ótimo pelo AG ou pelo SE (**Seq. Melhores**), o SI envia o resultado para a execução melódica usando a saída MIDI da placa de som do PC ou pela mão robótica.

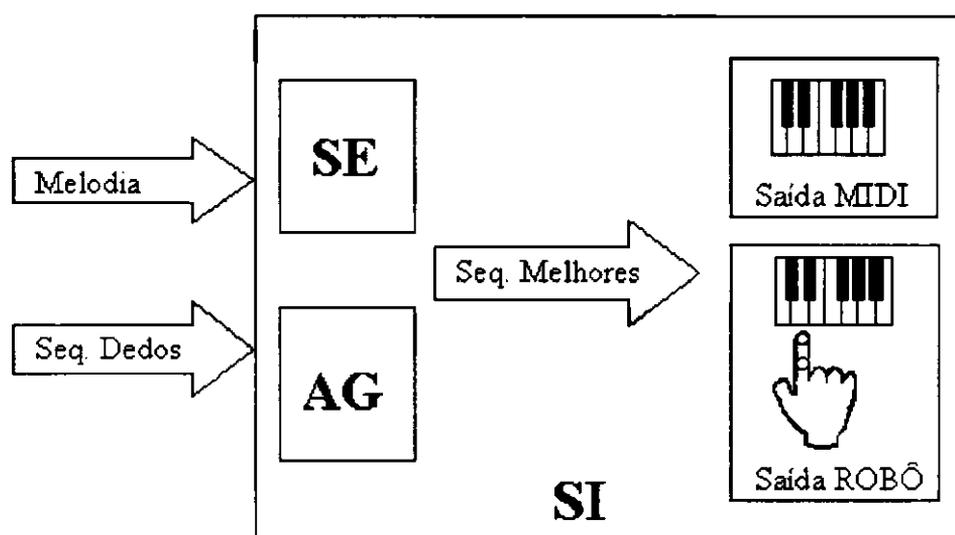


Figura 3.5. Arquitetura do Sistema Inteligente.

O SI foi implementado no C++ Builder da Borland®. Considera-se fundamental que haja uma Interface amigável e transparente ao usuário para que a compreensão do tratamento dado na fase de escolha do dedilhado pianístico seja claramente compreendido pelo aluno. A Figura 3.6 mostra a janela principal do software apresentada logo após o usuário acionar o programa SIEDP. O Apêndice A apresenta

detalhes de funcionamento e da utilização do SIEDP.



Figura 3.6. Janela principal do *software* SIEDP.

3.6 Princípios Gerais da Escolha do Melhor Dedilhado

O piano, dentre todos os instrumentos musicais, é o que possui a maior extensão sonora¹. Além disso, é um instrumento em que se lê duas pautas paralelamente. Ele é portanto um instrumento que exige muita concentração e coordenação motora, para que se possa conseguir executar a música tranquilamente. A Figura 3.7 mostra o esquema padrão do teclado de piano que possui 52 teclas brancas e 36 teclas pretas. A cada tecla branca foi atribuído um número correspondente à nota e posição no teclado, recebendo valores compreendidos entre -23 a +28 com o dó central sendo igual a zero. Geralmente, as músicas para iniciantes são escritas na tonalidade de dó maior e a localização inicial da mão direita do aluno foi escolhida tal que o seu polegar esteja sobre esta nota. Convencionou-se portanto atribuir o número 0 ao dó central. Para as teclas pretas foram atribuídos valores fracionários correspondentes à média das suas duas teclas brancas vizinhas. Por exemplo, a tecla preta entre as teclas 0 e 1, recebeu valor 1/2.



Figura 3.7. Atribuição dos números das teclas do piano.

Numerou-se os dedos da mão direita, atribuindo-se: ao polegar o número 1, ao indicador o número 2, ao médio o número 3, ao anular o número 4, e ao mínimo o

¹ O âmbito de um instrumento ou voz, ou de uma peça musical, da nota mais baixa à mais aguda [GROVE, 1994].

número 5 (Figura 3.8) . Um pentacorde maior ascendente para a mão direita, recebe a seqüência dos dedos 1, 2, 3, 4, 5, representada como $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$, e o pentacorde descendente recebe o dedilhado $5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. O símbolo \rightarrow indica a seqüência de percussão de dois dedos. As notas de uma frase musical são denominadas n_i e são representadas como o conjunto ordenado de n notas $\{n_i\}$. A seqüência dos dedos para execução das notas n_i é representado por d_j . O conjunto dos dedos do dedilhado é representado por $\{d_j\}$, onde d_j pode ser um dos cinco dedos da mão direita. Assim, por exemplo, se a melodia consiste de um conjunto de cinco notas vizinhas² (pentacorde ascendente ou descendente) então a elas são associados dedos vizinhos, obtendo-se $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$.

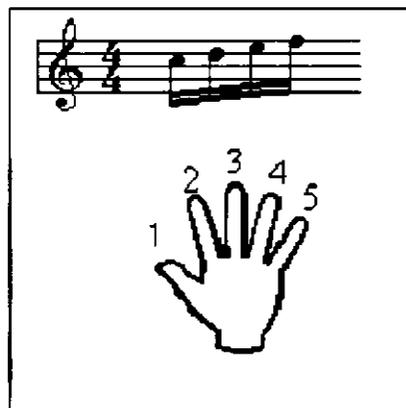


Figura 3.8. Numeração dos dedos da mão direita.

O comprimento do dedilhado pianístico é uma medida adotada para avaliar o esforço envolvido na execução de uma melodia. O cálculo do comprimento do dedilhado baseia-se na proximidade física dos dedos e no movimento da mão. Por exemplo, assumindo-se que o intervalo de segundas recebe valor igual a um, e se o polegar estiver sobre a primeira nota e a próxima nota for vizinha ascendente, então o comprimento será igual a um. O deslocamento do polegar assume valor menor ou igual a quatro, que é um intervalo de quinta justa ascendente para a mão direita ou descendente para a mão esquerda. Entre os dedos indicador, médio e anular, a distância máxima é de apenas duas teclas dependendo de certos critérios. No exemplo da Figura 3.9 (intervalo de contexto da frase de uma 8^ª), os melhores dedos seriam $\{2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5\}$. Começando com o 2^º dedo no dó e fazendo a passagem do polegar

² Notas vizinhas são aquelas onde o intervalo entre uma nota e a sua subsequente é de segunda.

sob o 2º dedo para alcançar o ré, fica-se com um intervalo de 3ª para ser executado com os 1º e 2º dedos; um intervalo de 2ª para tocar com os 2º e 3º dedos e finalmente um intervalo de 4ª para ser executado com os 3º e 5º dedos.



Figura 3.9. Exemplo da escolha de um dedilhado numa frase musical.

3.7 Características dos movimentos da mão

Na Figura 3.10 é apresentado um diagrama de tempo utilizado para ilustrar como é calculado o caminho que percorre a mão durante o dedilhado. Suponha-se que se tenha de executar a melodia $\{0; 2; 4; -3; 1; -1\}$ e que o aprendiz tecele $\{2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 1\}$. Na primeira unidade de tempo, o indicador é o primeiro dedo que tecla a nota dó central ($d1=2; n1=0$). Na segunda unidade de tempo, sem a mão se movimentar, o anular é o dedo que toca a nota mi. Na 3ª unidade de tempo a mão se move para a direita para que o dedo mínimo tecele a nota sol. Sucessivamente são dedilhadas $n4, n5$ e $n6$ após os correspondentes movimentos das mãos. Usando-se a posição da mão no tempo $t=1$ como posição base, observa-se no diagrama da Figura 3.10 que a mão se movimenta uma posição para a direita em $t=3$, três posições para a esquerda em $t=4$, e duas posições para a direita em $t=5$. Portanto, a mão se movimentou seis posições durante a execução da melodia.

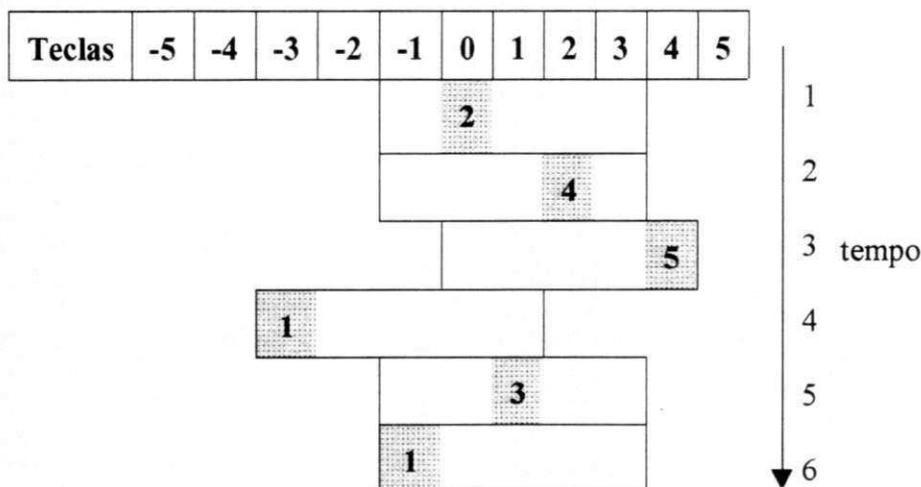


Figura 3.10. Caminho que a mão percorre durante o dedilhado.

Na Figura 3.11 mostra-se uma outra representação de como a mão faz o movimento no teclado, de acordo com a melodia. Nesta representação enfatizam-se os instantes do movimento da mão representado pelas setas. É contabilizado apenas o momento em que aparece a seta. A unidade de medida do movimento é igual a um (uma tecla). Ou seja, neste exemplo foram feitos três mudanças de posição da mão, o primeiro ascendente (1), o segundo descendente (3) e o terceiro ascendente (2), totalizando um valor de 6 unidades de movimento.

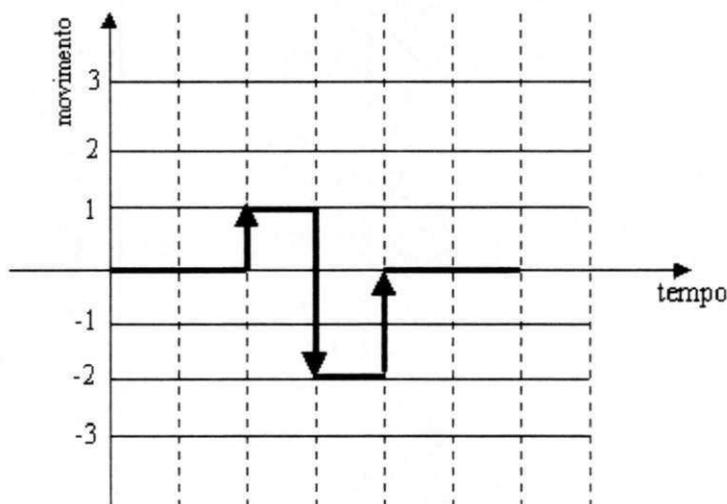


Figura 3.11. Instantes do movimento da mão.

3.8 Cálculo do Comprimento do Dedilhado

O cálculo do comprimento do dedilhado é utilizado para atribuir um valor de referência à função *fitness* ou função objetivo do AG. Descreve-se a seguir o procedimento sugerido nesta dissertação para calcular o comprimento do dedilhado de uma frase musical.

Seja C_{12} , o comprimento do dedilhado para as notas n_1 e n_2 , C_{23} o comprimento do dedilhado para as notas n_2 e n_3 , e seja $C_{(n-1)(n)}$ o comprimento do dedilhado para as $(n-1)$ -ésimas e n -ésimas notas. Assim, para se calcular o comprimento do dedilhado, representado por C , de uma frase musical com n notas pode-se utilizar a Equação 3.2 (expandido) ou a sua representação simplificada, mostrada na Equação 3.3.

Equação 3.2. Comprimento de uma frase musical (expandido).

$$C = C_{12} + C_{23} + C_{34} + \dots + C_{(n-1)(n)}$$

Equação 3.3. Comprimento de uma frase musical.

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} C_{(i)(i+1)}$$

O cálculo do comprimento $C_{(n-1)(n)}$, depende da seqüência das notas e dos dedos. A seguir são apresentados as quatro possibilidades das seqüências.

3.8.1 Movimentos diretamente relacionados

Se a nota for ascendente ou descendente em relação a sua antecessora e o dedilhado da nota também o for, ter-se-á uma seqüência de notas e dedilhados numa mesma direção (ascendente ou descendente). A Figura 3.12 mostra de forma clara esta situação.

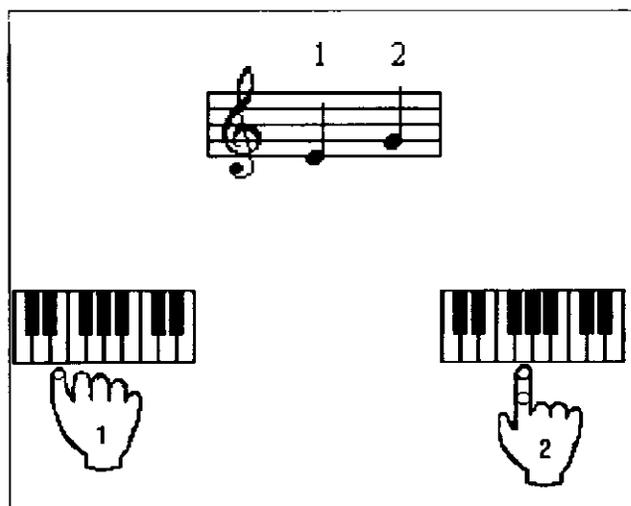


Figura 3.12. Exemplo de movimento diretamente relacionado.

Assim, o comprimento deste intervalo é definido como o mostrado na Equação 3.4. Para que se tenha $C_{(n-1)n} = 1$, quando houver movimentos diretamente relacionados, subtrai-se 1 do valor de $C_{(n-1)n}$ como mostrado na Equação 3.4.

Equação 3.4. Comprimento do dedilhado com direções iguais.

$$C_{12} = |n2 - n1| + \left| |d2 - d1| - 1 \right| + limita$$

onde,

$n1$ = número identificador da primeira nota da melodia.

$n2$ = número identificador da segunda nota da melodia.

$d1$ = número identificador do primeiro dedo a ser aplicado.

$d2$ = número identificador do segundo dedo a ser aplicado.

Acrescentou-se a variável *limita* na Equação 3.4 para ajustar o comprimento do dedilhado (penalização sobre o movimento). Foram considerados alguns casos para a existência da variável *limita*. No primeiro caso, os dois primeiros dedos são o anular e o indicador e a diferença entre as notas é maior que 4, *limita* é calculado como mostrado na Equação 3.5 (a). Quando a seqüência for inversa da seqüência dos dedos do caso anterior, aplica-se a fórmula da Equação 3.5 (b). O número 2 utilizado para multiplicar o valor absoluto da diferença entre as notas é denominado peso.

Equação 3.5. Comprimento entre o polegar e o indicador.

$$\text{if}(d1 = 1 \ \& \ d2 = 2 \ \& \ |n2 - n1| > 4) \text{limita} = 2 * |n2 - n1|; \text{ (a)}$$

$$\text{if}(d1 = 2 \ \& \ d2 = 1 \ \& \ |n2 - n1| > 4) \text{limita} = 2 * |n2 - n1|; \text{ (b)}$$

No segundo caso, sendo $d1$ diferente do anular e $d2$ diferente do mínimo, a diferença entre as notas gera a penalidade calculada como mostrada na Equação 3.6.

Equação 3.6. Comprimento entre os dedos indicador, médio e anular.

$$\text{if}(d1 > 1 \ \&\& \ d2 < 5 \ \&\& \ |n2 - n1| > 2) \text{limita} = 2 * |n2 - n1|;$$

No caso de $d1$ for o anular e $d2$ for o mínimo e a diferença maior que 3, para se calcular *limita*, utiliza-se a Equação 3.7 (a) para movimentos ascendentes, e a Equação 3.7 (b) para movimentos descendentes.

Equação 3.7. Comprimento entre os dedos anular e mínimo.

$$\text{if}(d1 == 4 \ \&\& \ d2 == 5 \ \&\& \ |n2 - n1| > 3) \text{limita} = 2 * |n2 - n1|; \text{ (a)}$$

$$\text{if}(d1 == 5 \ \&\& \ d2 == 4 \ \&\& \ |n2 - n1| > 3) \text{limita} = 2 * |n2 - n1|; \text{ (b)}$$

3.8.2 Direções de movimentos inversos

Se a nota for ascendente ou descendente em relação a sua antecessora e o dedilhado da nota estiver em sentido contrário, teremos uma seqüência de notas e dedilhados em direção inversa. A Figura 3.13 exemplifica um tipo de movimento inverso.

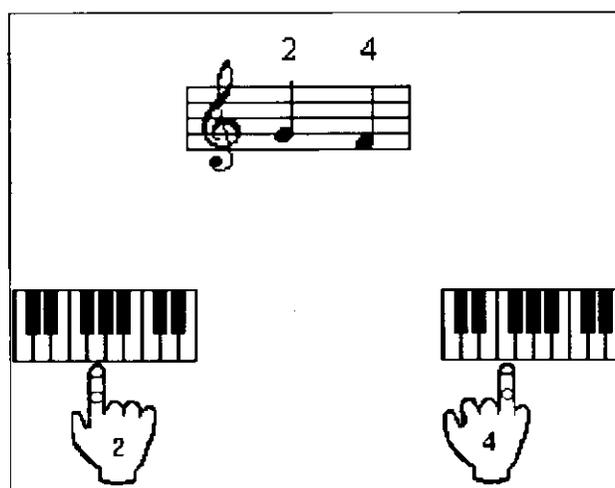


Figura 3.13. Exemplo de movimento inverso.

Assim, dá-se um peso maior ao comprimento, uma vez que a mão terá que se deslocar por inteiro. A Equação 3.8 mostra como se proceder neste caso.

Equação 3.8. Comprimento do dedilhado com direções opostas.

$$C_{23} = 2 * (|n3 - n2| + 1) + ||d3 - d2| - 1| + limita$$

3.8.3 Dedilhado igual e outra direção das notas

No caso de houver dedilhado iguais, i.e., o mesmo dedo teclando as 2 notas, e com qualquer sentido de movimento das notas, o cálculo é feito usando a fórmula apresentada na Equação 3.9. Um exemplo desta situação é mostrada na Figura 3.14.

Equação 3.9. Comprimento do dedilhado com dedos iguais.

$$C_{12} = 2 * |n2 - n1|$$

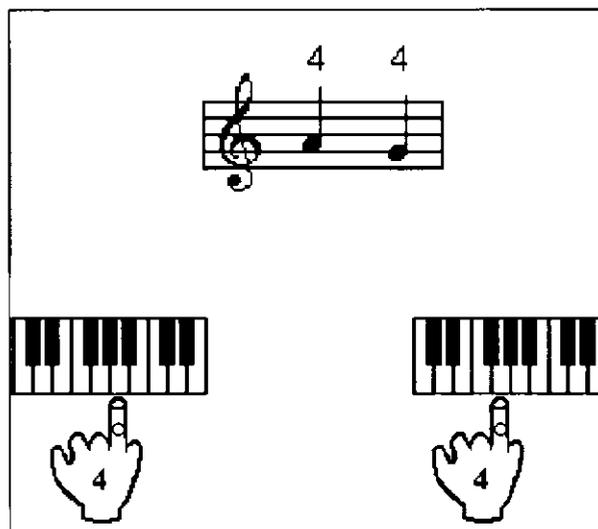


Figura 3.14. Exemplo de dedilhado igual e notas diferentes.

3.8.4 Notas iguais e outra direção de dedilhado

No caso de ocorrer notas iguais e com qualquer sentido de dedilhado, o peso usado para o cálculo do comprimento do dedilhado é menor, como mostrado na Equação 3.10. A Figura 3.15 mostra um exemplo deste tipo.

Equação 3.10. Comprimento do dedilhado com notas iguais.

$$C_{12} = |d2 - d1|$$

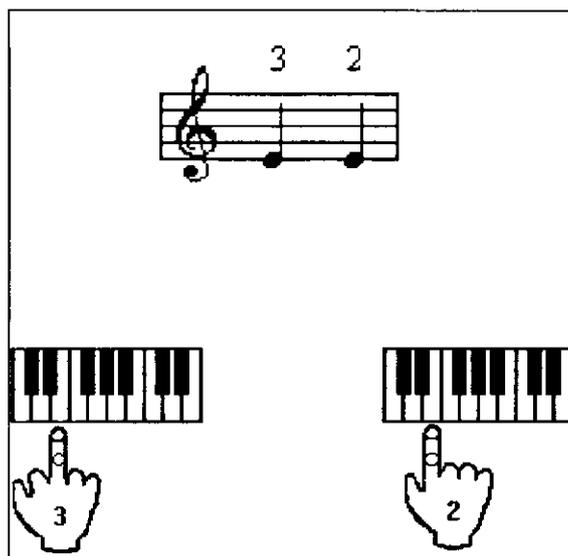


Figura 3.15. Exemplo de notas iguais e dedilhado diferente.

A Figura 3.16 mostra um trecho musical ascendente utilizado para exemplificar o cálculo do comprimento de uma melodia. Calculando-se C_{12} , C_{23} , C_{34} e C_{45} , tem-se:

$$\begin{aligned}
 C_{12} &= |2-0| + ||2-1|-1| + \text{limita} = 2; \\
 C_{23} &= |3-2| + ||3-2|-1| + \text{limita} = 1; \\
 C_{34} &= |4-3| + ||4-3|-1| + \text{limita} = 1; \\
 C_{45} &= |5-4| + ||5-4|-1| + \text{limita} = 1; \\
 C &= C_{12} + C_{23} + C_{34} + C_{45} = 5.
 \end{aligned}$$

Obtém-se comprimento igual a 5. Observe-se que a variável *limita* no exemplo da Figura 3.16 é sempre zero.

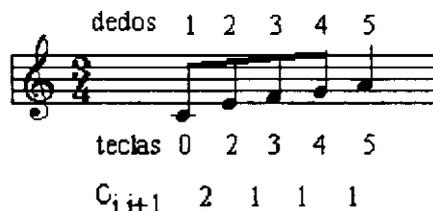


Figura 3.16. Exemplo do cálculo da distância de um trecho musical ascendente.

3.9 O Sistema Especialista implementado

Inicialmente como mostrado na Seção 3.5 (ver Figura 3.5), o SI escolhe se deve acionar o AG ou o SE. Para a escolha, o SI verifica a maior distância do contexto melódico (diferença entre a nota mais grave e a mais aguda). Se, esse valor for menor ou igual a 8, então o SI passa o controle para o SE. Se não for, o controle será

transferido para o AG como descrito na Seção 3.9

O SE, cuja arquitetura está descrita na seção 3.3, verifica se a melodia corresponde a uma regra. Caso afirmativo, o SE busca um dedilhado existente na base de dados das regras. Se o SE detectar que a seqüência melódica não é uma regra, o controle retorna ao SI que exibe uma mensagem ao usuário possibilitando que se use o AG para encontrar o dedilhado.

As regras implementadas no SE foram baseadas na escala de Dó maior, descrita na Tabela 2-1 e nos pentacordes ascendentes e descendentes descritos na Seção 3.6. Para verificar se uma seqüência melódica é um pentacorde ou uma escala, faz-se a soma de todos os intervalos entre as notas. Como a diferença entre um intervalo de 2^ª é igual a 1, então um pentacorde terá um comprimento total de 4. A escala terá comprimento igual a 7. O SE verifica também a seqüência das notas, para saber se a regra é ascendente ou descendente para a escolha do dedilhado.

Maiores detalhes sobre o SE, poderão ser encontrados no Apêndice A que versa sobre o *software* SIEDP.

Por exemplo, o SE gerará o dedilhado {1;2;3;1;2;3;4;5} caso o usuário entre com a seqüência melódica apresentada na Figura 3.17.



Figura 3.17. Exemplo de uma regra (escala maior ascendente).

3.10 O Algoritmo Genético implementado

Alguns pesquisadores têm utilizado variantes do AG com mais de uma população de cromossomos, por exemplo [TSUTSUI et al] que implementou um AG com duas populações. Também no SIEDP, utilizou-se um AG com duas populações de cromossomos. Uma População Principal (PP) onde são armazenados 50 cromossomos, e uma População dos Escolhidos (PE), onde são armazenados os 10 melhores dedilhados.

No AG implementado, cada posição do cromossomo (gene) representa um dedo que poderá ser utilizado na escolha do dedilhado ótimo. Só existe um operador genético, denominado troca, que opera diretamente sobre os genes dos cromossomos. A troca é efetuada mudando-se a posição de dois genes no cromossomo [NISSEN, 1994].

A cada geração, é criado um novo dedilhado copiando-se o dedilhado anterior e trocando-se randomicamente os valores inteiros do cromossomo através do operador troca. O cromossomo resultante é colocado numa locação aleatória da PP (operador seleção). A reprodução no AG geralmente é representada pelos cromossomos sobreviventes após cada geração. Na implementação atual, sobrevivem todos os cromossomos da PP e da PE após cada geração. O modo de parada do AG é atribuído de acordo com o número de notas da melodia. Para uma melodia com 6 notas, em que o AG pode representar até 720 (6!) cromossomos sem repetições de genes, atribuiu-se como critério de parada 500 gerações para o AG.

Os elementos da população são listas fixas de parâmetros a serem otimizadas baseadas numa determinada medida de desempenho ("fitness"). O AG implementado possui 5 componentes básicos: 1) Um método para codificação dos cromossomos (por exemplo, o conjunto representando a seqüência de dedilhado da mão direita {1;2;3;4;5}), onde os numerais representam genes; 2) Uma função objetivo "fitness"; 3) Uma população inicial; 4) Um operador para formar a evolução entre dois cromossomos de populações consecutivas (troca), que é usado entre as posições das espécies; 5) Parâmetros de trabalho (por exemplo, 2% de probabilidade de mudança no cromossomo) [GREFENSTETTE, 1986].

3.11 Resultados Obtidos

A seguir, utilizando o SIEDP, serão apresentados os resultados obtidos do cálculo do dedilhado ótimo de diversas melodias. O cálculo do dedilhado ótimo pode ser feito pelo SIEDP de uma forma automática ou supervisionada pelo usuário (ver Apêndice A).

3.11.1 Melodia com 5 notas

A Figura 3.18 mostra um exemplo de uma melodia {0;4;8;5;6} de 5 notas utilizada para o cálculo do dedilhado ótimo pelo módulo AG na forma supervisionada pelo usuário. O dedilhado ótimo da melodia é mostrado na parte inferior da Figura 3.18.



Figura 3.18. Exemplo de melodia de cinco notas.

A Figura 3.19 apresenta a tela do SIEDP ativada na opção **Genético** (ver Apêndice A). O usuário opcionalmente pode gerar uma sequência de dedos aleatórios com a opção **Dedos Base Aleatório**. Baseado no dedilhado inicial e nas 5 notas musicais, o SIEDP, após o usuário escolher a opção **Gera População Principal**, gerará a PP cujos elementos estão mostrados na Tabela 3.1. Quando o usuário escolhe a opção **Mutação**, é selecionado aleatoriamente um cromossomo da PE, e é feita uma troca de posições de dois genes do cromossomo. O usuário poderá escolher os 10 melhores cromossomos da (PP) para gerar a PE inicial usando a opção **Escolhe**.

A PE, mostrada na parte inferior da Figura 3.19, apresenta os cromossomos (CROM) numerados seqüencialmente (1ª coluna), com comprimento (COMP) crescente (2ª coluna). Neste exemplo, o cromossomo número 1 da PE é o ótimo, isto é, o cromossomo {1;2;5;3;4} representa o dedilhado com menor comprimento (COMP=15) para a geração inicial.

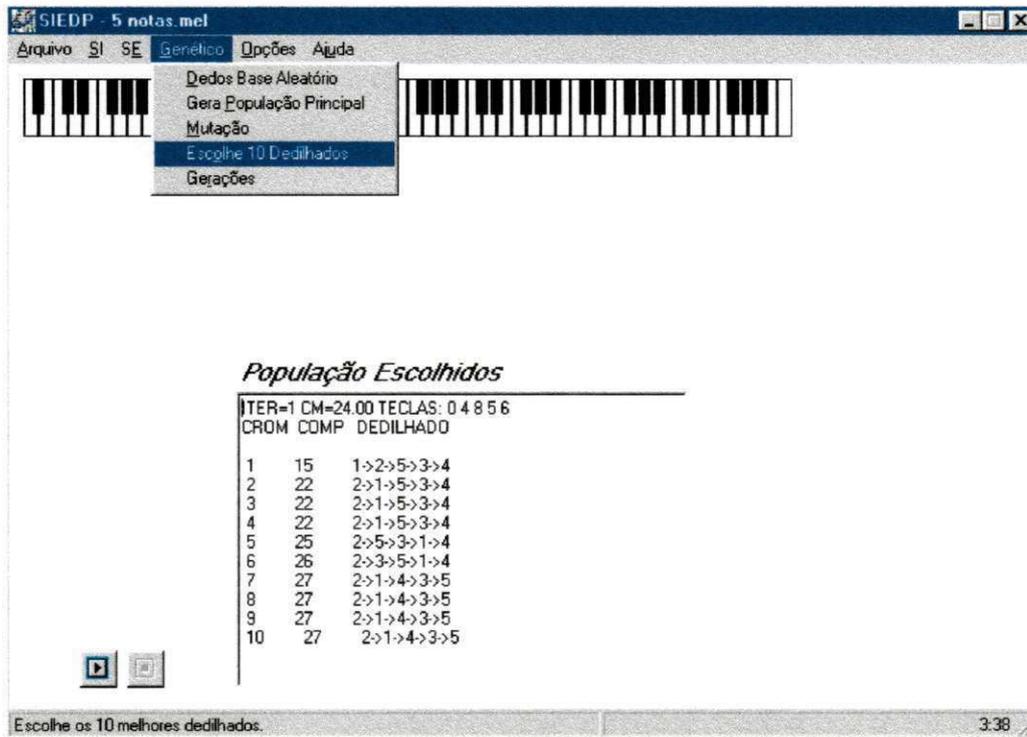


Figura 3.19. Tela do SIEDP com resultado da PE.

Tabela 3.1. Resultado da PP obtida do exemplo da Figura 3.19.

TECLAS: 0 4 8 5 6

CROM COMP DEDILHADO

1	31	1->2->3->4->5	18	37	3->5->4->2->1	35	36	1->5->2->3->4
2	30	2->1->3->4->5	19	39	2->5->4->3->1	36	33	2->5->1->3->4
3	30	2->1->3->4->5	20	39	2->5->4->3->1	37	33	2->5->1->3->4
4	33	3->1->2->4->5	21	35	2->4->5->3->1	38	39	2->4->1->3->5
5	32	3->1->2->5->4	22	22	2->1->5->3->4	39	27	2->1->4->3->5
6	46	3->2->1->5->4	23	35	5->1->2->3->4	40	27	2->1->4->3->5
7	35	5->2->1->3->4	24	32	3->1->2->5->4	41	27	2->1->4->3->5
8	15	1->2->5->3->4	25	26	3->1->5->2->4	42	30	2->1->4->5->3
9	36	4->2->5->3->1	26	22	2->1->5->3->4	43	27	2->1->4->3->5
10	36	4->2->5->3->1	27	26	2->3->5->1->4	44	27	2->1->4->3->5
11	36	4->2->5->3->1	28	25	2->5->3->1->4	45	27	2->1->4->3->5
12	46	4->5->2->3->1	29	26	2->3->5->1->4	46	27	2->1->4->3->5
13	46	4->5->2->3->1	30	22	2->1->5->3->4	47	39	2->4->1->3->5
14	46	4->5->2->3->1	31	29	4->1->5->3->2	48	37	3->4->1->2->5
15	37	4->5->3->2->1	32	29	4->1->5->3->2	49	48	3->4->1->5->2
16	46	4->5->2->3->1	33	42	4->5->1->3->2	50	47	2->4->1->5->3
17	37	4->5->3->2->1	34	38	1->5->4->3->2			

3.11.2 Melodia com 6 notas

Uma melodia de 6 notas, pode representar até 720 (6!) cromossomos sem repetições de genes. A Figura 3.20 mostra um exemplo de uma melodia com 6 notas. Na parte inferior da mesma figura são apresentados 3 dedilhados que podem ser considerados ótimos.

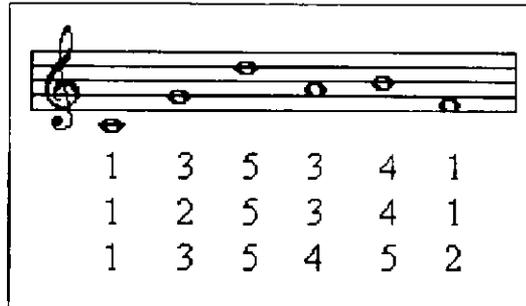


Figura 3.20. Exemplo de uma melodia com 6 notas.

Devido ao número de possibilidades, atribuiu-se um certo número de gerações (ITER=100) para o AG. Após o usuário escolher a opção **Gerações**, são criadas 100 PEs. A Tabela 3.2 mostra o resultado da escolha (Geração 40) dos dedilhados para o exemplo da Figura 3.20. Observou-se que os melhores resultados só começaram a aparecer a partir da iteração de número 40 e com o Comprimento Médio (CM) de 22,60. Definiu-se o CM como a soma dos comprimentos dos cromossomos das PEs dividido pelo número de cromossomos (10), como mostrado na Equação 3.11.

Equação 3.11. Cálculo do Comprimento Médio (CM).

$$CM = (\sum_{i=1}^{10} COMP_i) / 10$$

A Figura 3.21 mostra o gráfico da curva traçada utilizando o CM obtido nas 100 gerações. Observe-se que na primeira geração CM=35 e quando o número de gerações se aproxima da centésima, CM se aproxima do COMP ótimo do dedilhado (COMP=19).

Tabela 3.2. Resultado do exemplo da Figura 3.20

ITER=40 CM=22.60 TECLAS: 0 4 8 5 6 3		
CROM	COMP	DEDILHADO
1	19	1→3→5→4→5→2
2	22	1→3→5→4→2→1
3	22	1→3→5→4→2→1
4	22	1→3→5→4→2→1
5	22	1→3→5→4→2→1
6	23	1→2→5→4→3→3
7	24	2→2→5→3→4→1
8	24	2→2→5→3→4→1
9	24	2→2→5→3→4→1
10	24	2→2→5→3→4→1

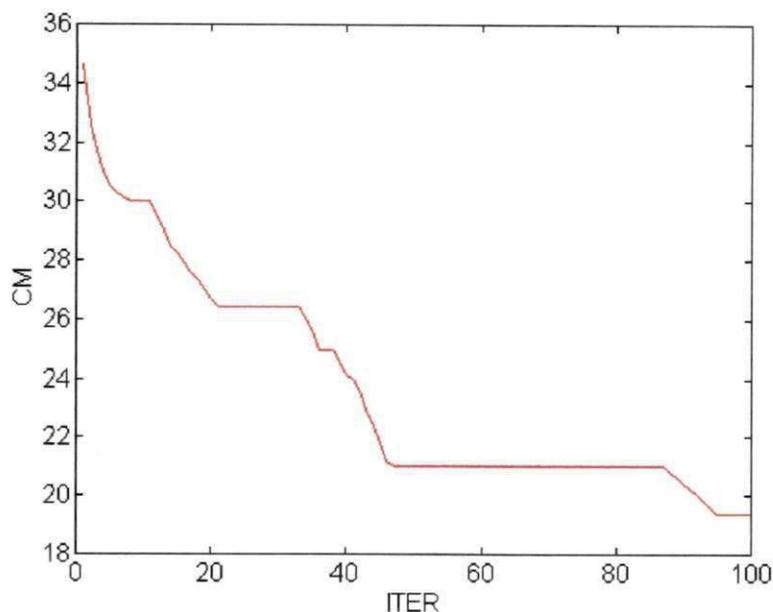


Figura 3.21. Curva CM X Iter para uma melodia de 6 notas.

3.11.3 Melodia com 7 notas

Uma melodia de 7 notas pode representar até 5040 (7!) cromossomos sem repetições de genes. A Figura 3.22, mostra um exemplo de uma melodia com 7 notas. Na parte inferior da figura pode ser visualizado o dedilhado ótimo.

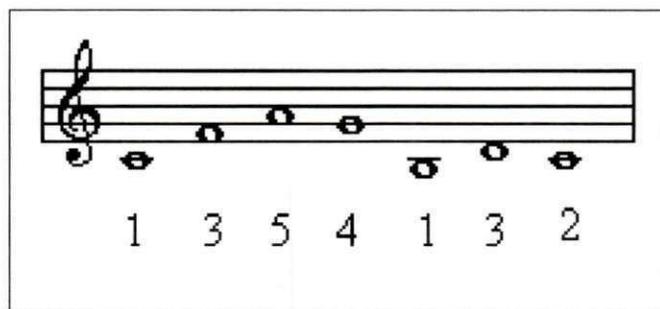


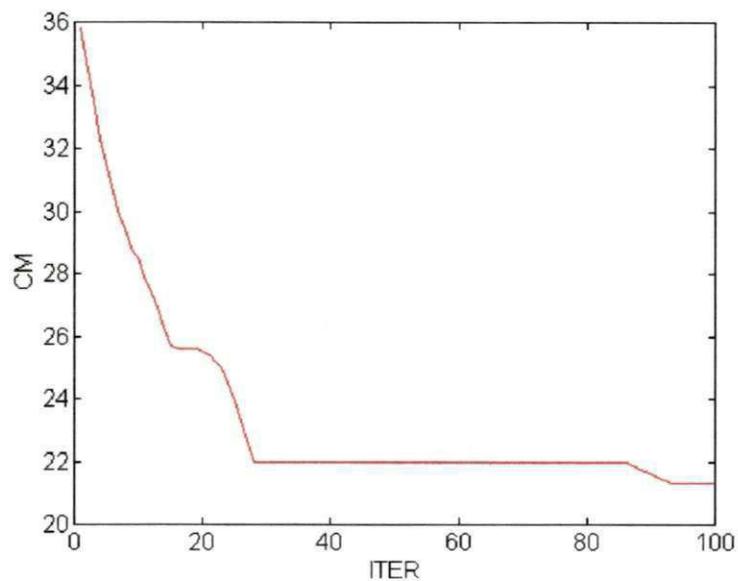
Figura 3.22. Exemplo de melodia com 7 notas.

A Tabela 3-3 mostra o resultado da escolha (Geração 87) dos dedilhados para o exemplo da Figura 3.22. Observou-se que os melhores resultados só começaram a aparecer a partir da iteração de número 87 e com CM de 21,90.

Tabela 3.3. Resultado para uma melodia de 7 notas.

ITER=87 CM=21.90 TECLAS: 0 3 6 4 -1 1 0		
CROM	COMP	DEDILHADO
1	21	1→3→5→4→1→3→2
2	22	1→2→5→3→1→4→3
3	22	1→2→5→3→1→4→3
4	22	1→2→5→3→1→4→3
5	22	1→2→5→3→1→4→3
6	22	1→2→5→3→1→4→3
7	22	1→2→5→3→1→4→3
8	22	1→2→5→3→1→4→3
9	22	1→2→5→3→1→4→3
10	22	3→3→5→4→1→2→1

A Figura 3.23 mostra o gráfico da curva traçada utilizando o CM obtido nas 100 gerações. Observe-se que na 87ª iteração CM=21,90 se aproxima do COMP ótimo do dedilhado (COMP=21).

**Figura 3.23. Curva CM X Iter para uma melodia de 7 notas.**

3.11.4 Melodia com 8 notas

Na melodia de 8 notas mostrada na Figura 3.24, podem ser representados até 40320 (8!) cromossomos. Observe-se na parte inferior da figura o dedilhado ótimo. Devido ao grande número de combinações, atribuiu-se 500 gerações para a execução do AG. Observou-se que os melhores resultados começaram a aparecer a partir da iteração

de número 472 e com CM de 29,70.

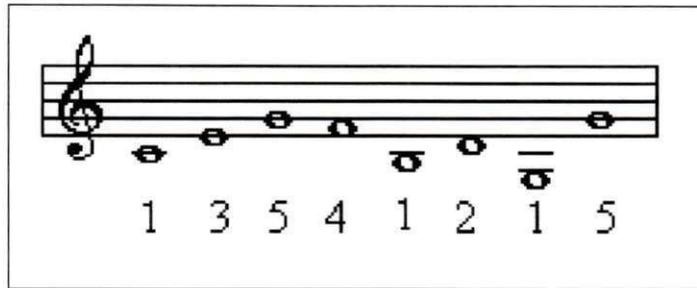


Figura 3.24. Exemplo de melodia com 8 notas.

Tabela 3.4. Resultado para uma melodia de 8 notas.

ITER=472 CM=29.70 TECLAS: 0 2 4 3 -1 1 -3 4		
CROM	COMP	DEDILHADO
1	29	1→4→5→5→1→2→1→3
2	29	1→4→5→5→1→2→1→3
3	29	1→4→5→5→1→2→1→3
4	29	1→4→5→3→1→2→1→5
5	29	1→4→5→3→1→2→1→5
6	29	1→3→5→4→1→2→1→5
7	30	1→3→5→5→1→2→1→4
8	31	1→2→5→4→1→3→1→5
9	31	1→2→5→4→1→3→1→5
10	31	1→4→5→2→1→3→1→5

Abaixo, na Figura 3.25 é visto o gráfico da relação Comprimento Médio X Iteração traçado utilizando os valores obtidos das 500 gerações. Observe-se que na 500ª iteração CM=29,70 e quando o número de iterações se aproxima da 500ª, CM se aproxima do COMP ótimo do dedilhado (COMP=29).

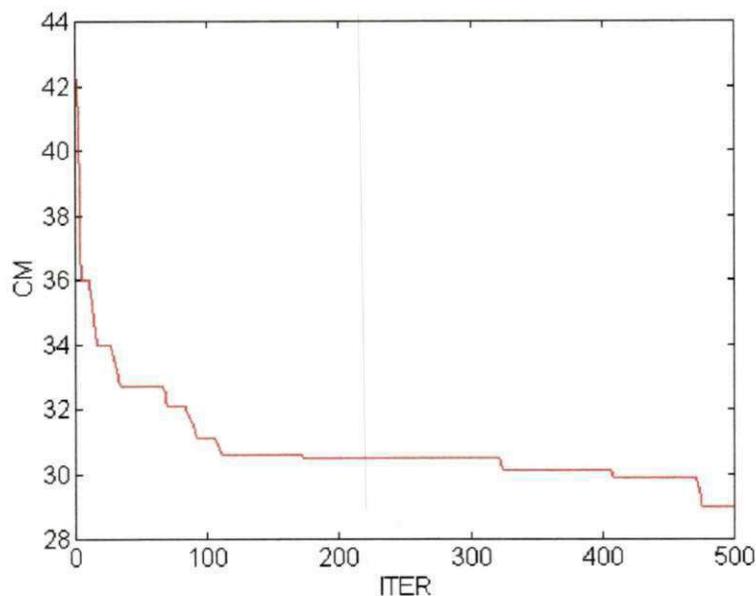


Figura 3.25. Curva CM X Iter para uma melodia de 8 notas.

3.12 Conclusões

Neste capítulo foi feita uma sucinta descrição das ferramentas de *software*, Sistemas Especialistas e Algoritmo Genético. Mostrou-se como essas ferramentas foram utilizadas no SIEDP. Descreveu-se o cálculo do comprimento do dedilhado de uma frase musical. Por último foram apresentados resultados experimentais do SIEDP obtidos da análise de melodias com 5, 6, 7 e 8 notas. O próximo capítulo descreve a mão robótica desenvolvida para mostrar na prática o dedilhado de uma frase musical para piano.

4. A Mão Robótica

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado um sucinto resumo sobre a robótica, e os avanços das pesquisas feitas na construção de robôs músicos. A seguir descreve-se a construção de uma mão robótica, utilizada pelo Sistema Inteligente para o ensino do dedilhado pianístico. A mão robótica executa melodias de piano num teclado musical. Por último, serão apresentados alguns detalhes do *software* que controla a mão robótica implementado para a execução das melodias musicais.

4.2 A Robótica

O termo “robô” surgiu pela primeira vez quando Karel Capek imaginou uma pessoa mecânica ou artificial e resolveu encenar uma peça intitulada *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)* em Praga no ano de 1921. Na peça de Capek, robôs representavam pessoas que foram fabricadas artificialmente. Os robôs eram trabalhadores mas sem emoção [SALANT, 1990].

4.2.1 O que é um robô?

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

4.2.2 Partes de um manipulador robótico

Os manipuladores robóticos possuem três partes principais: uma base fixa, um braço articulado, e uma unidade de controle. Os manipuladores robóticos são freqüentemente descritos como tendo um certo número de *graus de liberdade*, que é o número de variáveis que podem ser modificadas de modo a alterar a posição de um manipulador robótico .

4.2.3 Base Fixa

A base fixa consiste normalmente em um pedestal preso ao chão, mas que também pode estar presa às paredes ou ao teto, ou montada em outra máquina ou mesmo sobre uma plataforma móvel.

4.2.4 Braço Articulado

O braço articulado é formado por várias partes: elos, juntas, atuadores de juntas, sensores de posição de juntas, punho e órgão terminal (a “mão” do robô).

- Elos são as partes rígidas de um braço de robô, comparáveis aos ossos do braço de uma pessoa.

- Juntas são as partes do braço de um robô que permitem uma conexão móvel entre dois elos. As juntas podem ser de dois tipos: deslizantes e rotativas. As juntas deslizantes movem-se em linha reta, sem girar. As juntas rotativas giram em torno de uma linha imaginária estacionária chamada eixo de rotação.

- Um atuador é uma versão mecânica de um músculo. Ele produz movimento quando recebe um sinal de entrada. Atuadores são chamados rotacionais ou lineares, dependendo se eles produzem um movimento giratório ou em linha reta. Os três principais tipos de atuadores são: eletromecânicos (acionados por motores elétricos), hidráulicos (acionados por líquidos comprimidos) e pneumáticos (acionados por gases comprimidos).

- Os sensores de posição de juntas são freqüentemente chamados codificadores rotacionais ou lineares, porque codificam informações sobre as posições das juntas em uma forma que pode ser facilmente enviada como sinais ao controlador do robô.

- O punho é o nome dado às três últimas juntas do robô. Estas são sempre rotacionais, e seus eixos de rotação são mutuamente perpendiculares.

- Os órgãos terminais podem ser classificados em dois grandes grupos denominados garras e ferramentas especializadas. Robôs usam garras para mover objetos e usam ferramentas especializadas para fazer tarefas especiais.

4.2.5 Unidade de Controle

A unidade de controle representa o "cérebro" do robô. Ela recebe sinais de entrada dos sensores do robô e transmite sinais de saída para os atuadores do robô. Há dois tipos de sistemas de controle de robôs: malha aberta e malha fechada. No sistema de malha fechada, depois que o controlador envia sinais ao atuador para mover o manipulador, um sensor no manipulador retorna um sinal ao controlador, fechando a malha controlador-atuador-manipulador-sensor-controlador. A Figura 4.1 mostra um esquema de controle do tipo malha fechada.

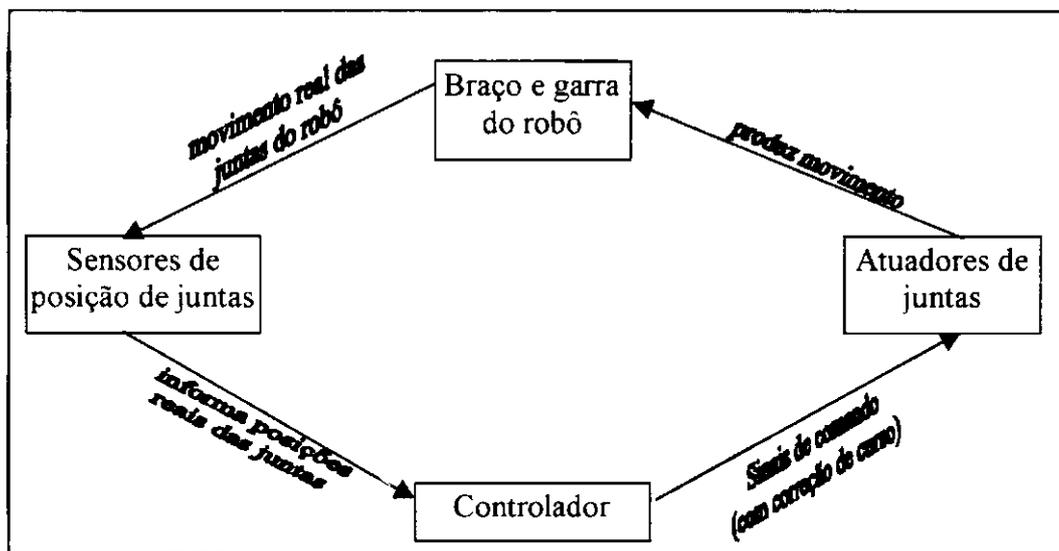


Figura 4.1. Controle em Malha Fechada.

No esquema do tipo malha aberta da Figura 4.2, não há sensor que meça como o manipulador realmente se moveu em resposta aos sinais enviados para os atuadores, e consequentemente não há sinais de realimentação do manipulador para o controlador. A "malha de controle" é aberta, indo do controlador para o atuador e deste para o manipulador. Portanto não há maneira de se saber a posição atual do manipulador. Tudo o que se sabe é onde ele deveria estar e não se ele realmente chegou lá.

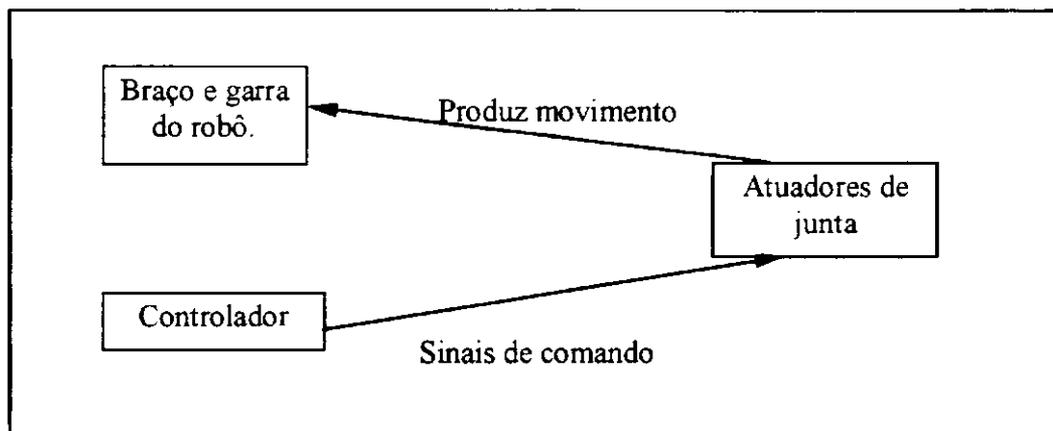


Figura 4.2. Controle em Malha Aberta.

4.3 Robôs músicos

A Figura 4.3 mostra o que há de mais avançado em termos de robôs musicais. O WABOT, desenvolvido pelos japoneses [ROADS, 1996] é capaz de ler uma partitura, acompanhar um cantor, e mesmo que o cantor atrase o tempo da música ou desafine, ele é capaz de seguir tudo o que o cantor está fazendo. Reconhece o pedido do requisitante apenas em japonês.

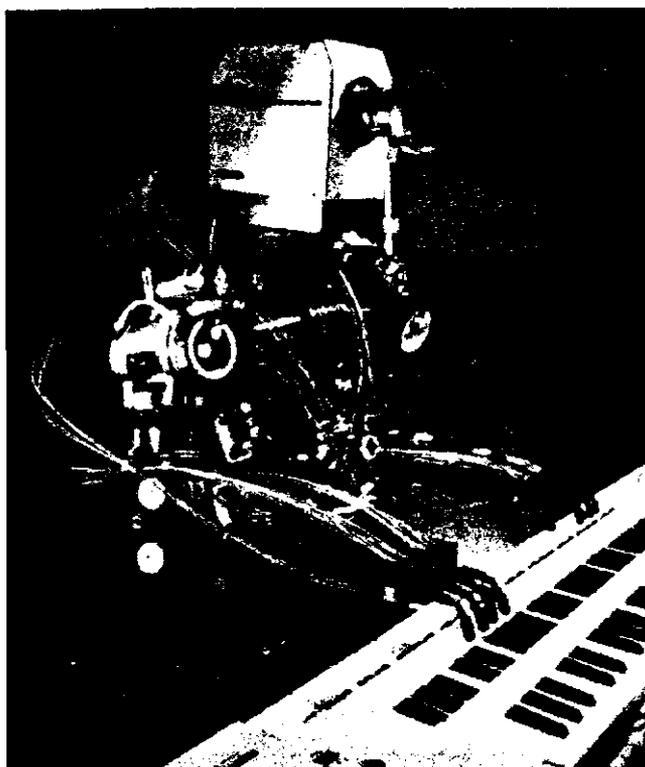


Figura 4.3. WABOT – Robô pianista.

Os robôs desenvolvidos pela Universidade de Eletrocomunicações de Tóquio [KAJITANI, 1998], são capazes de executar partituras clássicas gravadas nos seus programas em violinos e violoncelos. A Figura 4.4 mostra um desses robôs, atuando em um violoncelo.

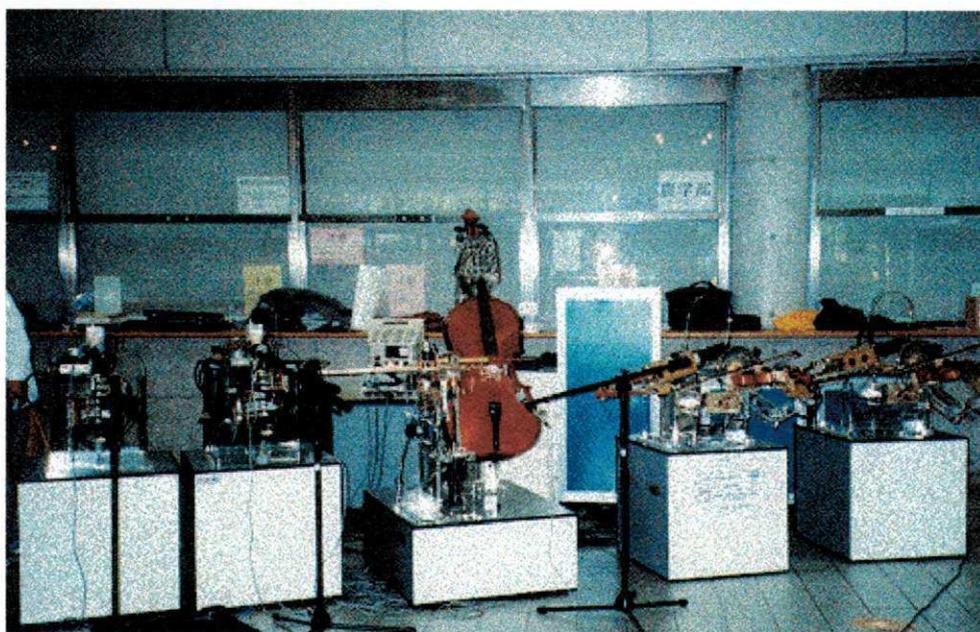


Figura 4.4. MUBOT. Robô Músico. (Violoncello)

Na Figura 4.5 o MUBOT [KAJITANI, 1998] aparece tocando um violino. Uma grande desvantagem do MUBOT na execução de instrumentos musicais de cordas friccionadas é que ele possui pouca habilidade para tocar uma melodia afinada.

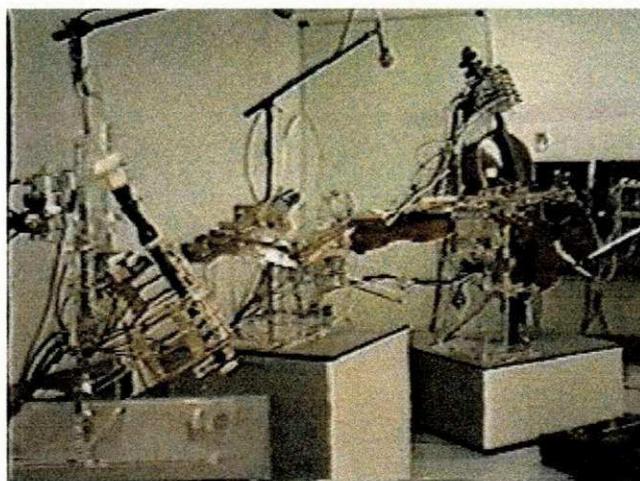


Figura 4.5. MUBOT. Robô Músico. (Violino)

4.4 O Robô Desenvolvido para o Sistema Inteligente

Desenvolveu-se um robô, uma mão artificial com cinco dedos, para a execução das melodias num teclado musical [VIANA, 1998b]. O robô foi montado sobre uma base de uma impressora matricial de 133 colunas como mostrado na Figura 4.6.

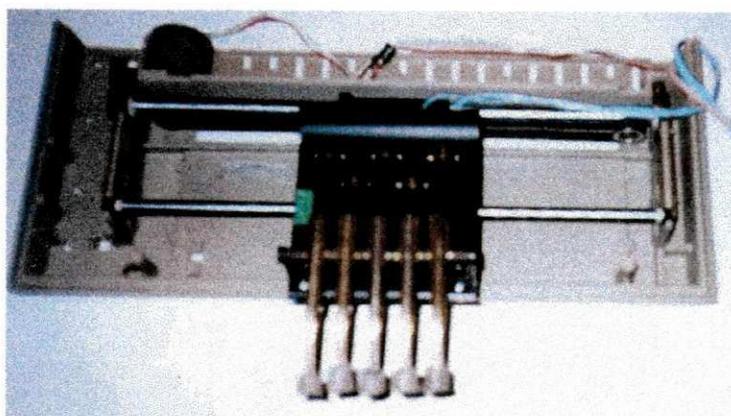


Figura 4.6. Foto da mão robótica.

A Figura 4.7 apresenta o esquema da montagem da mão robótica. O robô possui seis motores: cinco motores de corrente contínua (cc) que atuam no movimento dos dedos e um motor de passo para mover horizontalmente a mão sobre o teclado. A mão robótica é controlada por um microcomputador IBM PC (bloco PC). A interface paralela do microcomputador é utilizada para levar os sinais de controle usados para acionar os motores da mão robótica.

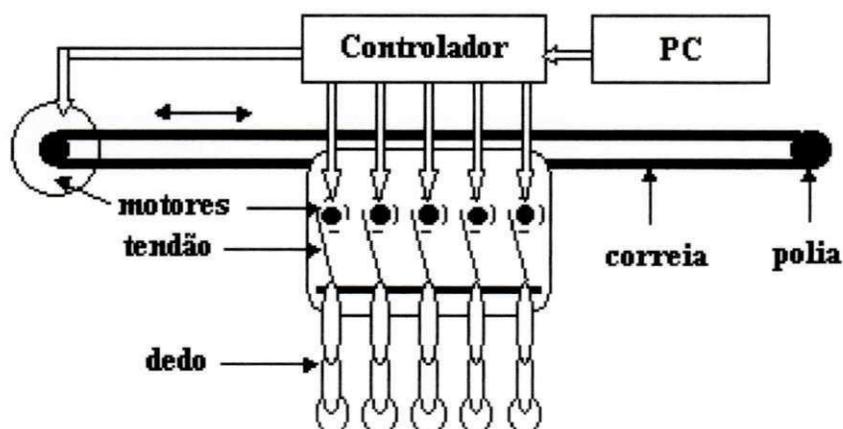


Figura 4.7. Detalhes mecânicos da mão.

O circuito de controle (controlador) aciona os 5 motores de corrente contínua que movem os dedos, e controla o posicionamento da mão que é feito com um motor de passo.

O motor de passo foi escolhido para movimentar a mão artificial, devido a simplicidade de controle e a facilidade de posicionamento. O rotor do motor de passo assume posições angulares discretas quando aplicada uma excitação em forma de pulsos. Isto é, para cada instante o rotor assume posições angulares bem definidas em torno do seu eixo de rotação. Dessa forma, sua velocidade angular oscila entre um máximo, na mudança de posição, e um mínimo (normalmente zero) quando se encontra na posição definida. A Figura 4.8 apresenta o esquema de um motor de passo genérico de quatro fases.

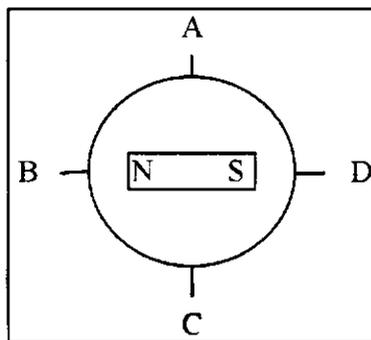


Figura 4.8. Um motor de passo de ímãs permanentes de 4 fases.

No modo de acionamento normal, o rotor se posiciona exatamente sobre o local designado para cada passo, percorrendo quatro passos por ciclo. A seqüência de acionamento pode ser obtida excitando-se uma fase por vez. Na Figura 4.9, mostrada a seguir, é exemplificado este modo de acionamento. O Relógio da figura abaixo tem um período de 5ms.

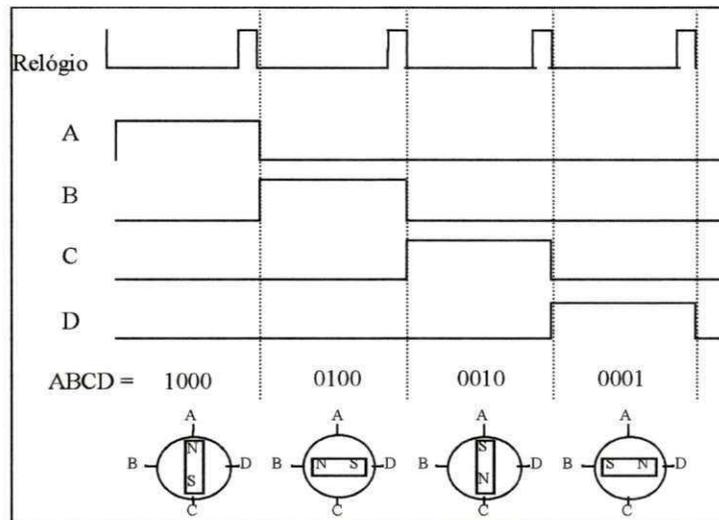


Figura 4.9. Acionamento no qual se excita apenas uma fase por vez.

Os motores de Corrente Contínua (cc) à ímã permanente são utilizados para a percussão das teclas no sintetizador (movimento dos dedos). O motor cc funciona no modo “on-off” com a aplicação da tensão de 12V na armadura. Durante a percussão, a cada 5ms, o motor cc é acionado e passa a girar em sentido anti-horário, fazendo girar o cabo de ligação (tendão) ao dedo artificial. Ao ser desativado o motor cc, aplicando-se 0V na sua armadura, o dedo artificial volta a sua posição de repouso, através de um mecanismo de molas preso a parte posterior do dedo. A Figura 4.10 mostra este mecanismo.

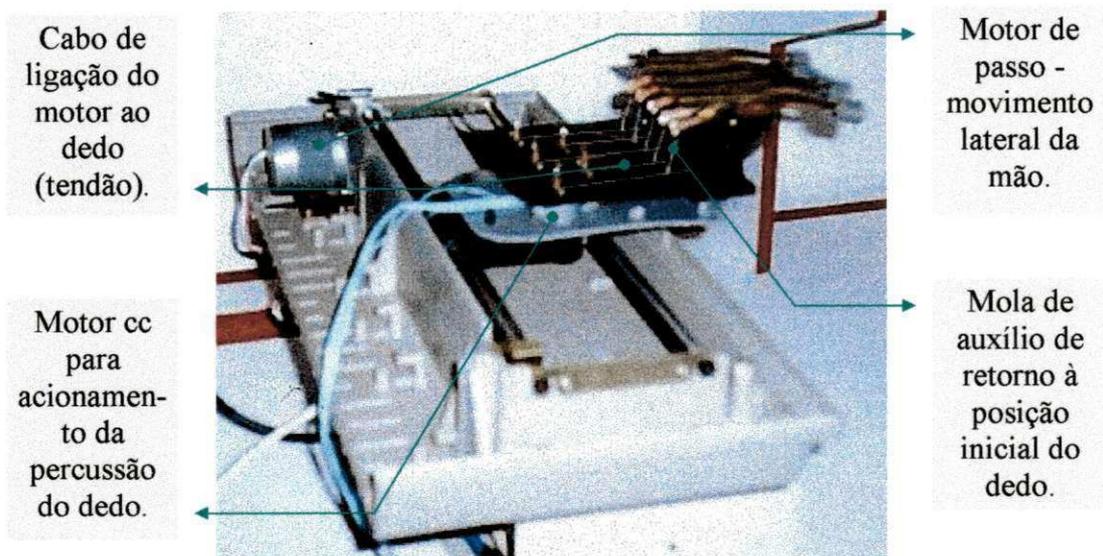


Figura 4.10. Mecanismos de acionamento da mão robótica.

O controlador, cujo diagrama é mostrado na Figura 4.11, possui 4 conjuntos de circuitos desenvolvidos para controle de até quatro motores de passo simultaneamente. O motor de passo usa 4 fios (A, B, C e D), cada fio corresponde uma fase.

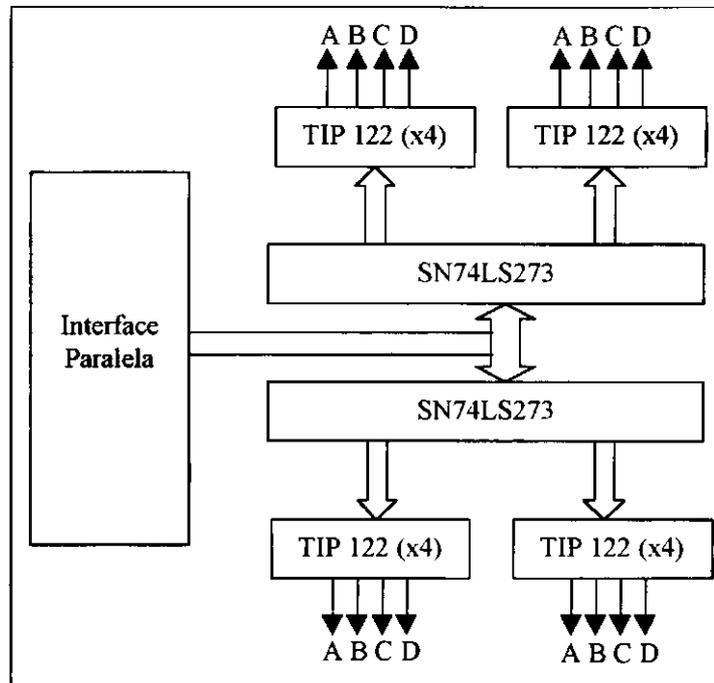


Figura 4.11. Circuito de acionamento do robô.

Existem 2 circuitos integrados SN74LS273 (registrador de deslocamento e paralelo de 8 bits) usados para acionamento do motor de passo que é o responsável direto pelo movimento de posicionamento da mão para a direita ou esquerda ao longo do teclado. Os registradores SN74LS273 são selecionados através dos seus pinos de *clock*. Cada conjunto de 4 transistores TIP 122, controlados pelos SN74LS273, é encarregado do acionamento das 4 fases do motor de passo. Observe-se que cada acionador de um motor de passo pode acionar, numa só direção, quatro motores de corrente contínua. Assim, utilizou-se mais dois conjuntos de acionamento de motores de passo, para se acionar os dedos da mão robótica. O retorno dos dedos à posição de repouso é feito com a inércia da própria tecla do piano, auxiliado por um mecanismo de molas. (Ver a Figura 4.10).

4.5 Escalonamento das Tarefas

O controle e posicionamento dos manipuladores devem ser feitos em tempo real. Desenvolveu-se um Escalonador em Tempo Real (ETR) (Ver Apêndice B) para acionamento das tarefas dos motores. A Tabela 4.1 mostra as tarefas básicas desenvolvidas para o controle de posição dos motores dos dedos e da mão.

Tabela 4.1. Lista de Tarefas.

NÚMERO	NOME	DESCRIÇÃO
1	Motor1	Gira o motor base mão
2	dedo1	Gira o motor dedo 1
3	dedo2	Gira o motor dedo 2
4	dedo3	Gira o motor dedo 3
5	dedo4	Gira o motor dedo 4
6	dedo5	Gira o motor dedo 5

Para cada um dos dedos da mão e para a mão é associada uma tarefa em tempo real. À execução de cada nota da melodia é associada uma tarefa que se encarrega do acionamento do motor que move o dedo, do tempo de acionamento do motor e do tempo entre as notas. Suponha-se que a mão robótica tenha que executar a melodia mostrada na Figura 4.12:



Figura 4.12. Exemplo de melodia a ser executada pelo robô.

As tarefas de execução dessa melodia são vistas logo abaixo na Figura 4.13. Supondo que a mão robótica encontra-se na posição com o polegar sobre a primeira nota (dó central), a primeira e a segunda notas estão logo abaixo dos dedos necessários para a execução das notas (dó e mi), não havendo necessidade de movimentar a mão para execução das duas primeiras notas.

As tarefas são acionadas sequencialmente. A primeira tarefa acionada é a *tecla1()* (tarefa 11) que é composta de três outras tarefas: a primeira (*dedo1()*) se encarrega de posicionar o polegar, a segunda define o intervalo de tempo (30ms) da

execução da nota (*parada*(9, 0, 30, 0)), a terceira tarefa se encarrega (*repete*(12, 0, *seminima*, 0)) do intervalo de tempo (*seminima*=500ms) para acionamento da *tecla2*() (tarefa12).

A segunda tarefa *tecla2*() (tarefa 12) é semelhante à tarefa 11, possui as tarefas para posicionar o dedo médio durante 30ms e tempo de espera para acionamento da tarefa *moveright*() de 500ms.

A terceira tarefa (tarefa 13) *moveright*(), ativa o motor de passo para movimentar a mão para a posição do dedo mínimo sobre o dó. A primeira tarefa (*repete*(1, 0, 2, 2)) ativa a seqüência de acionamento do motor de passo. Após um tempo de 500ms representado pela tarefa *repete*(9, 0, *seminima*, 0), o motor é desativado e usando *repete*(14, 0, *seminima*, 0) é acionada a última tarefa *tecla3*().

Por último é acionada a tarefa 14, para executar a nota dó e terminar a melodia.

```
void tecla1(void) //Tarefa de execução de uma tecla. Tarefa 11
{
  dedo1(); //Dedo da nota dó central.
  parada(9, 0, 30, 0); //Para o acionamento do dedo 1
  repete(12, 0, seminima, 0); // Próxima Tarefa (Valor em milisegundos)
}
void tecla2(void) //Tarefa 12
{
  dedo3(); //Dedo da nota mi
  parada(9, 0, 30, 0);
  repete(13, 0, seminima, 0);
}
void moveright(void) //Tarefa mover mão para a direita. Tarefa 13
{
  repete(1, 0, 2, 2);
  repete(9, 0, seminima, 0); //Chama tarefa de parar o motor
  repete(14, 0, seminima, 0);
}
void tecla3(void) //Tarefa 14
{
  dedo5(); //Dedo do dó
  parada(9, 0, 30, 0);
}
```

Figura 4.13. Tarefas da melodia da Figura 4.12.

4.6 Conclusões

Neste capítulo abordamos a construção de uma mão robótica para a execução das melodias para piano. A mão robótica foi construída com material de equipamentos já em desuso do próprio NEUROLAB tais como: bases de impressoras, motores de passo, etc., resultando num projeto de custo extremamente baixo. Pela sua simplicidade, verificou-se que o sistema proposto pode ser implementado a custo acessíveis, os quais podem ser menores ainda se o sistema for produzido em larga escala. Foi implementado um Executivo em Tempo Real (Apêndice B) para o acionamento das tarefas, ou seja, execução das melodias, e para o movimento da mão para a direita ou esquerda do teclado.

5. Conclusões

5.1 Conclusões Finais

Nesta dissertação apresentou-se a descrição e implementação de um Sistema Inteligente desenvolvido para se encontrar um dedilhado pianístico ótimo de um trecho melódico musical, e que tem por finalidade o apoio ao ensino de piano. O SI é capaz de mostrar a execução de um dedilhado por meio de animação gráfica na tela de um micro-computador e emitindo a melodia através da sua saída MIDI, ou através de uma mão robótica que executa o trecho melódico num sintetizador. A mão robótica complementa o treinamento do aluno com a saída MIDI. Ela faz com que o ensino do dedilhado seja mais dinâmico, pois o mesmo pode ser visto de forma real.

Existem no mercado alguns softwares que se propõem ao auxílio na área músico-computacional. Dentre eles, o *Expert Piano* [Glanzmann, 1995] propõe-se ao ensino do piano, mas voltado para o aprendizado da obra musical como um todo não havendo nenhuma relação direta com o ensino do dedilhado pianístico.

A principal contribuição deste trabalho está justamente no desenvolvimento de uma ferramenta capaz de auxiliar o aluno no aprendizado do dedilhado pianístico. Além disso, espera-se que esta ferramenta incentive o aluno de piano, pois a aprendizagem do dedilhado por ser monótona durante seus primeiros anos, faz com que o aluno se sinta desinteressado pela prática do instrumento. Desta forma procurou-se desenvolver uma ferramenta que auxilie a aprendizagem do dedilhado pianístico, e que desenvolva no aluno, o interesse pela prática do piano. Neste período, os professores mais qualificados, despendem grande parte do seu tempo ensinando a técnica de dedilhado, tempo que poderia ser melhor utilizado no ensino de interpretação e técnicas em obras musicais mais complexas à alunos mais experientes.

O SIEDP, usando o AG, está sendo aplicado para encontrar o melhor dedilhado para seqüência melódica de 5, 6, 7 e 8 notas. A mão robótica executa num sintetizador (teclado musical) o trecho melódico, podendo ser usada pelos alunos de piano para ajudar na visualização do movimento da mão, mostrando todas as passagens de dedos

necessárias nos locais indicados pelo algoritmo, o que torna mais prático a execução desse instrumento que até hoje se coloca na posição de um dos mais complexos de todos os instrumentos musicais.

Os alunos de piano, durante a fase inicial de seus estudos, necessitam da presença constante do professor para que o mesmo não cometa erros e não adquira vícios mecânicos de dedilhado. O dedilhado errado contribui para a aquisição de vícios mecânicos, o que faz com que a duração da aprendizagem da música aumente, além de causar tensões musculares no aluno. Como cada aluno possui características singulares, apenas um aluno por hora para cada professor é o ideal para se obter uma melhor aprendizagem musical.

Pensando nos alunos e nos professores, tem-se como principal contribuição desta dissertação a ajuda que o SIEDP (Sistema Inteligente para o Ensino do Dedilhado Pianístico) dará aos alunos de piano durante a fase de aprendizagem do instrumento, bem como a consequente oportunidade criada para que outros alunos possam estudar, o que antes não era possível pela indisponibilidade de tempo.

Espera-se que isso seja um incentivo para os alunos de piano, uma vez que o dedilhado complicado e confuso só iria prejudicar o seu desenvolvimento e consequentemente haveria um maior desinteresse na prática do instrumento.

Uma outra contribuição desta dissertação refere-se ao fato de que, com o protótipo do Sistema Inteligente para o Ensino do Dedilhado Pianístico (SIEDP), consegue-se visualizar na prática, vários conceitos e funcionalidades de um sistema inteligente, antes só descritos na literatura especializada.

5.2 Trabalhos Futuros

Como perspectiva de trabalhos futuros, temos o melhoramento do *software* para que seja possível encontrar o melhor dedilhado pianístico de um trecho melódico que inclua teclas pretas, e assim permitir que se encontre o dedilhado de uma peça musical completa para piano. Utilizando o conceito de frases musicais, é possível segmentar toda a música e utilizar o SIEDP para encontrar o dedilhado das frases musicais isoladamente. Também poderá ser construído uma segunda mão (esquerda) para o

acompanhamento das melodias e a adaptação da mão existente para tocar as teclas pretas.

As facilidades que as Redes Neurais Artificiais trazem no reconhecimento de padrões, poderão ser aproveitadas para encontrar as melhores dinâmicas das notas de uma melodia. Um outro grande avanço em pesquisa que poderá melhorar o presente sistema proposto, é a utilização de um sistema de visão para reconhecimento de uma partitura musical. Assim, o robô poderá ler uma partitura e a partir daí fazer a atribuição de todos os dedilhados da obra musical e posteriormente executá-la.

Bibliografia

- [ANDRADE, 1997] ANDRADE, Patrícia Santos. **SISTEMAS HÍBRIDOS NEUROSIMBÓLICOS, ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO**. Dissertação de Mestrado. COPIN, UFPB, 1997.
- [ANTSAKLIS, 1994] ANTSAKLIS, Panos. **DEFINING INTELLIGENT CONTROL**. Report of the Task Force on Intelligent Control. IEEE Control Systems Society. Proceedings of the 1994 IEEE International Symposium on Intelligent Control. 16-18 August 1994. Holiday Inn Crowne Plaza. Columbus, Ohio, USA.
- [BENNETT, 1990] BENNETT, Roy. **COMO LER UMA PARTITURA**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1990.
- [BENNETT, 1988] BENNETT, Roy. **FORMA E ESTRUTURA NA MÚSICA**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1988.
- [CHORAFAS, 1988] CHORAFAS, Dimitris N. **SISTEMAS ESPECIALISTAS: APLICAÇÕES COMERCIAIS**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.
- [CLARKE, 1997] CLARKE, Eric; SLOBODA, John; PARNCUTT, Richard. **PIANISTS ON FINGERING: AN INTERVIEW STUDY**. Department of Music, University of Sheffield. Department of Psychology, University of Keele. 1997.
- [CMJ, 1996a]. Computer Music Journal. **20TH ANNIVERSARY ISSUE: THE STATE OF THE ART**. Volume 20, Number 1. MIT Press, 1996.
- [CMJ, 1996b]. Computer Music Journal. **BRINGING DIGITAL MUSIC TO LIFE**. Volume 20, Number 2. MIT Press, 1996.
- [CMJ, 1996c]. Computer Music Journal. **THE SEARCH FOR MUSICAL CONSTRUCTS**. Volume 20, Number 3. MIT Press, 1996.
- [CMJ, 1996d]. Computer Music Journal. **ACCOMPLISHMENTS AND CHALLENGES**. Volume 20, Number 4. MIT Press, 1996.
- [CMJ, 1997a]. Computer Music Journal. Volume 21, Number 1. MIT Press, 1997.
- [CMJ, 1997b]. Computer Music Journal. **SYNTHESIS AND TRANSFORMATION**. Volume 21, Number 2. MIT Press, 1997.

- [CMJ, 1997c]. Computer Music Journal. **MACHINE LANGUAGES: NYQUIST**. Volume 21, Number 3. MIT Press, 1997.
- [CMJ, 1997d]. Computer Music Journal. **MODELING ANALOG SYNTHESIS**. Volume 21, Number 4. MIT Press, 1997.
- [CRAIG, 1986] CRAIG, J. J. **INTRODUCTION TO ROBOTICS, MECHANICS & CONTROL**, Addison Wesley Pub. Comp., USA, 1986.
- [DESAIN & HONING] DESAIN, Peter & HONING, Henkjan. **MUSIC, MIND, MACHINE. Computational Modeling of Temporal Structure in Musical Knowledge and Music Cognition**. Research proposal (unpublished manuscript). <http://www.nici.kun.nl/mmm/index.html>
- [DOBRIAN, 1993] DOBRIAN, Chris. **MUSIC AND ARTIFICIAL INTELLIGENTE**. <http://www.arts.uci.edu/dobrian/CD.music.ai.htm>
- [FIELDEN, 1949] FIELDEN, Thomas Macmillan. **THE SCIENCE OF PIANOFORTE TECHNIQUE**. Limited St. Martins Street, London, 1949.
- [GÁT, 1965] GÁT, József. **THE TECHNIQUE OF PIANO PLAYING**. Collet's Holding Ltd. London – Corvina, Budapeste, 1965. Third Edition.
- [GIARRATANO, 1989] GIARRATANO, Joseph C. Gary Riley. **EXPERT SYSTEMS: PRINCIPLES AND PROGRAMMING**
- [GLANZMANN, 1995] GLANZMANN, José Honório. **EXPERT PIANO: UM AMBIENTE DE AUXÍLIO À APRENDIZAGEM MUSICAL**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRN. Rio de Janeiro, 1995.
- [GUIMARÃES, 1990]. GUIMARÃES, Mário Catão. **HARMONIA TEÓRICA E PRÁTICA PELA TEORIA DOS CONJUNTOS**. Belo Horizonte – MG: Oficina de Livros, 1990.
- [GREFENSTETTE, 1986]. Grefenstette, J. J. **OPTIMIZATION OF CONTROL PARAMETERS FOR GENETIC ALGORITHMS**. IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-16, no.1, pp. 122-128, 1986.
- [GROVE, 1994]. **DICIONÁRIO GROVE DE MÚSICA**. Jorge Zahar Ed., 1994.
- [HOLLAND, 1992] HOLLAND, John H. **ADAPTATION IN NATURAL AND ARTIFICIAL SYSTEMS: AN INTRODUCTION ANALYSIS WITH APPLICATIONS TO BIOLOGY, CONTROL, AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**. MIT, 1992.

- [HOLZNER, 1995] HOLZNER, Steven. **PROGRAMANDO EM VISUAL C++**. São Paulo: Berkley, 1995.
- [HOWARD, 1991] HOWARD, John. **APRENDENDO A COMPOR**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1991.
- [IBPI, 1993] Instituto Brasileiro de Pesquisa e Informática. **DOMINANDO A LINGUAGEM C**. IBPI, 1993.
- [JOHN, 1995] JOHN, Robet. **INTELLIGENT SYSTEMS**. <http://www.cms.dmu.ac.uk/People/rij/intell.html>. De Montfort University (DMU). United Kingdom 1995.
- [KAJITANI, 1998]. **KAJITANI LAB**. www.kajitani.mce.uec.ac.jp/mubot. Japan, 1998.
- [KAPLAN, 1987] KAPLAN, José Alberto. **TEORIA DA APRENDIZAGEM PLANÍSTICA**. Ed. Musas, 1987.
- [KOVÁCS, 1997] KOVÁCS, Zsolt Lászio. **O CÉREBRO E A SUA MENTE: UMA INTRODUÇÃO À NEUROCIÊNCIA COMPUTACIONAL**. São Paulo: Edição Acadêmica, 1997.
- [KÓVACS, 1996] KÓVACS, Zsolt Lászio. **REDES NEURAIS ARTIFICIAIS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. Edição Acadêmica, São Paulo: 1996.
- [LAROUSSE, 1964] **ENCICLOPÉDIA DELTA LAROUSSE**. Volume IX 2ª edição. Editora Delta S.A: Rio de Janeiro, 1964
- [LEVINE, 1988] LEVINE, Robert I.; Diane E. Drang.; Barry Edelson. **INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS ESPECIALISTAS**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.
- [LIU & LAYLAND, 1973]. Liu, C. L. and Layland J. W. **SCHEDULING ALGORITHMS FOR MULTIPROGRAMMING IN HARD REAL TIME ENVIRONMENTS**. JACM Vol. 20 No. 1 (Jan. 1973) pp 46-61.
- [MESSICK, 1998] MESSICK, Paul. **MAXIMUM MIDI: MUSIC APPLICATIONS IN C++**. Manning Publications Co. 1998.
- [MIZRAHI, 1990] MIZRAHI, Victorine Viviane. **TREINAMENTO EM LINGUAGEM C CURSO COMPLETO MÓDULO 1**. São Paulo – SP: McGRAW-HILL, 1990.
- [MORGAN, 1993] MORGAN Kaufmann Publishers, **FUNDATIONS OF GENETIC ALGORITHMS 2**.

- [NISSSEN, 1994].NISSSEN, Volker. **SOLVING THE QUADRATIC ASSIGNMENT PROBLEM WITH CLUES FROM NATURE**. IEEE Transactions on Neural Networks. Volume 5, Number 1, January 1994.
- [PAHLEN, 1991] PAHLEN, Kurt, **NOVA HISTÓRIA UNIVERSAL DA MÚSICA**. São Paulo – SP: Melhoramentos, 1991.
- [PENROSE, 1993] PENROSE, Roger. **A MENTE NOVA DO REI: COMPUTADORES, MENTES E AS LEIS DA FÍSICA**. Rio de Janeiro: Campus, 1993.
- [PESSIS-PASTERNAK, 1993] PESSIS-PASTERNAK, Guitta. **DO CAOS À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: QUANDO OS CIENTISTAS SE INTERROGAM**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1993.
- [RAYMUNDO, 1994] RAYMUNDO, Jorge, **INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: POSSIBILIDADES E LIMITES**. João Pessoa - PB: Idéia, 1994.
- [RICH, 1994] RICH, Elaine.; KNIGHT, Kevin. **INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**. São Paulo – SP: Makron Books, 1994.
- [ROADS, 1996] ROADS, Curtis. et al. **THE COMPUTER MUSIC TUTORIAL**. MIT, 1996.
- [ROSSING, 1990] ROSSING, Thomas D. **THE SCIENCE OF SOUND**. 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1990.
- [RUBIN, 1996] RUBIN, David M., **O MÚSICO DESKTOP**. São Paulo – SP: Makron Books, 1996.
- [RUSHTON, 1988] RUSHTON, Julian. **A MÚSICA CLÁSSICA. UMA HISTÓRIA CONCISA E ILUSTRADA DE GLUCK A BEETHOVEN**. Jorge Zahar Editor: Rio de Janeiro, 1988.
- [SALANT, 1990] SALANT, Michael A. **INTRODUÇÃO À ROBÓTICA**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990.
- [SAYEGH, 1989] SAYEGH, Samir I., **FINGERING FOR STRING INSTRUMENTS WITH THE OPTIMUM PATH PARADIGM**. Computer Music Journal, Vol 13. No. 3, Fall 1989.
- [STEWART, 1996] STEWART, Ian. **OS NÚMEROS DA NATUREZA: A REALIDADE IRREAL DA IMAGINAÇÃO MATEMÁTICA**. Rio de Janeiro: Rocco, 1996

- [TAFNER, 1995] TAFNER, Malcon Anderson.; Marcos de Xerez.; Ilson W. Rodrigues Filho. **REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS: INTRODUÇÃO E PRINCÍPIOS DE NEUROCOMPUTAÇÃO**. Blumenau: Ed. Da FURB, c1995.
- [TAUB, 1984] TAUB, Herbert. **CIRCUITOS DIGITAIS E MICROPROCESSADORES**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1984.
- [TEIXEIRA, 1997] TEIXEIRA, Luciênio de Macedo. – **DA REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO MUSICAL AO ESBOÇO CONCEITUAL DE UMA SOCIEDADE DE AGENTES EM HARMONIA**. Dissertação de Mestrado, COPIN-UFPA, 1997.
- [TSUTSUI et ali, 1997] TSUTSUI, Shigeyoshi; GHOSH, Ashish; FUJIMOTO, Yoshiji; CORNE, David. **A BI-POPULATION SCHEME FOR REAL-CODED GAs: THE BASIC CONCEPT**. International Conference of Information Sciences, March 1-5, 1997.
- [TURNER, 1997] TURNER, Barrie Carson. **O MUNDO DO PIANO: UM LIVRO ILUSTRADO PARA CONHECER A ARTE, A HISTÓRIA E A TÉCNICA DO INSTRUMENTO**. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 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 SBRN São Carlos 18 a 20 de outubro de 1995.
- [VIANA, 1997a] VIANA, Alexandre B.; CAVALCANTI, J.H.F; ALSINA, P.J. **SISTEMA INTELIGENTE PARA O ENSINO DO DEDILHADO PIANÍSTICO**. Simpósio Brasileiro de Informática na Educação. SBIE-97, Separata pp. São José dos Campos - SP: 1997.
- [VIANA, 1997b] VIANA, Alexandre B.; CAVALCANTI, J.H.F; ALSINA, P.J. **SISTEMA INTELIGENTE PARA O DEDILHADO PIANÍSTICO**. III Simpósio de Pesquisa de Extensão. III SPE. Natal: 1997.
- [VIANA, 1997c] VIANA, Alexandre B.; SAMPAIO, A. P.; CAVALCANTI, J.H.F; ALSINA, P.J. **UM ACIONADOR PERCUSSIVO INTELIGENTE**. III Simpósio de Pesquisa de Extensão. III SPE. Natal: 1997
- [VIANA, 1998a] VIANA, Alexandre B.; CAVALCANTI, J.H.F; ALSINA, P. J. **MÃO ROBÓTICA: UM AUXÍLIO AO ENSINO DE PIANO**. 50ª Reunião Anual. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência – SBPC. Natal – RN, 1998
- [VIANA, 1998b] VIANA, Alexandre B.; CAVALCANTI, J.H.F; ALSINA, P.J. **UMA MÃO ROBÓTICA PARA O ENSINO DO DEDILHADO PIANÍSTICO**. XIII Congresso Brasileiro de Automática 98. UFU – Universidade Federal de Uberlândia - MG, 1998.

-
- [VILLAS, 1988] VILLAS, Marcos Vianna.; VILLASBOAS Luiz Felipe P.
PROGRAMAÇÃO CONCEITOS TÉCNICAS E LINGUAGENS. Rio de Janeiro – RJ. CAMPUS. 1988

Apêndice A - O Software SIEDP

A.1. Introdução

Neste apêndice será descrito o funcionamento do programa SIEDP, desenvolvido para encontrar o melhor dedilhado pianístico, de um trecho musical melódico para piano. O *software* foi desenvolvido utilizando a linguagem C++ Builder (versão 1.0) da Borland.

A.2. Descrição Geral do SIEDP

O *software* SIEDP foi desenvolvido com o intuito de facilitar o aprendizado do dedilhado para melodias pianísticas. Basicamente o SIEDP trabalha em dois modos. No modo automático e no modo manual. No modo automático, o usuário não pode utilizar os recursos do Algoritmo Genético sem que antes ele passe pelo módulo do Sistema Especialista. Ou seja, primeiramente o SI verifica se a melodia corresponde à uma regra ou não. Se for uma regra, o módulo SE será ativado. Caso contrário o módulo AG é que é ativado. No modo manual, o usuário poder utilizar as opções do AG, mesmo que a melodia corresponda à uma regra.

A.3. Os MENU do programa SIEDP

A Figura A.1 mostra a tela principal do *software*, (*SIEDP*) - *Sistema Inteligente para o Ensino do Dedilhado Pianístico*. Nesta tela são apresentados as suas cinco opções: Arquivo, SI, SE, Genético, Opções e Ajuda.

A.3.1. O menu Arquivo

A opção Arquivo possui cinco sub-opções: *Nova Melodia*, que abre uma janela para a criação de um novo arquivo. Após a escolha dessa opção, um editor de texto é executado para a elaboração de um arquivo melodia. Na primeira linha do editor de texto o usuário insere o número de notas que a melodia possui. Na segunda linha ele deve inserir os valores correspondentes às teclas. Na terceira linha devem ser colocados os valores relativos aos tempos entre as notas (em milisegundos). Na quarta linha deve ser informado o dedilhado propriamente dito. O usuário pode inserir qualquer

dedilhado. Após alterações executadas num arquivo ou após a criação de um novo arquivo, o usuário deve clicar a opção **Atualizar Arquivo** que surgirá na tela como mostrado na Figura A.2, afirmando que é necessário o salvamento do arquivo para que seja possível a execução da melodia. A opção **Abrir Melodia**, permite a abertura de um arquivo do tipo melodia (*.mel) que contém as informações das teclas (notas) já gravadas, dos dedos e dos tempos das notas. Na parte inferior da figura, é visto um ícone de execução da melodia. O usuário ao clicar neste ícone, é feita a execução da melodia que mostra ao usuário a nota a ser tocada e com seu respectivo dedilhado (ver Figura A.1). Na opção **Salvar Melodia**, o usuário tem a possibilidade de salvar a melodia que ele esteja editando no momento; A opção **Salvar Melodia Como...** dá a possibilidade de salvar a melodia aberta com outro nome e a opção **Fechar** permite sair do programa.

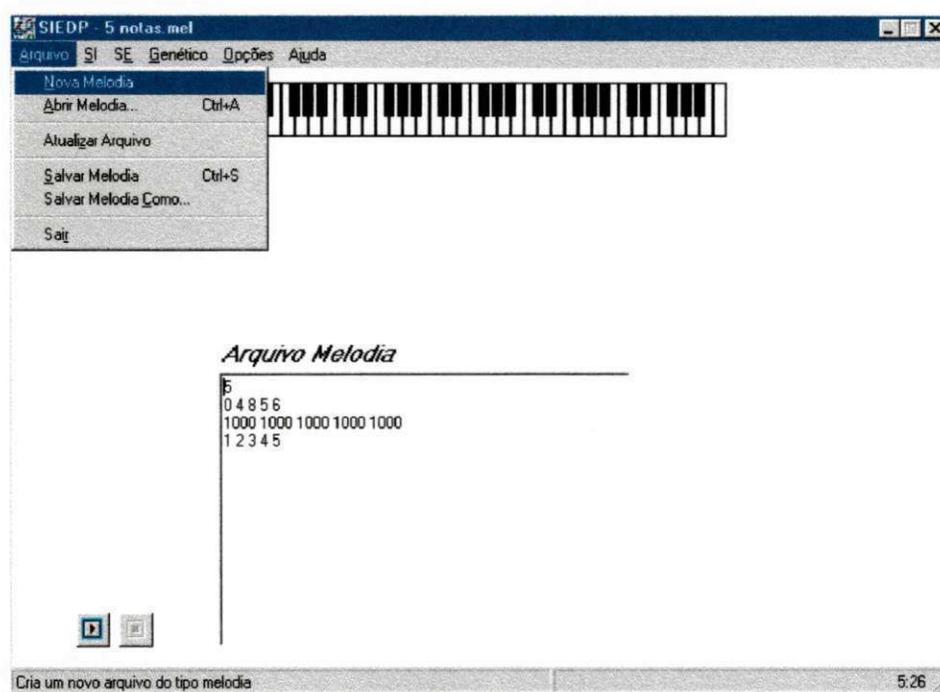


Figura A.1. Janela Principal do Programa SIEDP.

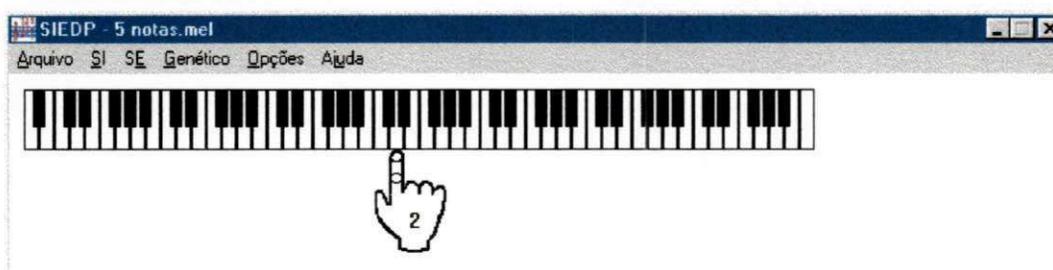


Figura A.1. Execução de uma melodia.

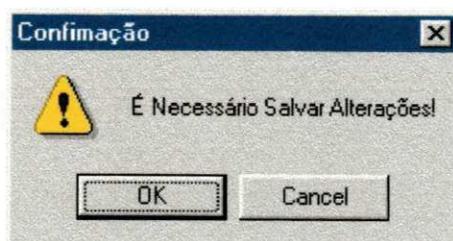


Figura A.2. Confirmação de Atualização de Arquivo.

A.3.2. O menu *SI*

Após ler um arquivo ou criar um novo arquivo, o usuário tem a possibilidade de escolher entre os modos de funcionamento automático ou manual do SIEDP (ver Figura A.3). Por *default*, o SIEDP está habilitado no modo manual.

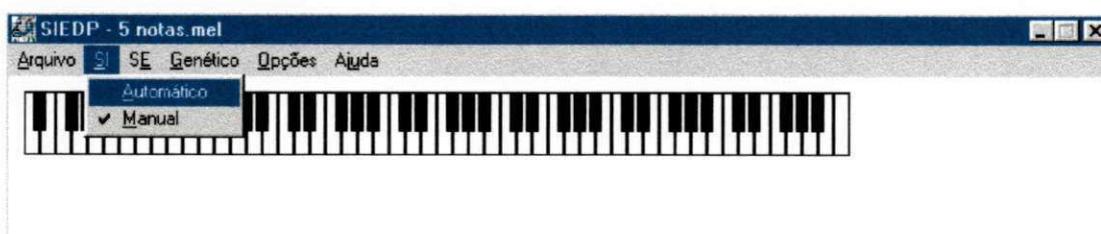


Figura A.3. Menu *SI* do SIEDP.

A.3.2.1 Modo Automático

No modo automático o SIEDP verifica primeiramente se a melodia é uma regra ou não. Caso a melodia seja uma regra, o usuário recebe uma informação dizendo que a melodia é uma regra e é perguntado se ele deseja visualizar a explicação (ver Figura A.4).

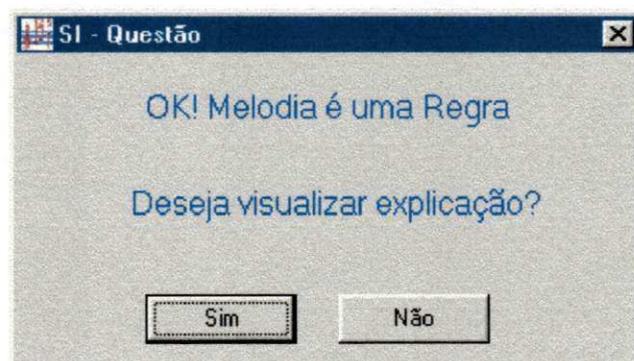


Figura A.4. Questão do SI (melodia é regra).

Caso a melodia não seja uma regra, o usuário recebe uma informação dizendo que a melodia não é uma regra e é perguntado se ele deseja executar o AG para encontrar o dedilhado ótimo (ver Figura A.5). Se o usuário desejar a execução automática do AG, é gerado a População Principal de cromossomos e o SEIDP ficará esperando a escolha da opção Gerações. No modo automático, o usuário não pode utilizar o AG antes que ele utilize a sub-opção **Verificar Melodia** do menu **SE** para saber se a melodia é uma regra ou não.

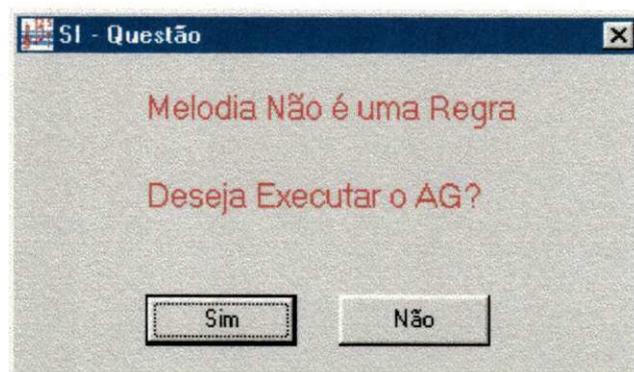


Figura A.5. Questão do SI (melodia não é regra).

A.3.3.2 Modo Manual

No modo manual, o usuário tem a possibilidade de utilizar os componentes do SI de forma independentes. P.e., após o usuário ler uma melodia, ele pode querer usar o AG mesmo que essa melodia seja uma regra. Se a melodia for uma regra, o sub-menu **Verificar Melodia** do menu **SE** é habilitado para que ele possa visualizar a explicação da regra.

A.3.3. O menu **SE**

A Figura A.6 mostra o menu **SE** do SIEDP que possui apenas uma sub-opção e que é utilizado para saber se uma melodia é ou não uma regra.

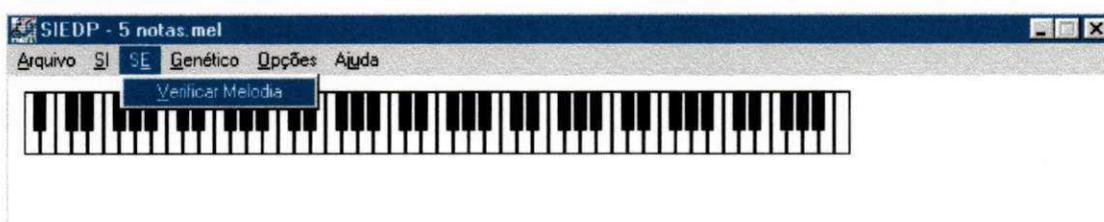


Figura A.6. Menu **SE** do SIEDP.

Após o usuário escolher esta opção aparecerá na tela uma mensagem dizendo se a melodia é ou não uma regra. Se for uma regra, a mensagem permite que o usuário visualize a explicação da regra da melodia. A Figura A.7 mostra um exemplo de uma regra (escala de dó maior) e sua explicação. Na primeira linha aparece o número referente à regra na base de dados. A segunda linha mostra o nome da regra (explicação). Na terceira linha as teclas da melodia e finalmente na quarta linha o dedilhado que deve ser aplicado na melodia.

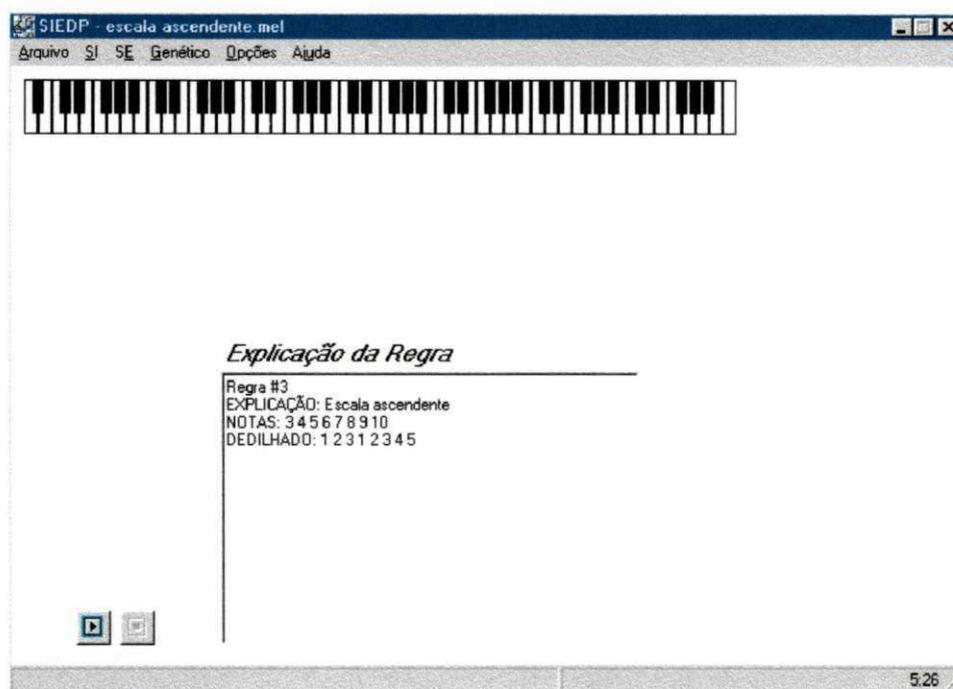


Figura A.7. Explicação de Regra.

Caso a melodia inserida ou lida de um arquivo não seja uma regra, o usuário recebe a informação mostrada na Figura A.5 dizendo que a melodia não é uma regra e portanto, dando a opção dele utilizar o Algoritmo Genético para encontrar o melhor dedilhado.

A.3.4. O menu *Genético*

A Figura A.8 mostra a opção *Genético* do programa que possui quatro sub-opções. São elas: *Dedos Base Aleatório*, que faz a aleatoriedade dos dedos atuais, *Gera População Principal*, que cria a população principal dos cromossomos (50) usados para a escolha dos melhores dedilhados. *Mutação* faz a troca aleatória da posição dos dedos.

Gerações faz a geração de todas as iterações definidas no menu **Opções**. Caso o valor não seja alterado, tem-se como valor *default* 100.

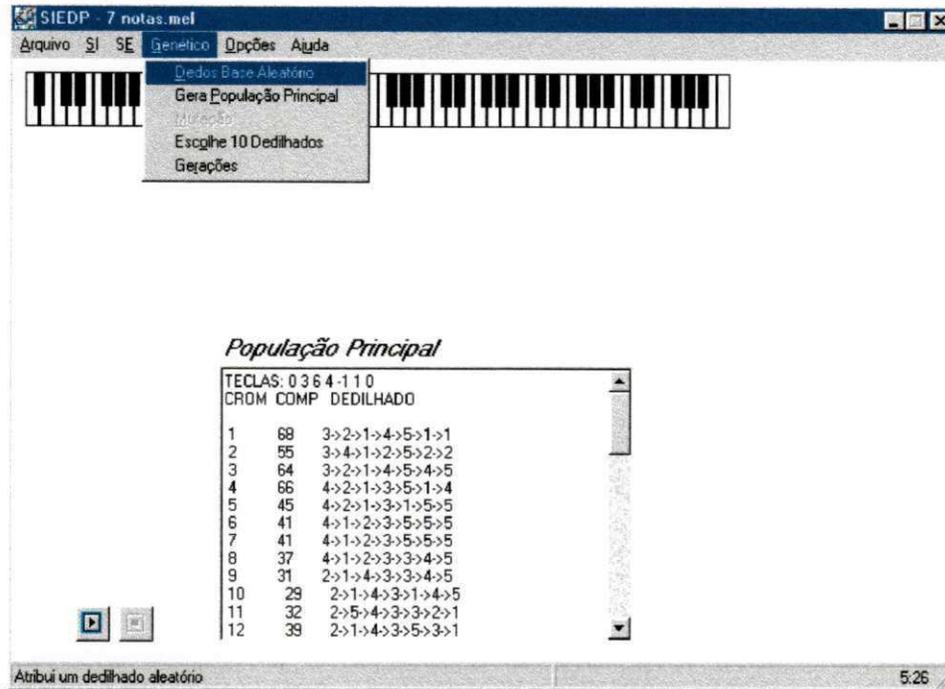


Figura A.8. Menu Genético e suas sub-opções.

A.3.5. O menu **Opções**

A Figura A.9 exibe o menu **Opções** onde existem seis sub-opções: **Ocultar Dedilhado** que oculta a janela onde são exibidos os resultados do sistema. **Visualizar Arquivo** que permite desfazer a ação anterior, ou seja, mostra novamente a caixa onde são exibidos os dados sobre a melodia. A opção **Localizar Dedilhado** (Ctrl+F) permite o usuário localizar um dedilhado ou qualquer outro texto dentro da janela dos resultados. **Visualizar PE** exibe a janela com os resultado da População dos Escolhidos, ou seja o resultado propriamente dito. A opção **Visualizar PP** mostra a População Principal gerada inicialmente pelo AG ou a *posteriori* pelo usuário. E a opção **Iterações** que permite o usuário trocar o número de iterações do AG (gerações das PEs). A Figura A.10 mostra a caixa de diálogo Iterações onde o usuário tem essa possibilidade de modificar o valor, que inicialmente é 100.

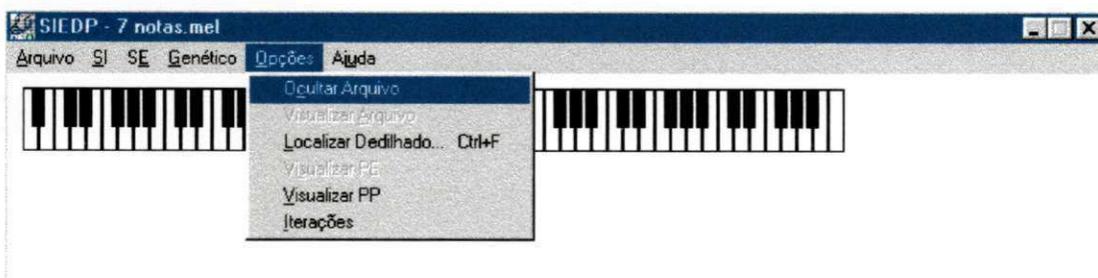


Figura A.9. Menu Opções do SIEDP.

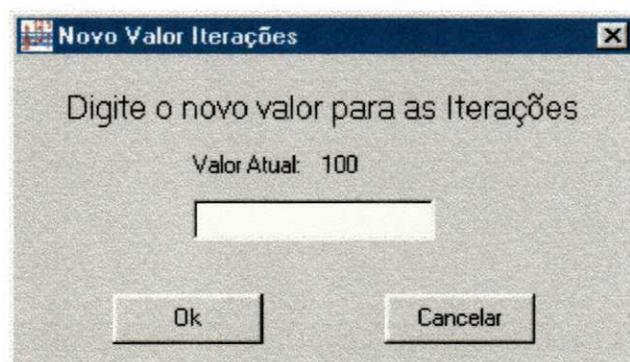


Figura A.10. Opção Alterar Iteração

A.3.6. O menu *Ajuda*

Finalmente a opção **Ajuda** que possui uma única sub-opção **Sobre**, mostrada na Figura A.11, apresenta as características básicas do programa **SIEDP**, tais como: autores, versão do produto, direitos autorais, etc.



Figura A.11. A opção Sobre.

A.4. Conclusões

O *software* desenvolvido no C++ Builder da Borland, foi projetado para ajudar os alunos de música de um modo geral, mais especificamente aos alunos de piano, a encontrarem uma melhor seqüência de dedilhados para uma determinada melodia. O *software* ainda está em fase em melhoramentos para que dê ao aluno uma melhor clareza dos seus procedimentos.

Apêndice B. O Executivo em Tempo Real

B.1. Introdução

Neste apêndice será descrito a implementação de um escalonador para o controle automático das tarefas necessárias para executar uma melodia musical para piano usando a mão robótica. O sistema de controle baseia-se em eventos discretos. As tarefas são determinísticas, de acordo com a melodia. As tarefas representam todos os valores de tempo e altura das notas, para a execução correta da melodia.

B.2. Escalonador em Tempo Real

O controle e posicionamento dos manipuladores da mão robótica devem ser feitos em tempo real. A Figura B.1 mostra o falso código do Escalonador em Tempo Real (ETR) para acionamento das tarefas dos motores. As tarefas não são "preemptives".

Foram desenvolvidas 2 tipos de tarefas. Um tipo de tarefa para movimentar o motor de passo e um outro tipo para movimentar os motores de corrente contínua. Cada tarefa possui o seu próprio descritor. Cada descritor possui 4 campos: identificação (id), que identifica a tarefa; status (st), indica o estado da tarefa que podem ser executando (st=-1), bloqueado (st=0) e pronto (st=1); frequência (freq) de ativação da tarefa em ms; contador (conta) das interrupções, uma a cada 1ms, do computador. O escalonador foi implementado no IBM PC usando a linguagem Borland C++ 4.5 e o seu falso código é mostrado abaixo. Após a sua execução, cada tarefa terá st=0.

```
a cada interrupção //A cada 5 ms
{
  faça{          //Atualiza Descritores
    se conta !=0 então conta=conta-1;
    se conta==0 então
      {
        conta=freq;
        st=1;
      }
  }(para todos os descritores)
  faça{          //Aciona Tarefas
    se status==1 então
      {
        status=-1;
        aciona tarefa;
      }
  }(para todos os descritores)
}
```

Figura B.1. Falso código do ETR.

B.3. Conclusões

O Escalonador em Tempo Real, foi desenvolvido para gerenciar as tarefas utilizadas na execução do dedilhado pianístico pela mão robótica.

Apêndice C. O Padrão MIDI

C.1. Introdução

Neste apêndice será mostrado o protocolo MIDI, que é um protocolo padronizado para transmitir e receber dados entre aparelhos MIDI compatíveis.

C.2. História do MIDI

MIDI é a sigla para, *Musical Instrument Digital Interface*, ou Interface Digital para Instrumentos Musicais. O padrão MIDI surgiu em 1983 e foi desenvolvido para possibilitar a comunicação entre instrumentos musicais, baterias eletrônicas, micro-computadores e outros equipamentos microprocessados utilizados em aplicações musicais. [RATTON, 1992].

MIDI é um sistema digital de comunicação de dados, do tipo serial assíncrono, que opera na taxa de transmissão de 31.250 bauds (bits/seg). A função básica do MIDI é facilitar a transmissão de todos os eventos que o músico executa no instrumento principal para o instrumento secundário. Basicamente o que é transmitido pelo MIDI, nada mais é do que dados. Ou seja, eventos do tipo pressionar/liberar tecla, acionar pedal, intensidade das notas, etc. Assim, o som final, vai depender do tipo de timbre que o instrumento controlado está utilizando.

O MIDI, tem contribuído muito para uma nova concepção da música. Com o barateamento dos computadores pessoais, muito tem crescido o número de pessoas que o utilizam para a realização de seus trabalhos no conforto de suas casas.

C.3. Características do MIDI

Existem três conectores para o interfaceamento MIDI (Figura C.1). Um conector de entrada que recebe os dados, chamado de "MIDI IN", e dois conectores de saída, que enviam dados, chamados de "MIDI OUT" e "MIDI THRU". A saída MIDI THRU reenvia todos os dados recebidos pela entrada MIDI IN. A saída MIDI OUT envia todos os dados relativos a eventos executados no próprio equipamento. Os equipamentos utilizam tomadas do tipo DIN de 5 pinos, fêmea.

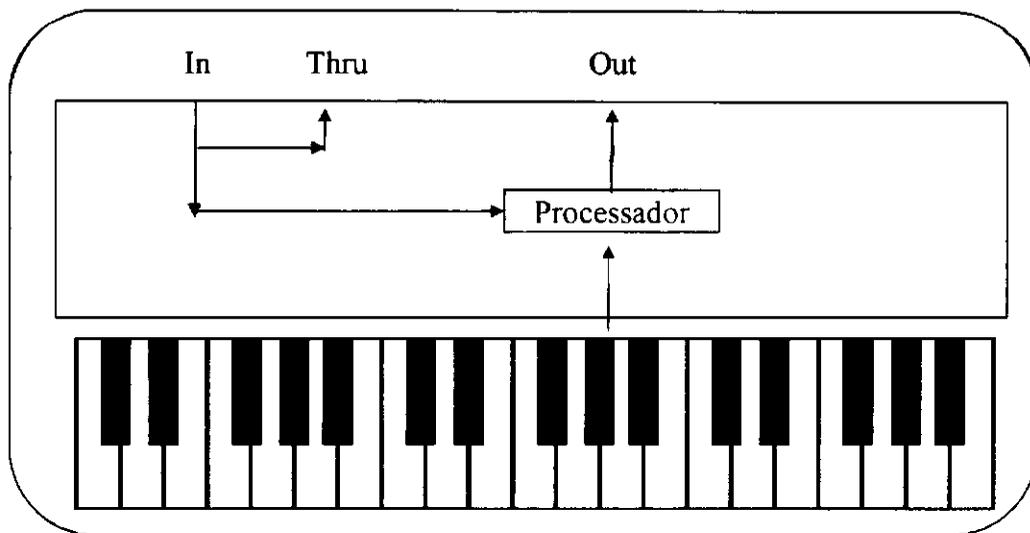


Figura C.1. O MIDI Thru repassa os dados que chegam no MIDI In.

A Figura C.2 mostra o diagrama esquemático da entrada (IN) e saídas (OUT, THRU) do MIDI.

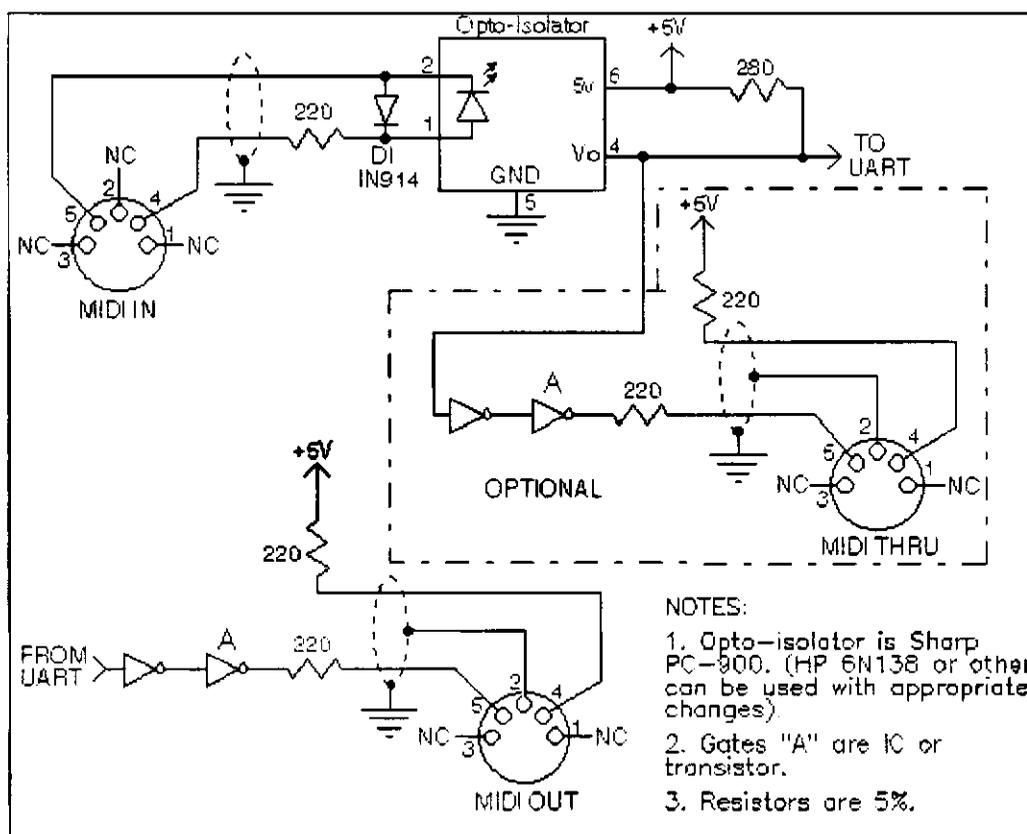


Figura C.2. Circuito MIDI (In, Out e Thru).

C.4. Mensagens MIDI

O protocolo MIDI é constituído de mensagens. Uma mensagem consiste de uma *strings* de *bytes*. Um tipo de mensagem MIDI pode ter um número ilimitado de *bytes*. A única informação comum em todas as mensagens MIDI é o primeiro *byte* (*Status*). Todas as mensagens MIDI (com exceção das mensagens de *Sistema Exclusivo*) possuem três ou menos *bytes*. O protocolo MIDI possui também 16 canais com 0 sendo o primeiro. A informação básica para se executar uma nota é *Note On*. O *byte* de *status* do evento *Note On* vai de 0x90 até 0x9F (em hexadecimal). Assim, para que seja possível executar uma simples nota, tem-se que dizer qual é a nota (0, 127), qual intensidade ela deve soar (1, 127), e em qual canal esta nota deve soar (0, 15). Observe que o primeiro valor da intensidade de execução de uma nota é 1 pois o valor zero é utilizado para parar a nota. Assim, após o evento *Note On*, o evento *Note Off* (0x80-0x8F) surge, pois senão dependendo do timbre, a nota ficaria soando por tempo indeterminado.

Utiliza-se uma função no Windows (**midiOutShortMsg**) que envia uma mensagem MIDI diretamente para a placa de som. Para utilizá-la precisa-se embutir três *bytes* em um inteiro longo. O *byte* menos significativo da palavra é o *byte* de *status* (por exemplo, 0x90 para o canal 1). O *byte* mais significativo é o primeiro *byte* de dado. Abaixo, na Figura C.3, segue um exemplo do código para se executar uma simples nota, pela placa de som. Primeiramente, a função *midiOutOpen* abre o dispositivo a ser utilizado, a seguir envia a mensagem com a intensidade (*velocity*), a nota propriamente dita, e o canal onde deve soar a nota. Depois, dá-se um tempo (*Sleep*) em milisegundos até que o próximo evento (parar a nota) surja. Finalmente, fecha-se o dispositivo anteriormente aberto.

```
if(!midiOutOpen(&hMidiOut, 1, 0, 0, CALLBACK_NULL))
{
    // velocity   nota   canal
    midiOutShortMsg(hMidiOut, (127<<16) + (tocanota<<8) + (0x90));
    Sleep(400);
    midiOutShortMsg(hMidiOut, (00<<16) + (tocanota<<8) + (0x90));
    midiOutClose(hMidiOut);
}
```

Figura C.3. Código fonte de execução de uma nota midi.

C.5. Conclusões

O protocolo MIDI é muito utilizado atualmente. A vasta possibilidade de manipulação de eventos sonoros e sua grande capacidade de armazenamento de informações num pequeno tamanho em *bytes*, dá ao protocolo MIDI esta flexibilidade de utilização.