

UFPB, Campina Grande, PB.

- Dannenberg, R.B. (1993). Music Representation Issues, Techniques, and Systems, *Computer Music Journal*, MIT Press, EUA, 17(3), 20-30.
- Ferneda, E., Silva, C.A.P., Teixeira, L.M. & Silva, H.M. (1994). A System for Aiding Discovery in Musical Analysis, *Anais do I Simpósio Brasileiro de Computação e Música*, pp. 177-184, SBC, Caxambu, MG,.
- Hindemith, P.(1986). *Harmonia Tradicional*, Irmãos Vitale, São Paulo, 1986.
- Honing, H. (1993). Issues in the representation of time and structure in music, *Contemporary Music Review*, 9. (<ftp://mars.let.uva.nl/honing/PAPERS/H-93-B.HTML>).
- Kostka, S., Payne, D.(1984). *Tonal Harmony: with an Introduction to Twentieth-Century Music*, Alfred A. Knopf, New York, EUA.
- Pope, S.T. (Ed) (1991). *The Well-Tempered Object: Musical Applications of Object-Oriented Software Technology*, MIT Press, EUA.
- Schonberg, A.(1979) *Tratado de Armonía*, Real Musical, Madri, Espanha.
- Teixeira, L.M., Costa, E.B., Silva, C.A.P. & Ferneda, E. (1995). Aquisição do Conhecimento em Harmonia: Um ambiente de Aprendizagem, *Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on Computer Music*, 290-296, Canela, RS.
- Teixeira, L.M. (1997). *Da representação do conhecimento musical ao esboço conceitual de uma sociedade de agentes em Harmonia*, Dissertação de Mestrado, COPIN / CCT / UFPB, Campina Grande, PB.
- Vasey P. (1995). *LPA-Prolog++ 2.0, Programmer's Reference*, Logic Programming Associates Ltd., Londres, Inglaterra.
- Widmer, G. (1992). Qualitative Perception Modeling and Intelligent Musical Learning, *Computer Music Journal*, 16(2), 51-83, MIT Press, EUA.
- Wiggins, G., Miranda, E., Smaill, A. & Harris, M. (1993). A Framework for the Evaluation of Music Representation Systems, *Computer Music Journal*, 17(3), 31-42, MIT Press, EUA.

## Sistema Inteligente para a Escolha do Melhor Dedilhado Pianístico

**Alexandre B. Viana, José H. F. Cavalcanti**  
NEUROLAB/COPIN/UFPB

Av. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó  
CEP-58109-970 Campina Grande – PB - BRASIL  
e-mails: {viana, homero}@dsc.ufpb.br

**Pablo J. Alsina**

LECA/DEE/UFRN

Passeio dos Girassóis s/n - Lagoa Nova  
CEP. 59075-970 Natal – RN - BRASIL  
e-mail: pablo@leca.ufrn.br

### ABSTRACT

This paper shows the design, implementation details and experimental results obtained from Intelligent System (IS) to aids musical students to learn the optimum melody piano's fingering. The IS uses a Genetic Algorithm for the choice of the optimum fingering.

### RESUMO

Este trabalho mostra o desenvolvimento, implementação e resultados experimentais obtidos de um Sistema Inteligente (SI) voltado para o ensino de música aos estudantes de piano na obtenção de um dedilhado ótimo de uma melodia musical. O SI utiliza um Algoritmo Genético para a escolha da seqüência do melhor dedilhado.

### 1. Introdução

Durante a fase de aprendizagem de uma obra musical para piano, o aluno iniciante se sente desmotivado pelo não conhecimento da seqüência dos dedos a serem aplicados nas diferentes teclas do instrumento durante a execução da melodia musical. Por isso é fundamental a presença constante do professor junto ao aluno para que, a partir de exemplos corretos do dedilhado pianístico, ele tenha um melhor aprendizado. Além disso, é importante que o aluno não crie vícios mecânicos no dedilhado. Os vícios mecânicos prejudicam o andamento do dedilhado e o aprendizado da peça musical. Assim, é necessário que o aluno conheça a priori a seqüência do dedilhado a ser usado nos trechos da peça para que sua interpretação seja a melhor possível.

A música é construída por sucessões de sons por grau conjunto (esquema de caráter escalfístico) ou graus disjuntos (tipo arpejos ou acordes), ou por uma mistura de ambos. Portanto, o número de combinações possíveis é enorme. Os dedilhados, isto é, as diversas associações de dedos necessárias para executá-los são também muito grandes. Uma seqüência de apenas quatro notas (Figura 1), dependendo do contexto onde está inserida, pode ser digitada, pelo menos de 17 maneiras diferentes (Kaplan 1987).



1 2 3 4  
 2 3 4 5  
 3 4 5 1  
 4 5 1 2  
 5 1 2 3  
 2 1 2 3  
 etc.

Figura 1. Exemplo de dedilhados de uma melodia de 4 notas.

O dedilhado pianístico ótimo, é aquele que o aluno consegue executar o trecho musical da forma mais cômoda possível (sem tensões musculares) e, quando o trecho exigir velocidade de execução, o pianista possa fazê-lo da melhor maneira possível.

Este trabalho está dividido em seções. A segunda seção faz uma breve introdução aos Sistemas Especialistas. Na terceira seção é descrito sucintamente o Algoritmo Genético. Na quarta seção explica-se como o SI encontra o melhor dedilhado, utilizando o SE e o AG. Na seção 5 mostram-se os resultados obtidos para melodias de 5, 6, 7 e 8 notas. Na seção 6 descrevem-se as conclusões e finalmente na seção 7 as referências bibliográficas.

## 2. Os Sistemas Especialistas

Os Sistemas Especialistas (SE) surgiram na década de 1960 e foram usados na química, geologia, medicina, bancos e seguros (Encarta 1997). 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. Na música, o SE pode, por exemplo, ser usado para auxiliar um aluno no estudo da harmonização de uma linha melódica, usando um estilo musical de uma determinada época da história, ou ajudar a encontrar os melhores dedilhados pianísticos de uma seqüência musical.

A estrutura de um SE assemelha-se à um programa de software convencional. Os principais componentes de um SE são: a base de conhecimento, a máquina de inferência e a interface do usuário.

A Base de Conhecimento pode ser modelada utilizando-se as regras de produção and/or – if/then. Este formato mostra as regras com simplicidade, sem apresentar formas e caracteres codificado para o computador. Por exemplo, supondo-se que o SE usado para o dedilhado pianístico possua a seguinte regra:

**SE** intervalo entre 1ª nota e 2ª nota for maior do que um intervalo de quinta justa

**ENTÃO** não usar 1º e 2º dedos.

Observe que deve-se conhecer a melodia, a seqüência de mínimo esforço do dedilhado, etc. Essas informações devem estar de alguma forma armazenado na base de conhecimento.

A Máquina de Inferência utiliza estratégias de raciocínio aproximadas para chegar a uma estimativa válida de uma situação, enquanto possuímos dados incertos e regras imperfeitas.

É de importância fundamental que haja uma Interface amigável e transparente para o usuário. Dessa forma a compreensão do tratamento dado na fase de escolha do dedilhado pianístico, será claramente compreendido.

## 3. Os Algoritmos Genéticos

A medida do esforço do dedilhado pianístico algumas vezes é um problema NP completo (Sayegh 1989). Diversos pesquisadores (Holland 1992) tem usado algoritmos genéticos para resolver problemas do tipo NP completo.

O Algoritmo Genético (AG) é um procedimento iterativo, que mantém uma população de estruturas (chamadas indivíduos, espécies ou cromossomos) para representarem possíveis soluções de um determinado problema (Grefenstette 1986). Os AG são sistemas que se baseiam nos mecanismos da evolução dos seres vivos. Possíveis soluções de um problema são combinadas através dos operadores genéticos específicos inspirados na Seleção Natural de Charles Robert DARWIN (1809-1882), tais como o Cruzamento e a Mutação. O AG tem como principal característica a geração de um conjunto de soluções ao invés de uma única solução.

Basicamente, esses operadores modificam a população dos cromossomos, e sobrevivem para a próxima geração, os mais aptos dentre essa população de indivíduos. Há uma troca aleatória, porém estruturada, de informações entre esses cromossomos (cruzamento), de modo que, a cada geração, um novo conjunto de cromossomos é criado baseado nos mais aptos da geração anterior. 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.

O AG possui 5 componentes básicos: 1) Um método para codificação dos cromossomos, onde os numerais (bits) representam genes); 2) Uma função objetivo "fitness" (menor comprimento); 3) Uma população de cromossomos inicial; 4) Um conjunto de operadores para formarem a evolução entre dois cromossomos de populações consecutivas (mutação e cruzamento), que são usados entre as posições das espécies; 5) Parâmetros de trabalho (por exemplo, 2% de probabilidade de mudança no cromossomo) (Grefenstette 1986). A Figura 2 mostra o fluxograma do AG.



Figura 2. Fluxograma do AG.

#### 4. Cálculo do Comprimento do Dedilhado

O AG calcula o comprimento do dedilhado para atribuir um valor de referência à função *fitness* ou função objetivo do AG. A função *fitness* será utilizada pelo SI para encontrar o dedilhado ótimo

O teclado de um piano possui 52 teclas brancas e 36 teclas pretas. A cada tecla branca foi atribuído um número que corresponde à nota e posição no teclado, recebendo valores compreendidos entre -23 a +28 com o dó central sendo igual a zero. Dessa forma podemos obter qualquer relação intervalar entre as notas.

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 1.

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

O cálculo do comprimento  $C_{(n-1)n}$ , depende da seqüência das notas e dos dedos. Assim, são quatro as possibilidades das seqüências: 1) movimentos diretamente relacionados, 2) direções de movimentos inversos, 3) dedilhado igual e outra direção das notas e 4) notas iguais e outra direção de dedilhado.

1) 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). Assim, o comprimento deste intervalo é definido como o mostrado na equação 2.

$$C_{12} = \ln 2 - n1 + |(d_2 - d_1) - 1| + limita \quad (2)$$

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 2 para penalizar o comprimento do dedilhado. Foram considerados alguns casos para a existência da variável *limita*. No primeiro caso, os dois primeiros dedos são o anular e o indicador e se a diferença máxima entre as notas for maior que 4. No segundo caso, os dedos são o indicador e o médio ou o médio e o anular e a diferença máxima entre as notas for maior que 2. E no terceiro caso, os dedos são o anular e o mínimo e a diferença máxima entre as notas for maior do que 3.

2) Se as notas forem ascendentes e a seqüência dos dedos decrescentes ou então, se as notas forem descendentes e a seqüência dos dedos crescentes então:  $C_{12}$  é definido como mostrado na equação 3.

$$C_{12} = 2 * |(n2 - n1) + 1| + |(d2 - d1) - 1| + limita \quad (3)$$

3) No caso de haver 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 4.

$$C_{12} = 2 * |n2 - n1| \quad (4)$$

4) 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 5.

$$C_{12} = (d2 - d1) \quad (5)$$

A Figura 3 mostra o esquema geral do Sistema Inteligente (SI) desenvolvido para a ensino do dedilhado pianístico. O usuário têm duas opções: execução pela placa de som ou robótica. O SI possui como blocos principais um Sistema Especialista e um Algoritmo Genético utilizados para a escolha da seqüência do dedilhado. Inicialmente, o pianista deve fornecer ao SI a seqüência melódica. A seguir, o SI verifica se é ou não uma regra existente no SE. Caso afirmativo o SI aciona o SE que retorna o dedilhado da regra. Caso negativo o SI aciona o AG que analisa e prepara a melhor seqüência do dedilhado para a melodia em questão, e as envia para a execução melódica. Neste trabalho não serão mostradas as regras utilizadas no SE.

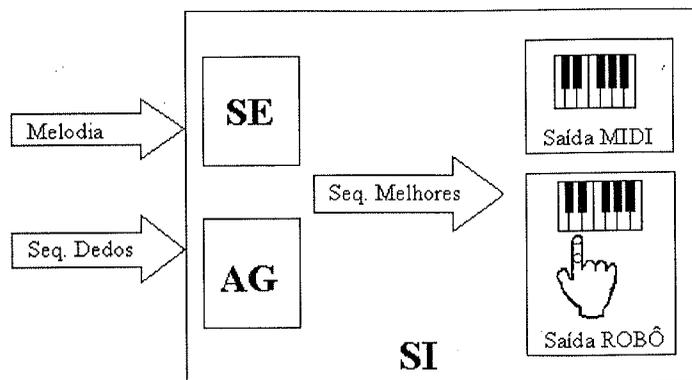


Figura 3. Visão geral do SI para a escolha dos melhores dedos.

## 5. Escolha do Dedilhado Ótimo com o AG

Utilizou-se uma variação do AG padrão. No AG do SI foram utilizadas duas populações de cromossomos: 1) uma população de 50 cromossomos, denominada População Principal – PP, em que os cromossomos podem se reproduzir e 2) uma população de 10 cromossomos escolhidos, ou População dos Escolhidos – PE, onde são armazenados os 10 melhores cromossomos. Só existe um operador genético no AG que opera diretamente sobre os cromossomos da PE. Basicamente, a cada geração, escolhe-se aleatoriamente um cromossomo da PE, a seguir, escolhem-se aleatoriamente dois genes do cromossomo. A operação genética faz-se mudando a posição entre os dois genes escolhidos. O cromossomo resultante é colocado aleatoriamente na PP.

## 6. Resultados Obtidos

O SI foi implementado no C++ Builder da Borland®. Testou-se o SI para a execução de algumas melodias simples para piano. Para a melodia de 5 notas mostrada na Figura 4 inicialmente foi gerada a PP (não mostrada neste trabalho). A seguir, foi feita a escolha dos 10 melhores cromossomos da PP para gerar a PE inicial. A PE, mostrada do lado direito da melodia, apresenta os dedilhados em ordem crescente do comprimento da melodia (função *fitness*). As notas foram transformadas em TECLAS 0 4 8 5 6, etc. O número de gerações foi escolhido heurísticamente baseado no número de notas da seqüência melódica. CROM – Cromossomo; COMP – Comprimento; DEDILHADO onde 1->2 significa o polegar na 1ª tecla, o indicador na 2ª, etc.

O número à esquerda de cada coluna representa o número do cromossomo da PP, o valor intermediário refere-se ao comprimento encontrado para a seqüência do dedilhado ao seu lado direito. O cromossomo número 8 da PE é o ótimo (menor comprimento). O

número de gerações foi escolhido heurísticamente baseado no número de notas da seqüência melódica.

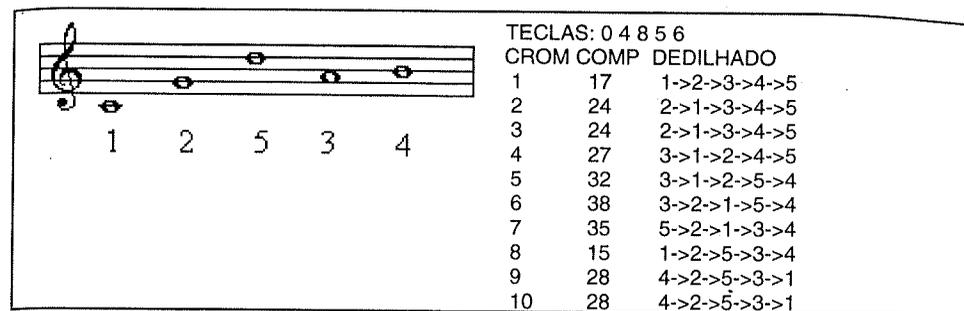


Figura 4. Resultado para uma melodia de 5 notas.

Para uma melodia de 6 notas, pode ser necessário que o AG gere até 720 populações até que se encontre o melhor dedilhado. Neste caso, o AG implementado usou a geração dos cinco dedos iniciais da mesma forma que no caso para uma melodia de cinco notas. À nota seguinte foi gerado mais um dedo aleatório para completar o dedilhado, já que temos seis notas e apenas 5 dedos. A Figura 5 mostra o resultado da escolha dos dedilhados para a melodia. Observe que os melhores resultados só começaram a aparecer a partir da iteração de número 88 e com o Comprimento Médio (CM) de 20,80. O CM é a soma dos comprimentos dividido pelo número de cromossomos. O gráfico abaixo da melodia representa a curva do melhor dedilhado (menor comprimento) *versus* iteração. Quanto mais gerações se passam, melhores são os resultados obtidos.

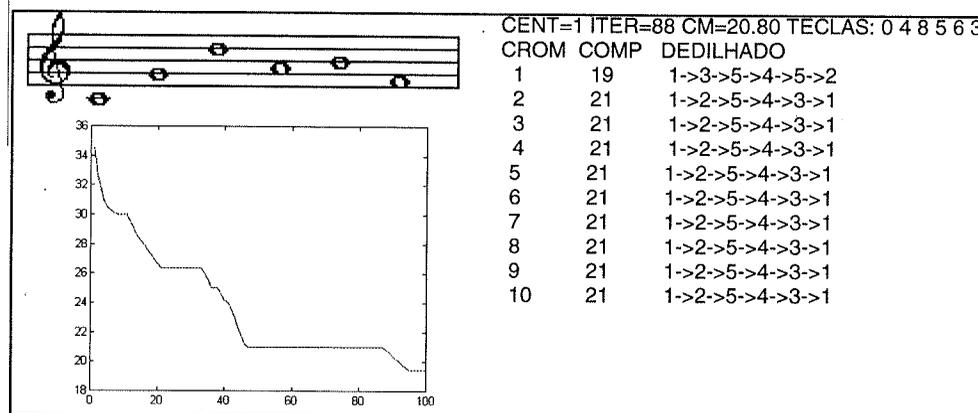


Figura 5. Resultado para uma melodia de 6 notas.

Para um exemplo de 7 notas, obteve-se os resultados apresentados na

Figura 6. Por coincidência um dedilhado ótimo já apareceu na primeira iteração, já que com 7 notas, o AG poderia levar no máximo até 5040 gerações de cromossomos para se chegar ao melhor.

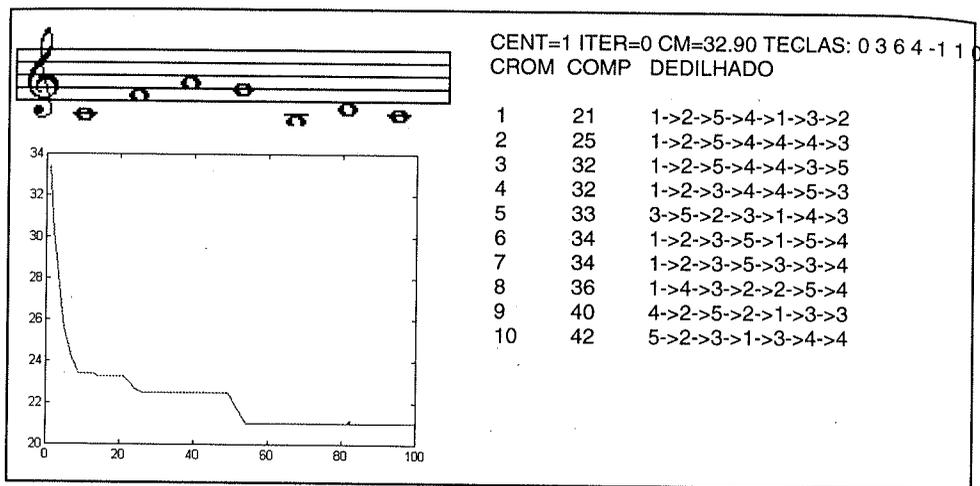


Figura 6. Resultado para uma melodia de 7 notas.

A Figura 7 mostra o resultado para uma melodia com 8 notas. Apenas na iteração 680 é que se chegou ao dedilhado ótimo.

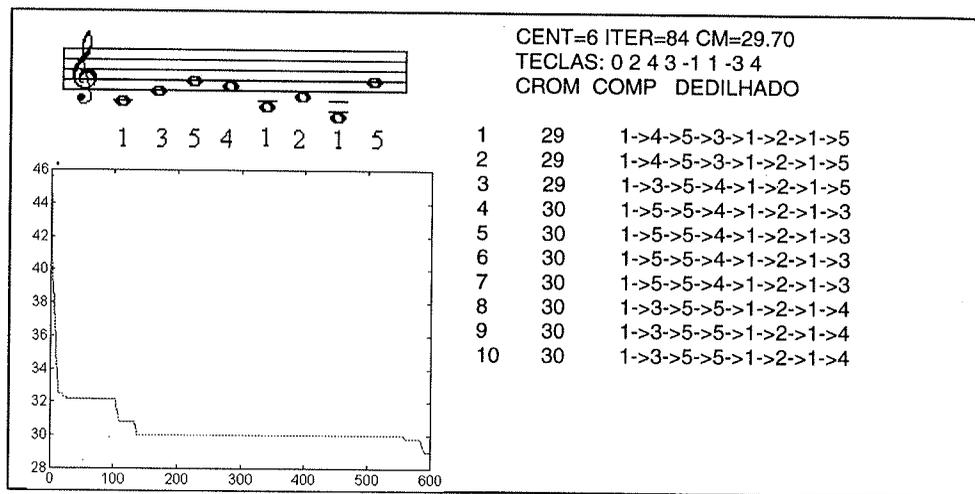


Figura 7. Resultado para uma melodia de 8 notas.

## 7. Conclusões

Apresentou-se um Sistema Inteligente para ajudar os alunos de piano a fazer o estudo e análise dos dedilhados de melodias para piano. O SI é capaz de mostrar o melhor dedilhado e executar o trecho melódico, apresentando na tela o exemplo prático de como o aluno deve tocar. Espera-se com isso que haja um aumento do ânimo do aluno ao estudo uma vez que o dedilhado complicado e confuso só iria prejudicar o seu desenvolvimento e fazer com que haja uma perda de interesse na prática do instrumento.

Já está em pleno funcionamento um braço mecânico (manipulador robótico) que executa num sintetizador (teclado musical) o trecho melódico, facilitando a visualização do movimento da mão e mostrando todas as passagens de dedos necessárias nos locais indicados pelo algoritmo, o que torna mais prático e objetivo a prática desse instrumento que até então se coloca na posição de um dos mais complexos de todos os instrumentos musicais.

## 8. Referências

- Kaplan, J. A. (1987). Teoria da Aprendizagem Pianística. Porto Alegre - RS. Ed Movimento, 1987.
- Encarta (1997). Encyclopedia. Microsoft.
- Sayegh, S. I. (1989). Fingering for String Instruments With The Optimum Path Paradigm. Computer Music Journal, Vol. 13, No. 3, MIT.
- Holland, J. H. (1992). Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Press/Bradford Books edition.
- Grefenstette, J. J. (1986). Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms. IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-16, no.1, pp. 122-128.