

# Espectro Sonoro Explorado com Sistema de Funções Iterativas

Maria Aparecida Silva Cruz<sup>1,3</sup>, Jônatas Manzolli<sup>2,4</sup>, Furio Damiani<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Depto. de Matemática da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

<sup>2</sup>Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (NICS)

<sup>3</sup>DSIF/Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

<sup>4</sup>Departamento de Música

Universidade de Campinas, SP -Brasil

{tida,jonatas}@nics.unicamp.br, furio@fee.unicamp.br

**Abstract.** *A digital signal process based on Iterative Function Systems applied to sound is presented. The mathematical model and the computer simulation are discussed. Two implementations are presented: manipulation of the sound Spectrum and transformation of the waveform in the time domain. Results evaluations showed the potential of the method in trimbral composition.*

**Resumo.** *Um método de processamento digital de sinal baseado em Sistemas de Funções Iteradas aplicados a manipulação sonora é apresentado. A modelagem matemática e a simulação computacional do mesmo é discutida. Apresenta-se duas implementações: manipulação do Espectro de Fourier de um dado sinal e transformação na forma de onda no domínio do tempo. A análise dos resultados mostrou o potencial do método aplicado à composição trimbrística.*

## 1. Introdução

O método aqui apresentado é derivado da observação que imagens complexas podem ser construídas com auxílio do computador através de simples algoritmos recursivos que necessitam de poucos parâmetros de controle. Uma maneira de modelar estes processos é denominada de Sistemas de Funções Iteradas (IFS), Este método baseia-se na aplicação recursiva de um conjunto de simples transformações afins (aplicações da reta no plano vide Boldrini et all (1989)) a um conjunto de pontos iniciais. Após um número finito de iterações, obtém-se um novo conjunto de pontos denominado de atrator. Intuitivamente, o conjunto final ou limite, define uma determinada configuração geométrica no plano. Esta tem propriedades muito interessantes como auto-semelhança e tem sido usada exaustivamente em computação gráfica para gerar imagens de estruturas complexas encontrados na natureza Barnsley (1988). Partindo destas observações, a pesquisa aqui apresentada parte das seguintes indagações: seria possível utilizar IFS para exploração sonora? Quais as consequências musicais de tal metodologia?

Tais questões foram postuladas num primeiro trabalho Manzolli & Furio (1996) onde mostrou-se o potencial musical do método através da geração de exemplos sonoros. Todavia, tendo em vista o carácter especulativo da proposta, este artigo representa um esforço para desenvolver uma formulação matemática robusta que, posteriormente, possa ser explorada musicalmente proporcionando melhor controle dos parâmetros

envolvidos. Seguem a definição matemática do método, a descrição da implementação computacional e projeções de aplicações do mesmo.

## 2. O Método Espectro Sonoro (ES)

O primeiro modelo desenvolvido foi denominado de **Espectro Sonoro (ES)**, pois a idéia foi modificar o espectro sonoro fazendo uso de IFS. As transformações são aplicadas ao par amplitude e frequência obtido através da Transformada Discreta de Fourier (DFT). Portanto, a partir de uma dada amostra sonora, calcula-se o seu espectro e este é considerado o conjunto de partida do método. O método consiste em obter um novo conjunto de pares (amplitude, frequência) a partir de um espectro inicial  $w_0$ . A amostra sonora final  $S$  é construída pela união de todas as variações espectrais derivadas de  $w_0$ , aplicando-se um IFS definido com  $k$  transformações afins. Cada nova variação espectral é denominada de  $w_i$ , com  $w_i = T_k(w_{i-1})$  e  $i = 1, 2, 3, \dots, \Lambda$ .

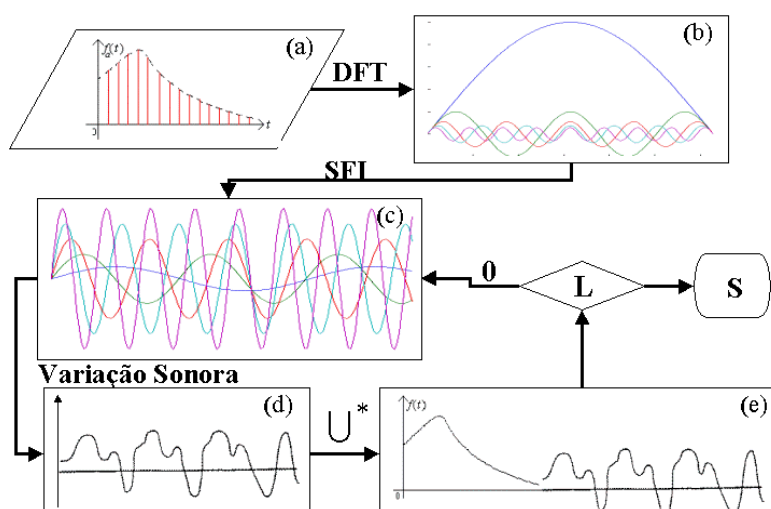


Figura 1 diagrama dos principais passos do método.

Como mencionado acima, a idéia básica do IFS é aplicar uma seqüência de Transformações Afins num conjunto inicial de pontos que eventualmente convergem para um atrator. A união de todas as variações espectrais deverá então ser levada ao domínio do tempo gerando uma variação sonora contínua. Para o método ES o conjunto inicial  $w_0$  (Figura 1(b)) é um espectro com  $N$  pontos calculados a partir da amostra sonora inicial (Figura 1(a)). Inicia-se o processo de iterações sobre o espectro inicial  $w_0$  e a cada iteração aplica-se uma das transformações afins  $T_k$  (Figura 1(c)) de modo que

$$w_i = T_k(w_{i-1}) = \{ \{F_j, A_j\} / F_j : \text{frequência e } A_j : \text{amplitude, } p/ j = 1, 2, \dots, M \}$$

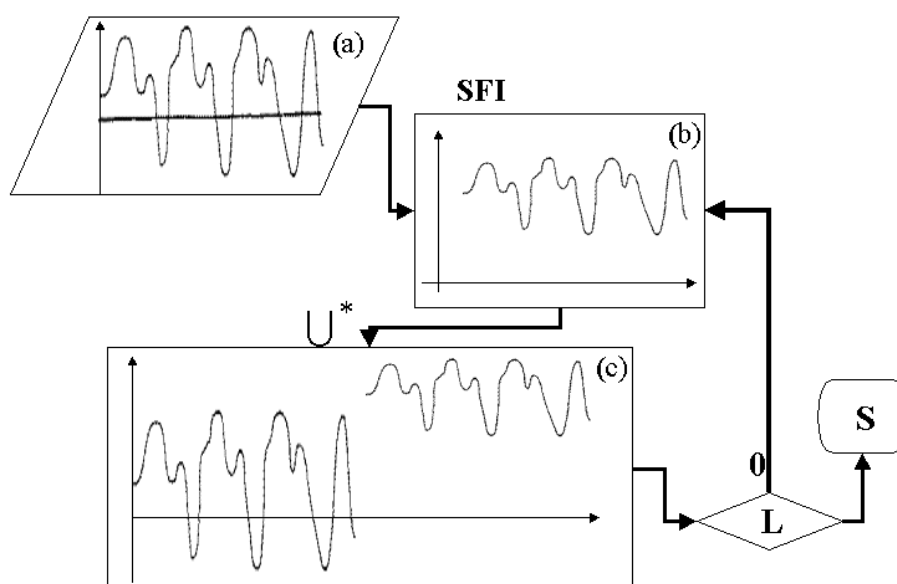
para  $i = 1, 2, 3, \dots, \Lambda$ .

Cada  $w_i$  determina uma variação sonora  $V_i$  correspondente (Figura 1(d)). Por fim obtém-se um nova amostra sonora o  $S$  pela operação união estrela  $Y^*$  que é a concatenação das variações sonoras (Figura 1(e)), Em Barnsley (1988) este procedimento aplicado a imagens é chamado de colagem. Desta forma, poderíamos

dizer que a união de todas as variações trata-se de uma colagem espectral . Por analogia, também, o produto sonoro final representa o atrator para o qual um determinado espectro sonoro converge sob a ação de um IFS específico.

### 3. IFS Aplicada ao Domínio do Tempo

Este método, denominado de **Mola Sonora**, produz, de forma iterativa, variações em uma determinada amostra sonora aplicando um onda com base na técnica IFS a cada ponto da mesma. As transformações são feitas diretamente nas amplitudes da onda no domínio do tempo. Da mesma maneira que no ES inicia-se o processo de iterações sobre o conjunto inicial  $s_0$  (Figura 3(a)) e a cada iteração aplica-se uma transformação afim  $T_k$  (Figura 3(b)).



**Figura 2.0 Diagrama do método aplicado ao domínio do tempo**

Consideramos aqui apenas um subconjunto de transformações afins, i.e., as que efetuam uma escala e/ou uma translação na amplitude (ordenadas dos pontos  $s_i$  ) Este fato causa um efeito que denominamos de “mola”, pois cada amplitude  $a_j$  da forma de onda pode ser “esticada” ou “comprimada”. De forma análoga ao ES, considera-se que o som gerado  $S$ , após  $n$  iterações, é o conjunto atrator desejado, ou o *atrator audível*. As transformações afins também são selecionadas de maneira idêntica ao exposto anteriormente. Diferente do método anterior, o tempo de execução do programa é extremamente menor, pois não se utiliza da FFT para produzir o conjunto de pontos iniciais.

### 4. Implementação

O método foi testado utilizando o programa MatLab 5.0. A estratégia empregada na implementação foi partir de um código IFS conhecido e efetuar alterações nos seus

parâmetros até chegar a um conjunto atrator que produziu algum resultado sonoro que atendeu uma demanda musical específica. Portanto, o método necessita da interpretação musical do usuário para definir qual é o melhor atrator ou configuração sonora final. Esta estratégia, embora bastante simples, tem sido empregada por outros autores Gogins (1991) e justifica-se na complexidade sonora gerada pelo método. Por exemplo, um critério viável é impor que o conjunto atrator aproxime-se de uma forma de onda dada a priori. A viabilidade deste critério é garantida pelo Teorema da Colagem (the Collage Theorem) que postula ser possível encontrar um IFS cujo atrator aproxima-se de um dado conjunto Barnsley, M. (1988). Outro aspecto considerado na implementação foi a seleção da transformação afim  $T_k$  que deve ser aplicada a cada iteração. O critério adotado funcionou como a lei de formação da seqüência que converge para o atrator. Foram desenvolvidos dois critérios: a) *randômico* e b) *determinístico*. **Randômico**: utilizou-se uma distribuição de probabilidade para sortear uma entre as transformações  $T_k$  possíveis. **Determinístico**: supõe-se a existência de uma ordem pré-estabelecida que define como as transformações  $T_k$  são aplicadas sucessivamente.

## 5. Conclusão

Neste trabalho foram apresentados dois métodos que através da técnica IFS produzem variações sonoras numa amostra sonora original. A aplicação de um ou outro método dependerá de aspectos musicais específicos. Para modificações guiadas pelo envelope temporal da amostra a aplicação no domínio do tempo é a melhor opção. Todavia, transformações direta das amplitudes levam a resultados muito diversos, muitas vezes sem controle de aspectos musicais relevantes como o proporcionado pela manipulação das amplitudes e frequências do método ES. Ao utilizarmos o espectro, a previsão sob um ponto de vista musical, torna-se mais flexível, devido a facilidade de manipulação das componentes espectrais. Assim subconjuntos específicos do espectro podem ser alvo de construção de um atrator. Os resultados produzidos podem ser muito complexos tal como acontece com as imagens geradas pelo IFS quando um atrator possui uma trajetória não muito bem definida. A abordagem dada provê propriedades matemáticas que sugerem investigações nas seguintes direções: no emprego de transformações diversas nos dois métodos, no desenvolvimento de Método de Compactação de sinal, i.e. dado um atrator, sinal  $S$ , determinar o código IFS que faça com que um conjunto original de pontos convirja para o mesmo. A partir deste trabalho pode-se explorar mais amplamente o controle sonoro do método através de parâmetros do modelo matemático que reflitam aspectos psico-acústico ou musicais como variação de intensidade e/ou altura.

## Referencias

- Boldrini, J.L.; Costa, S.I.R.; Ribeiro, V.L.F.F.; Wetzler, H.G. (1980) “Álgebra Linear”, Harper & Row do Brasil, São Paulo – SP.
- Barnsley, M. (1988) “Fractal Everywhere”, San Diego: Academic Press Inc, ISBN –0-12-079062-9.
- Gogins, M. (1991) “Iterated Functions Systems Music” Computer Music Journal 15(1):40-48.

Manzoli, J., Damiani, F. (1996) "Spectral Morphs Using Iterated Function Systems",  
anais do III Simpósio Brasileiro em Computação e Música.

Roederer, Juan G. (1973) "Introduction to the Physics and Psychophysics of  
Music" Springer-Verlag New York Inc. Library of Congress Catalog Card.