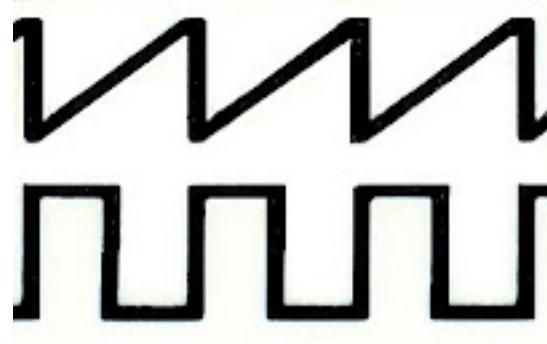


Síntese Sonora

Parte 2: Métodos de Sintese



Curso Tecnologia Musical

Prof. Regis Rossi Faria

Rev. 1º Sem. 2021

Métodos de síntese

- Métodos mais importantes
 - Síntese Aditiva
 - Síntese Subrativa
 - Síntese FM
 - Amostragem digital (mais utilizado hoje)
 - Modelagem física

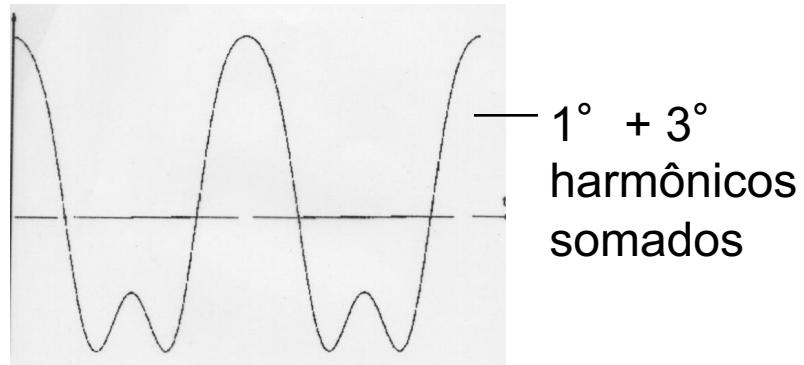
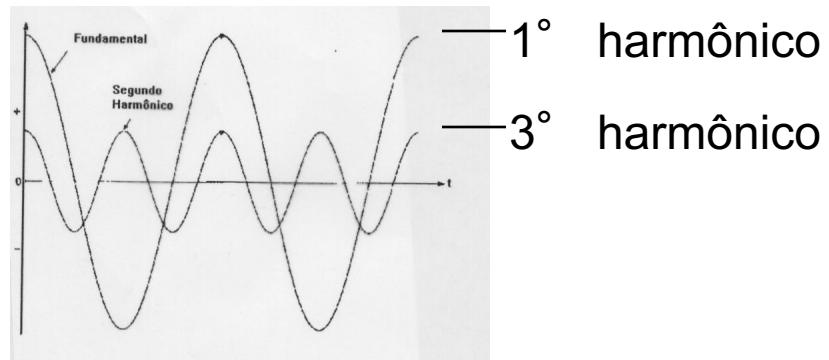
Síntese Aditiva

- Primeiras Manifestações
 - Órgãos de Tubo
 - Primeiro instrumento elétrico
 - Telharmonium
 - Mais famoso
 - Hammond
- Princípio: séries de Fourier
 - *“Toda e qualquer forma de onda periódica é constituída por uma soma de ondas senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental”*



Síntese Aditiva

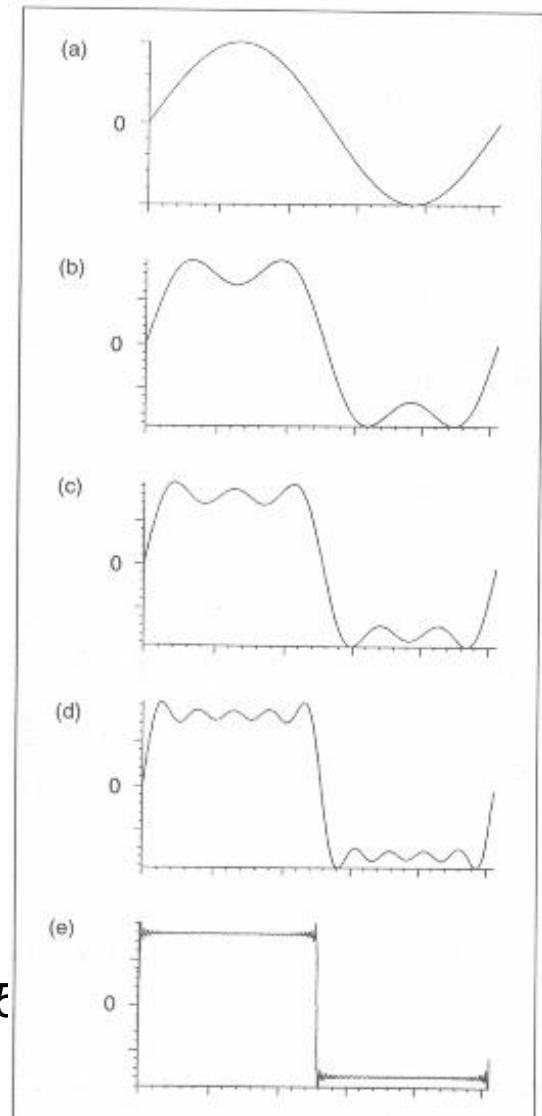
- Se somarmos senóides cujas frequências sejam as frequências de uma série de parciais múltiplos de uma fundamental (exemplo: uma série harmônica) podemos gerar formas de ondas complexas
 - Ex: soma do 1º (fundamental) e o 3º harmônicos de uma série
 - A forma da onda resultante também dependerá da relação de fase entre os harmônicos somados e de suas intensidades relativas (amplitudes)



Síntese Aditiva

- Se continuarmos somando parciais mais altos podemos criar formas de ondas mais complexas e com maior brilho
 - Ex: soma do 1º, 3º, 5º, 7º e progressivamente até o 65º harmônicos de uma série (soma de 65 harmônicos) resulta numa boa aproximação para uma onda quadrada

$$1^\circ + 3^\circ + 5^\circ + 7^\circ + \dots 65^\circ$$



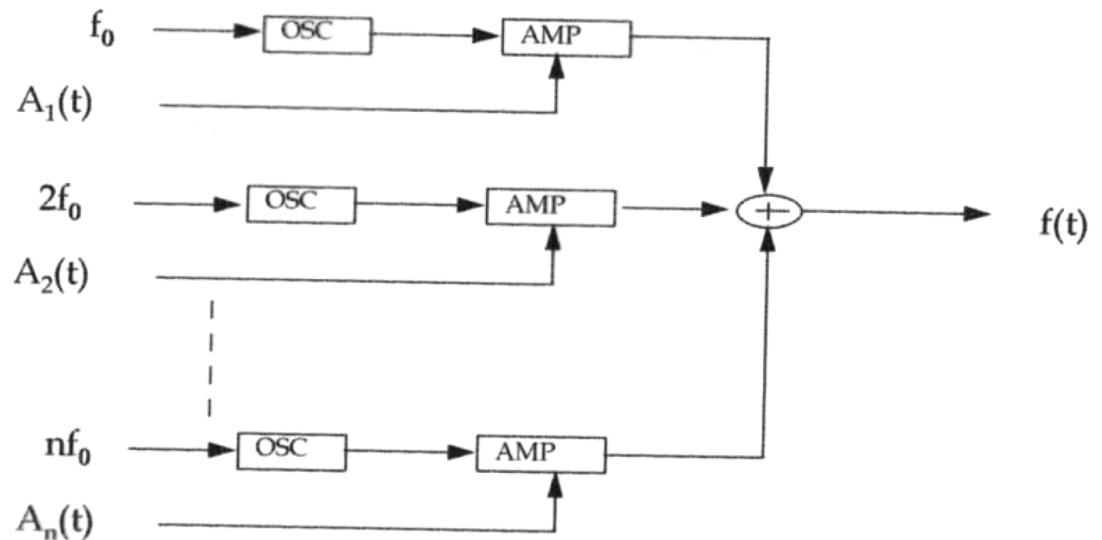
Síntese Aditiva

- A síntese aditiva perfaz exatamente este processo de somar uma série de sinais mais simples (chamados parciais) gerados por osciladores senoidais, cada um com uma frequência f e uma amplitude A

Equação Fundamental:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(t) \operatorname{sen}(2\pi f_o t)$$

f_0 é a frequência do primeiro oscilador, e A_1 sua amplitude



$2f_0$ é a frequência do segundo oscilador, e A_2 sua amplitude

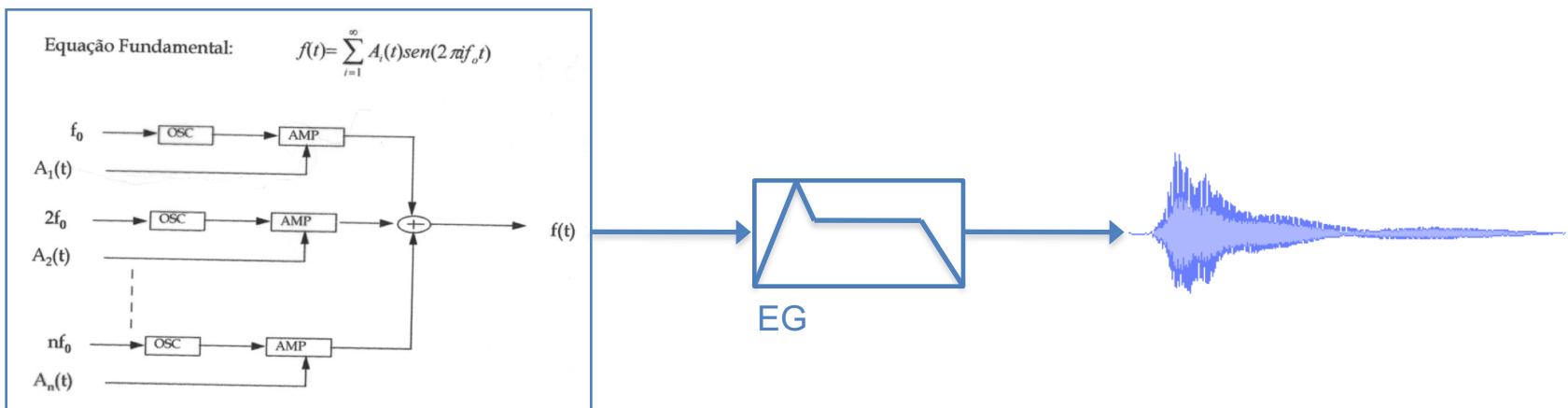


E assim por diante até a n -ésima parcial



Síntese Aditiva

- Gerando notas musicais
 - A síntese aditiva permite gerar um sinal complexo que é periódico, isto é, uma vez ligado fica soando indefinidamente
 - Para gerar notas musicais – isto é, fazer soar este sinal complexo por uma certa duração de tempo – precisamos modular sua amplitude para criar um ataque, uma sustentação e um colapso
 - Isto é feito aplicando-se uma envoltória final que dá forma à nota



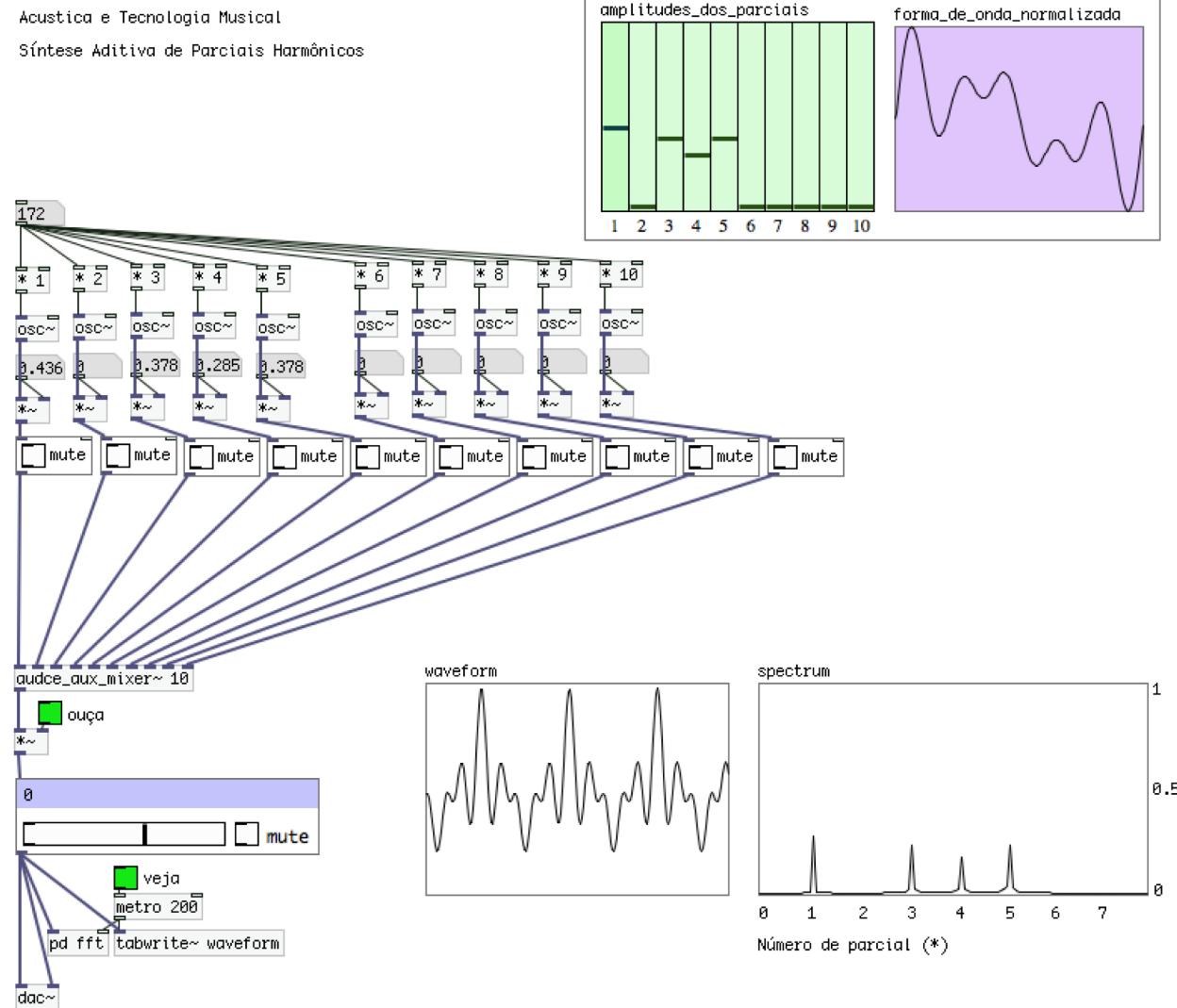
Síntese Aditiva

- Patch Pd
exemplo de uma
síntese aditiva

Patch permite definir a amplitude de até 10 parciais (harmônicas) →

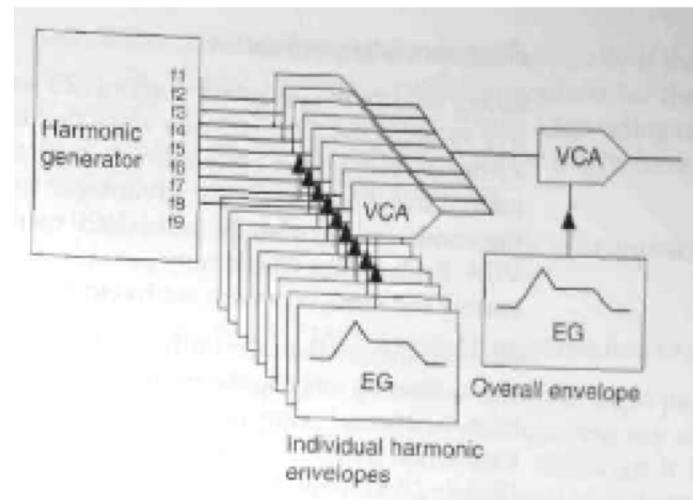
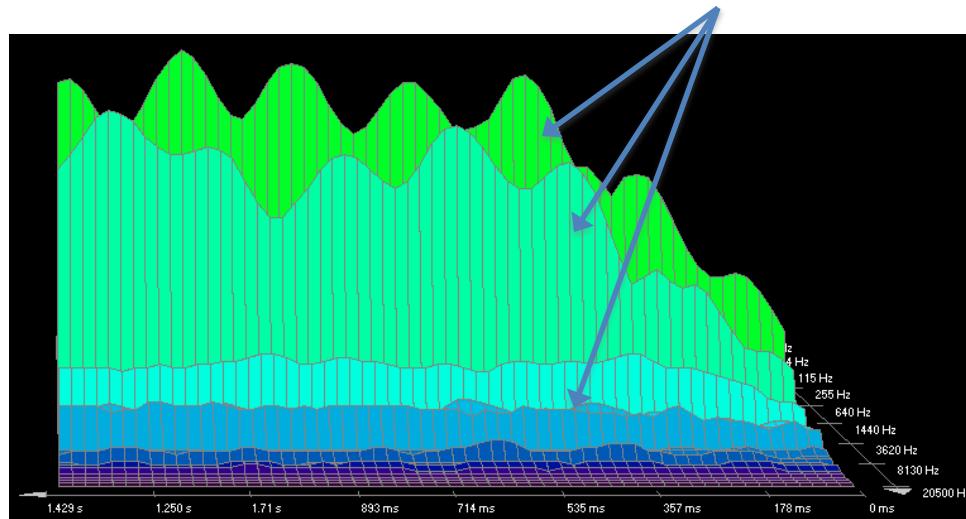
Cada seleção de amplitudes dará uma forma de onda (e um timbre) diferente.

Forma de onda e espectro resultante são mostrados na figura →



Síntese Aditiva com Formas de Onda Fixas

- Utilizar valores fixos de amplitude para cada parcial não irá produzir a diversidade característica do ataque da nota, somente o estágio de sustentação. Logo, não pode simular perfeitamente um som acústico
- Solução
 - Utilizar um gerador de envoltórias (EG), uma para cada parcial, cada uma gerando um perfil de amplitude $A(t)$ variando no tempo



Complexidade da Síntese Aditiva

- A síntese aditiva requer vários osciladores e possui uma complexidade crítica, que aumenta ainda mais se adotamos a solução anterior com envoltórias para cada parcial
- Podemos avaliar a complexidade e alta demanda da técnica calculando o número de amostras sonoras e operações processadas por segundo
 - Ex: $20 \text{ parciais} * 20 \text{ eventos (notas)} = 400 \text{ osciladores} * 44.1 \text{ kHz} = 17.640.000 \text{ amostras por segundo}$
 - Um oscilador típico pode envolver até 750 operações (algébricas) por amostra, o que daria um total de $13.230.000.000$ de operações por segundo
- Alta Demanda de Parametrização
 - Ex: $20 \text{ parciais} * 10.000 \text{ eventos} = 200.000 \text{ envoltórias, mais fases iniciais e freqüências a serem especificadas, etc.}$

Complexidade da Síntese Aditiva

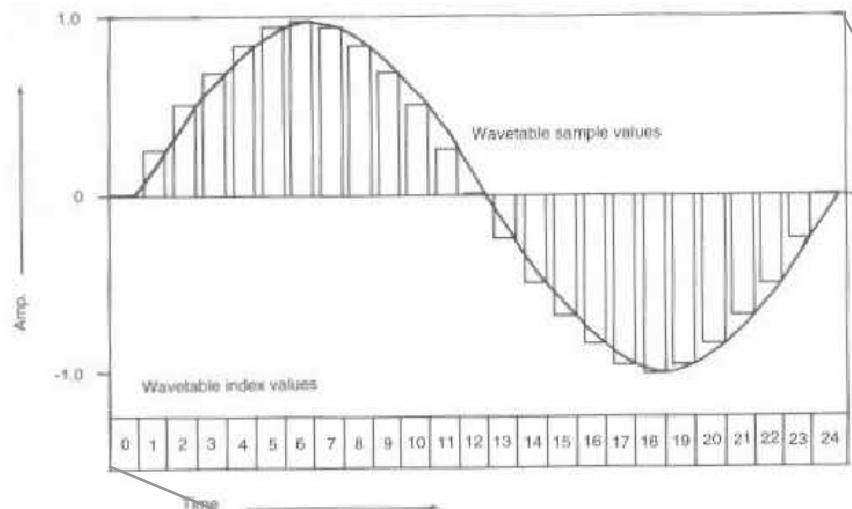
- Alta Demanda do Sistema...
 - Uma solução para diminuir a carga de processamento é utilizar um *oscilador por leitura de tabela de formas de onda*



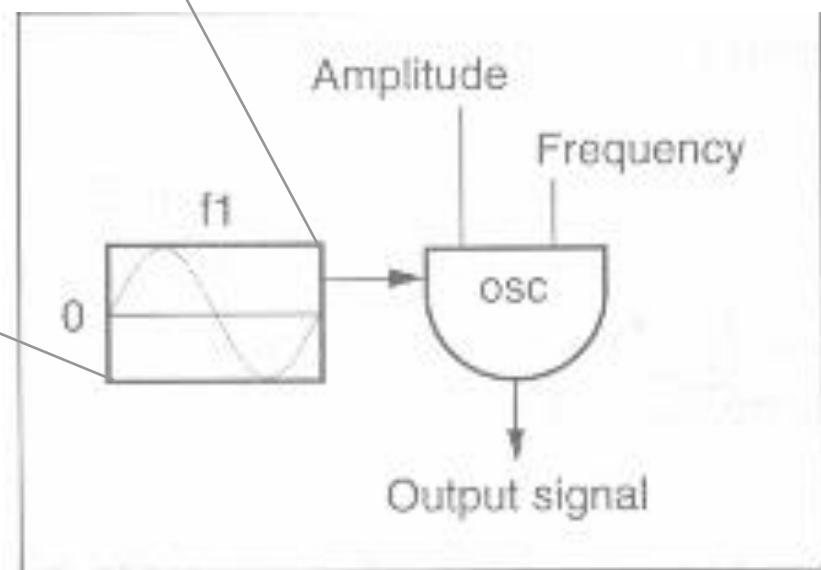
Síntese por Tabela de Formas de Onda

- Problema
 - É caro calcular individualmente as diversas senóides que compõe um determinado espectro
 - $f(t) = a_k + a_0\sin(f_0t + \theta_0) + \dots + a_n\sin(f_nt + \theta_n)$
- Solução: *Wavetable-lookup synthesis*
 - Armazenar valores pré-calculados de um ciclo (um período) da onda periódica em uma tabela denominada *wavetable*
 - Para gerar o sinal, lê-se continuamente (em *loop*) as amostras da tabela, replicando continuamente o mesmo período do sinal
 - Técnica é importante, sendo usada atualmente em outro contexto (síntese por amostragem)
 - Exemplo prático: oscilador por leitura de forma de onda

Oscilador por Leitura de Tabela



← A onda fundamental (um período) do oscilador (senoidal no caso) está amostrada e suas amostras são guardadas numa tabela



Oscilador Digital (*Lookup Table*)

- O algoritmo do oscilador digital (laço principal) lendo a tabela consiste em 2 passos:

Passo 1: $\text{ind} = \text{modL}(\text{ind} + \text{inc})$

Passo 2: saída = amplitude * wavetable [ind]

- Onde:
 - L é o tamanho da tabela (em número de amostras)
 - ind é o índice da amostra a ser lida. É um apontador para uma amostra na tabela de tamanho L amostras, um número variando entre 0 e L
 - Inc é o incremento (em número de amostras) que se pula em cada passo de leitura da tabela
 - $\text{modL}(\text{indice_da_amostra} + \text{inc})$ é uma operação do tipo Módulo, que extrai o resto da divisão de $(\text{indice_da_amostra} + \text{inc})/L$
 - O passo 2 faz a leitura do valor da amostra apontada pelo índice

Oscilador Digital (*Lookup Table*)

- Exemplo de execução do algoritmo, demonstrando quais amostras serão lidas da tabela e reproduzidas na saída para alguns valores dos parâmetros:
 - Suponha $L = 1000$, $\text{inc} = 1$ e amplitude = A
 - $\text{ind} = \text{mod}1000(0+1) \rightarrow \text{resto de } 1/1000 = 1$
 - saída = $A * \text{wavetable}(1)$
 - $\text{ind} = \text{mod}1000(1+1) \rightarrow \text{resto de } 2/1000 = 2$
 - saída = $A * \text{wavetable}(2)$
 - ...
 - $\text{ind} = \text{mod}1000(1000+1) \rightarrow \text{resto de } 1001/1000 = 1$ (retorna ao início da tabela!)
 - ...
 - A velocidade da leitura das amostras é determinada pela frequência de amostragem f_a utilizada, e juntamente com o incremento determinará qual a frequência final do som ouvido

Oscilador Digital (*Lookup Table*)

- Freqüência do som ouvido
 - Como o tamanho da tabela (L) e a f_a são fixos, a freqüência do sinal (Freq) dependerá do valor do incremento (inc)
$$\text{Freq} = \text{Inc} * f_a / L \Rightarrow \text{Inc} = L * \text{Freq} / f_a$$
 - Exemplo: Considere que $L = 1000$ e $f_a = 40000$ Hz
 - Para que $\text{Freq} = 2000$ Hz temos que $\text{Inc} = 50$
 - De fato, $\text{Freq} = 50 * 40000/1000 = 50 * 40 = 2000$ Hz
- A fase inicial é dada pela posição do índice no início da execução da leitura
 - A fase será diferente de zero se $\text{Ind} > 0$

Oscilador Digital (*Lookup Table*)

- Calculando a saída
 - Como fazer quando o valor do incremento que calculamos é um número real que não “bate” com a posição das amostras inteiras?
 - Uma solução é aumentar a quantidade de amostras da tabela, mas isto custa mais caro (requer mais memória para guardar uma tabela maior)
 - Outra solução é fazer uma *truncagem e/ou arredondamento* do índice, porém isso causa imprecisões geradoras de pequenas distorções denominadas “ruído da tabela de amostras”

Método corretivo

- Melhor método corretivo: *interpolação*
 - Valor que existiria caso fosse possível referenciá-lo na fase exata especificada pelo incremento
 - Possibilita sinais de boa qualidade com tabelas menores
 - Ex: Tabela[1024] no pior caso
 - Com interpolação linear = 104 dB SNR
 - Sem Interpolação = 48 dB SNR

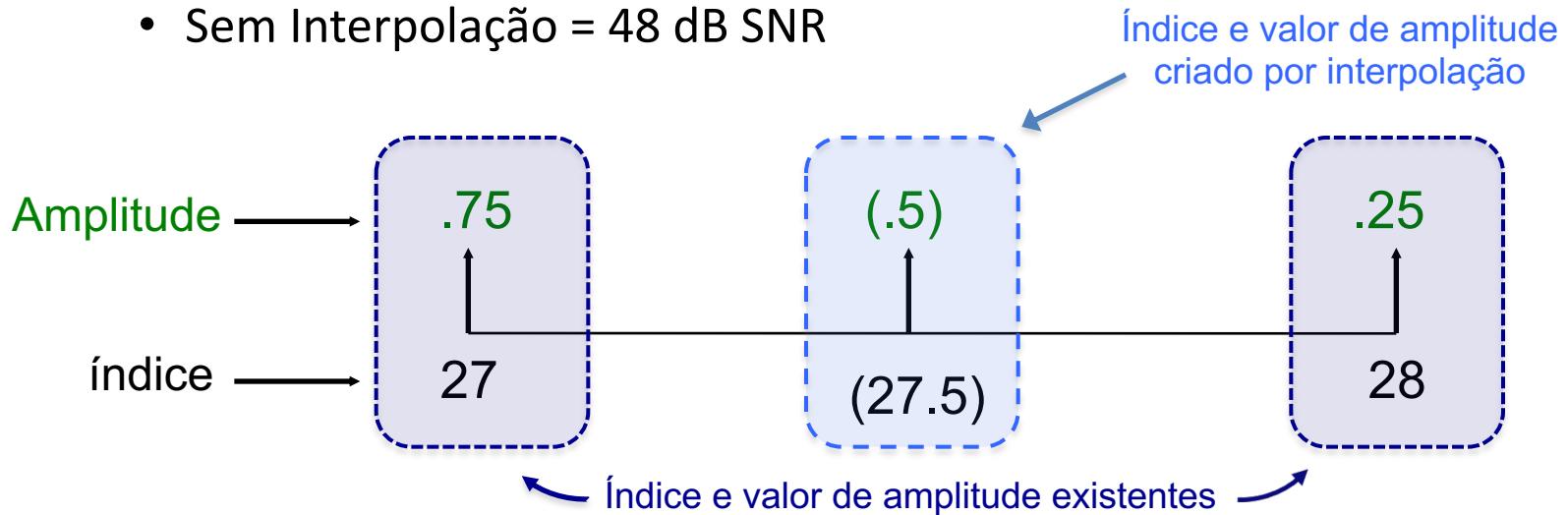
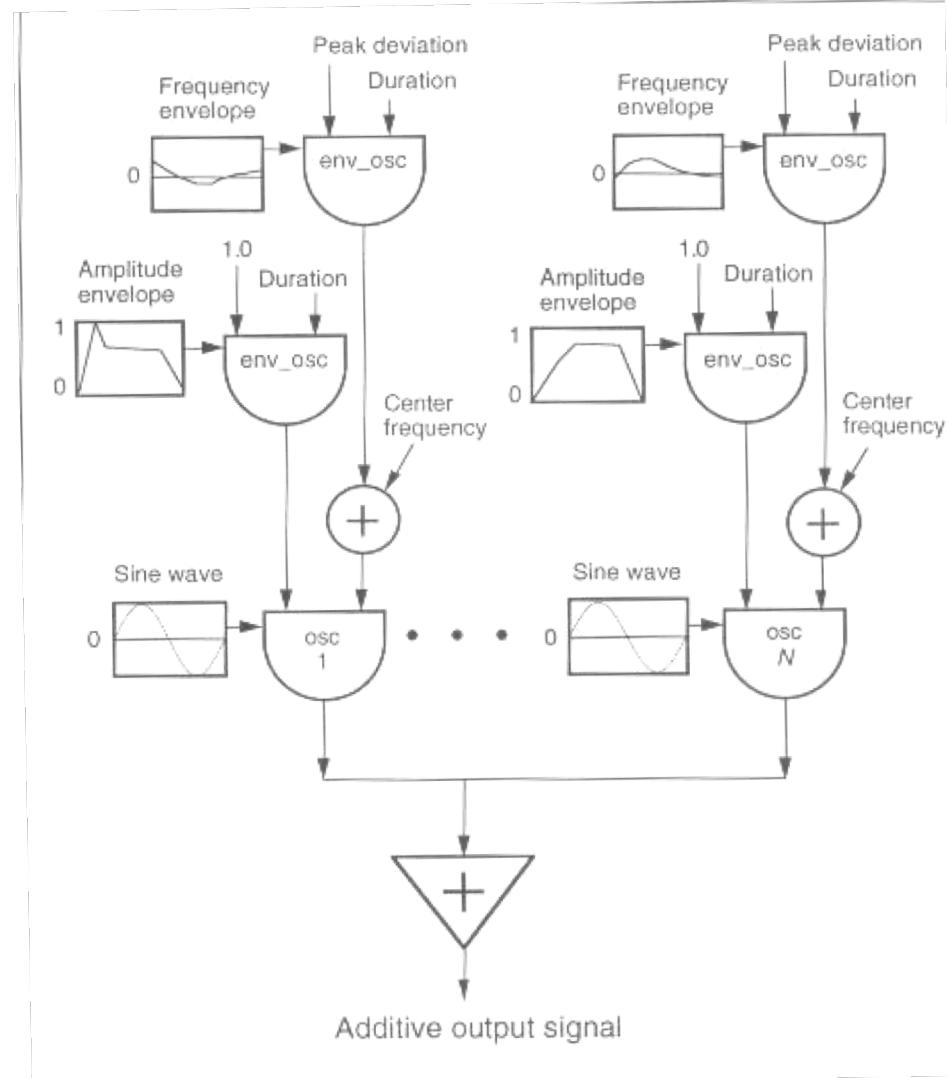


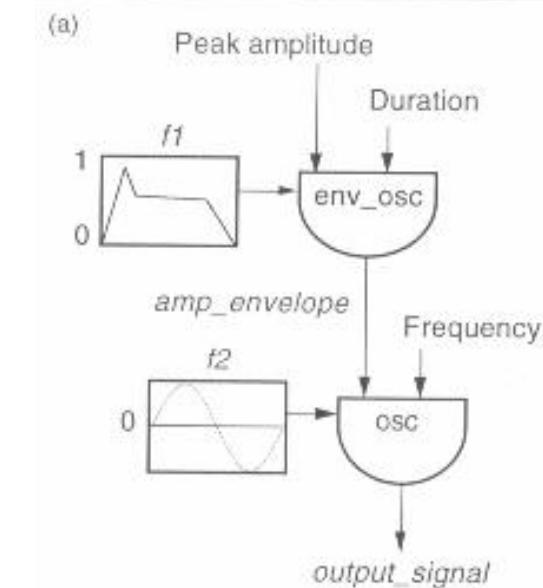
Diagrama de uma Síntese Aditiva

- No exemplo ao lado temos o *diagrama* de um instrumento de síntese aditiva usando envoltórias de frequência e amplitude
- Para cada parcial há um oscilador principal (abaixo) que tem sua amplitude definida por outro oscilador (*gerador de envelope de amplitude*, acima) e tem sua frequência definida pela associação de uma frequência central (fixa) mais uma variação produzida por um *gerador de envelope de frequência* (no topo)



Geradores de envoltórias

- Para controlar a variação no tempo dos parâmetros de amplitude e dos de frequência nós usamos geradores de envoltória (EG) de amplitude e de frequência
 - Estes possibilitam a geração de funções temporais dentre as quais a envoltória ADSR (*Attack, Decay, Sustain, Release*)



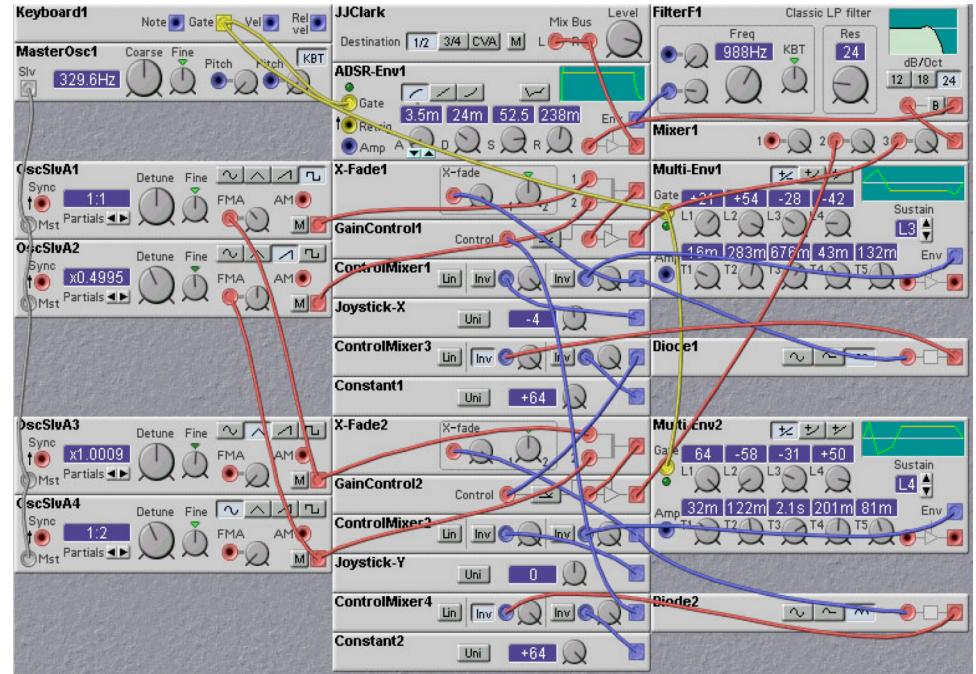
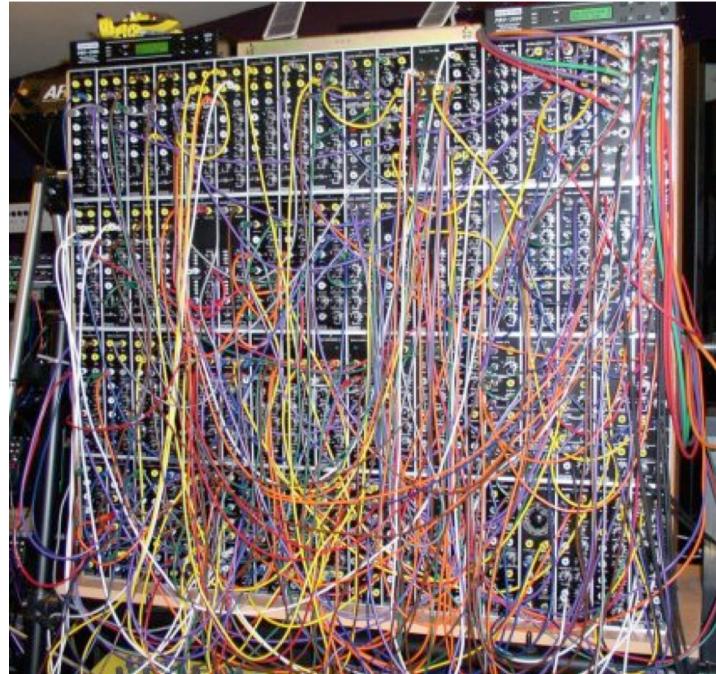
- Os valores de f_1 estão dentro da faixa de 0 a 1
 - Para forjar uma nota, só se passa uma vez pela tabela f_1
- O Incremento a ser usado na leitura da tabela do EG depende da duração do evento. Por exemplo, para uma nota de 2s a frequência do período será $f = 0,5$ Hz. Isto pode consistir em uma limitação pois em notas longas o ataque fica comprometido

Parâmetros da Síntese Aditiva

- Cada voz (isto é, cada parcial) é definida por vários parâmetros:
 - Frequência
 - Frequência central do oscilador (senoidal) de cada parcial
 - Envoltória de Frequência
 - início e duração da envoltória de frequência
 - Intensidade do desvio de freqüência proporcionado
 - Amplitude
 - Envoltória de Amplitude
 - Início e duração da envoltória de amplitude

Síntese por Software x Hardware

- Há 2 maneiras de se implementar a síntese:
por *Hardware* e por *Software*



Síntese por Hardware

- Características
 - Utiliza circuitos dedicados (análogicos e/ou digitais) e modulares
 - Tempo real porém mais limitada (~246 osciladores)
 - Disponível em sintetizadores comerciais e DSPs (*Digital signal processors*) nas placas de computadores
 - Controladores MIDI podem ser usados para controlar os módulos de síntese

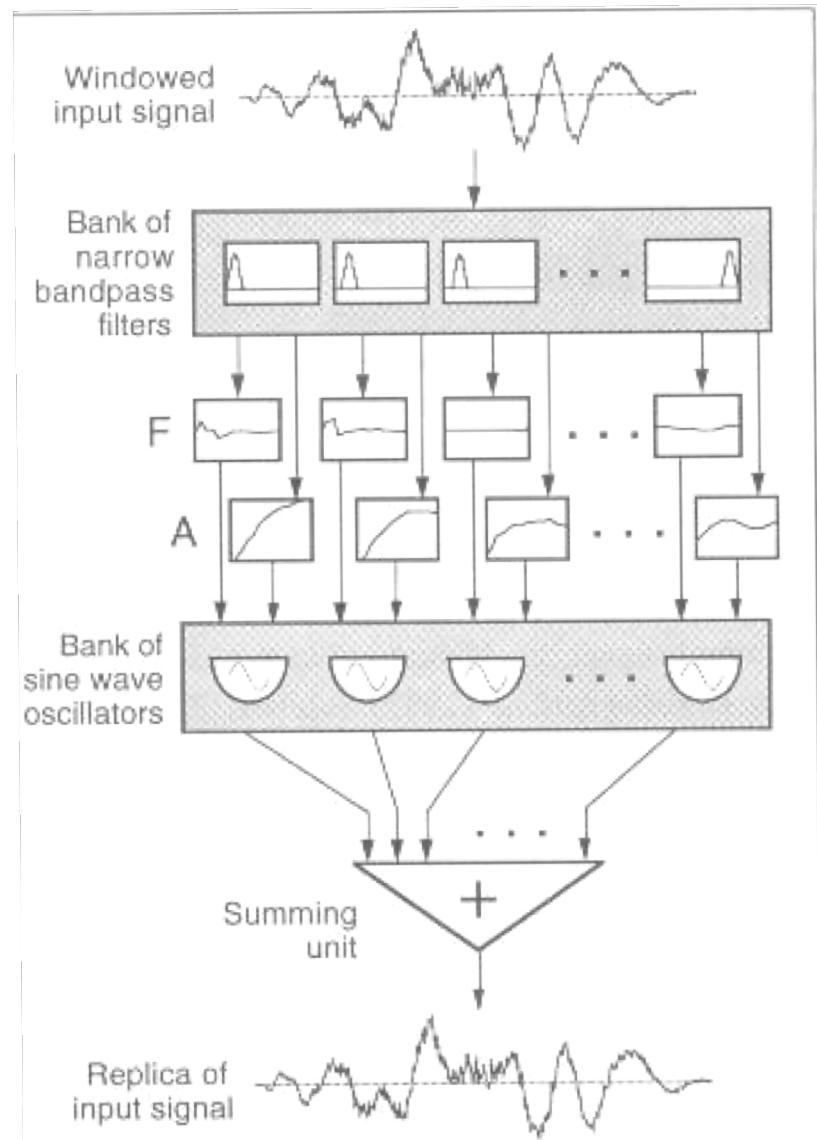
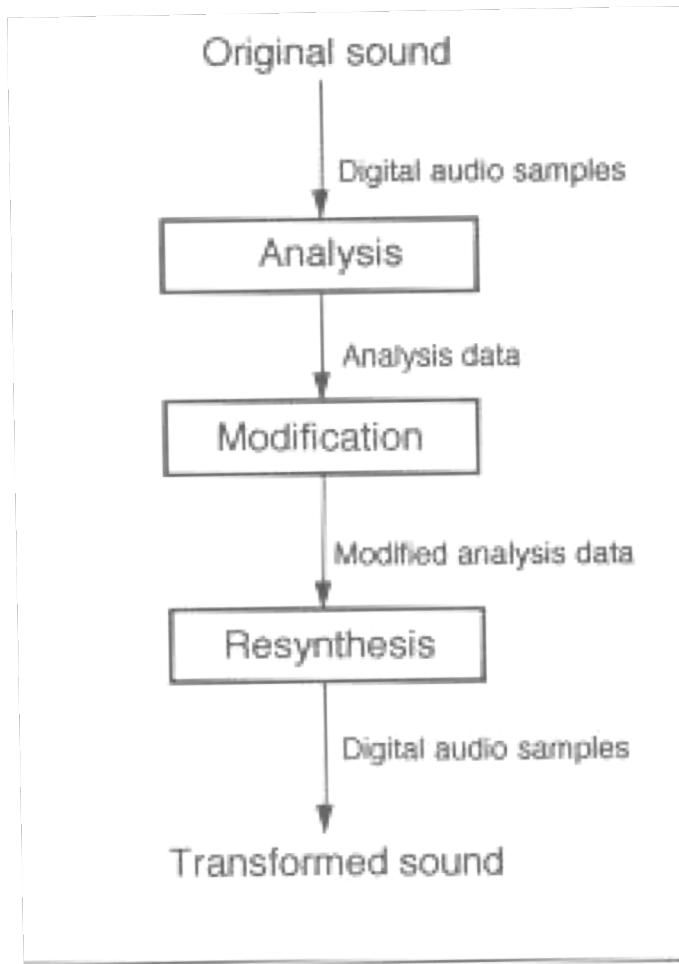
Síntese por Software

- Síntese direta por software
 - Gera amostras e vai armazenando-as em um arquivo (ex. wav) para posterior execução
 - Método original de síntese digital
 - Exemplos: Music V (Max. Mathews 1957), Csound, SOM-A, etc.
 - Demanda linguagens de síntese e, eventualmente, editores gráficos de instrumentos
- Prós e contras
 - + Total controle dos componentes do som (síntese e especificação) e polifonia ilimitada
 - Não é tempo real e processamento aumenta com a complexidade das partituras

Especificação de Sons

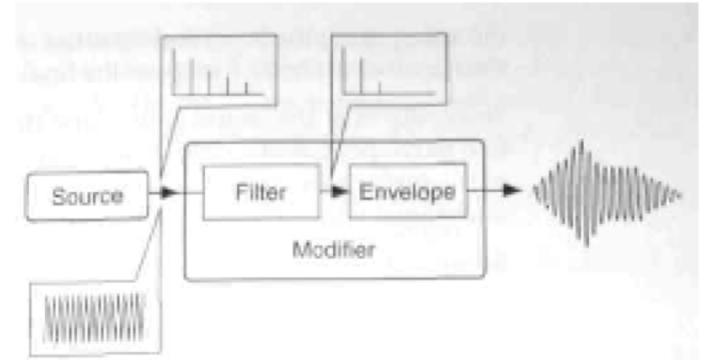
- Em qualquer processo de geração musical precisamos especificar os sons (orquestra) e os eventos sonoros (a sequência de notas)
- Partitura Musical
 - Orquestração (nome dos Instrumentos)
 - Notas com respectivas durações, alturas e articulações
 - Interpretação humana
- Partitura algorítmica
 - Objetos sonoros (Instrumentos)
 - Manipulação dos mesmos (notas)
 - Interpretação matemática

Análise/Síntese (Resíntese)



Síntese substrativa

- Método que toma uma fonte sonora rica em harmônicos e a filtra para remover parte do conteúdo harmônico, desta forma modelando o timbre
- São usados fontes de formas de ondas simples e ruídos
- A filtragem tende a ser um filtro passa baixa em que altera-se a frequência de corte p/ produzir o efeito característico



- O processo é realizado na seção Modificadora do sintetizador
- A modelagem da nota é finalizada por um gerador de envelope

Síntese FM

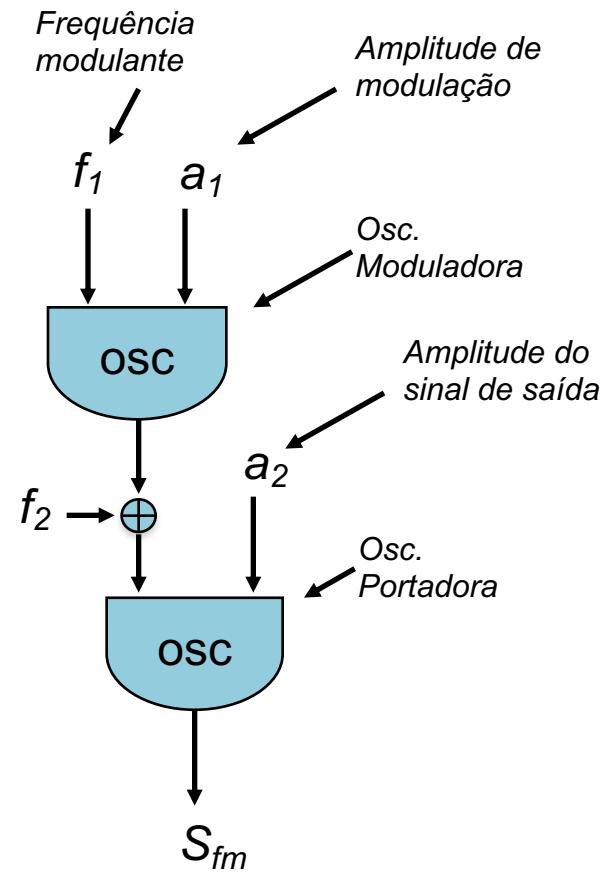
- Técnica em que um sinal (*modulador*) modula a frequência de outro sinal (*portadora*), usado em muitas interfaces de som comerciais, tipicamente em implementação digital
- Introduzida em síntese musical por John Chowning em 1973 e popularizada a partir da introdução da série de teclados Yamaha DX na década de 1980



Síntese FM

- Para FM em frequências audíveis, por exemplo com 2 senóides, o espectro da saída consistirá da frequência da *senóide portadora* f_2 mais *bandas laterais* de frequências formadas a partir da soma e diferença entre a portadora e múltiplos da frequência modulante (ou moduladora) f_1
- Matematicamente o processo é dado por:

$$S_{fm}(t) = a_2(t).OSC[f_2 + a_1(t)OSC(f_1)]$$



Síntese FM

- Este processo provoca um espalhamento de frequências no espectro, gerando um sinal de banda larga W
- O parâmetro formalmente mais importante na técnica de modulação em FM é o *índice de modulação*, dado por

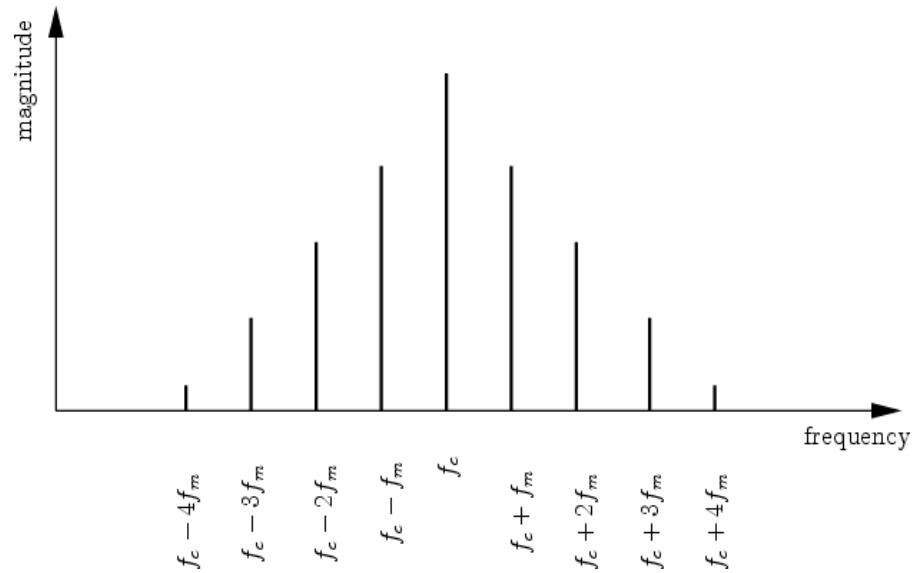
$$I = \frac{ka_1f_2}{f_1}$$

- Este índice expressa o máximo desvio possível da *portadora* f_2 em razão da modulação produzida por f_1 (*moduladora*), onde k é uma constante e a_1 é a amplitude da moduladora.
- Uma fórmula geral p/ FM será $S_{fm}(t) = a_2(t)\sin[2\pi f_2 t + I \sin(2\pi f_1 t)]$

Síntese FM

- Na prática, em síntese por FM há 2 parâmetros de controle importantes, que influenciam o espectro do som e seu brilho
 - A razão de modulação f_2/f_1 , que determina a largura das bandas laterais, e portanto o espalhamento dos sobretons
 - A amplitude de modulação a_1 , que controla a intensidade dos sobretons nas bandas laterais
- O número de bandas laterais será determinado pelo índice de modulação I , tal que a banda total W será composta das seguintes frequências:

$$W = \sum_{i=0}^I f_c \pm i \cdot f_m$$



Síntese FM

- Na prática o número de bandas produzidas será então limitado pela amplitude da modulação e a última banda lateral é obtida p/ $i = N$ tal que ($f_2 - N.f_1 \leq 0$)
- Exemplo:
 - Se f_2 (portadora/modulada) = 600 Hz e f_1 (modulante) = 100 Hz e $I = 3$, então teremos as seguintes frequências geradas no espectro resultante: 600, 700 e 500 ($i=1$), 800 e 400 ($i=2$), 900 e 300 ($i=3$), 1000 e 200 ($i=4$) e 1100 e 100 Hz ($i=5$)
- Serão portanto 11 harmônicos gerados somente com 2 osciladores senoidais simples, o que mostra o poder desta técnica

Síntese FM

- Se no índice de modulação a razão f_2/f_1 não for racional (isto é f_2 e f_1 não são inteiros) o espectro será *inarmônico*
- Se os sinais não forem senoidais mas formas de ondas complexas, o sinal resultante será mais complexo ainda
- Se $f_1 \leq 25$ Hz, então o FM produz um *vibrato*

Síntese FM

- Leitura p/ síntese FM:
 - J. Chowning, "The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation," *Journal of the Audio Engineering Society* 21(7), 1973; reimpresso no *Computer Music Journal* 1(2), 1977.
 - Music and Computers, Cap. 4 (The synthesis of sound by computer, section 4.7 FM synthesis) em
http://music.columbia.edu/cmc/MusicAndComputers/chapter4/04_07.php
- Ouça exemplos sonoros de síntese por FM no link acima, como estes aqui
 - 🔊 Portadora 100 Hz, moduladora 280 Hz, índice I variando de 6 a 0, som semelhante a um sino
 - 🔊 Portadora 500 Hz, índice I = 10, frequência variando de 500 a 5000 Hz

Síntese FM

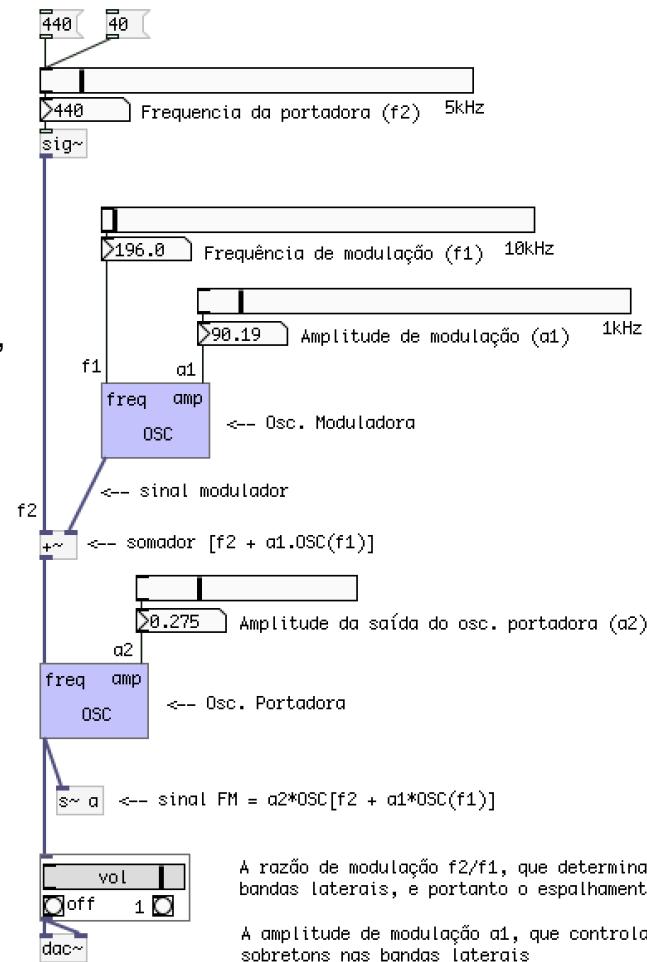
- Patch Pd
exemplo de uma síntese FM

Patch é implementado com 2 osciladores, e permite definir a frequência da portadora, da moduladora e as amplitudes respectivas

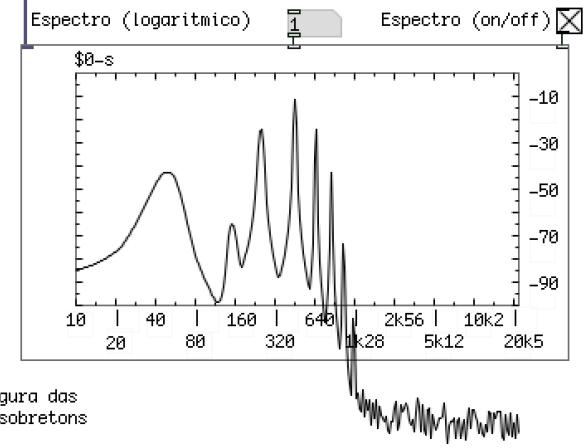
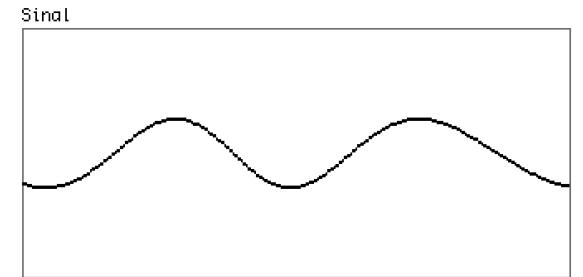
Cada seleção de frequências e amplitudes dará uma forma de onda complexa distinta

Forma de onda e espectro resultante são mostrados na figura →

TECNOLOGIA MUSICAL
Métodos de Síntese: Síntese FM

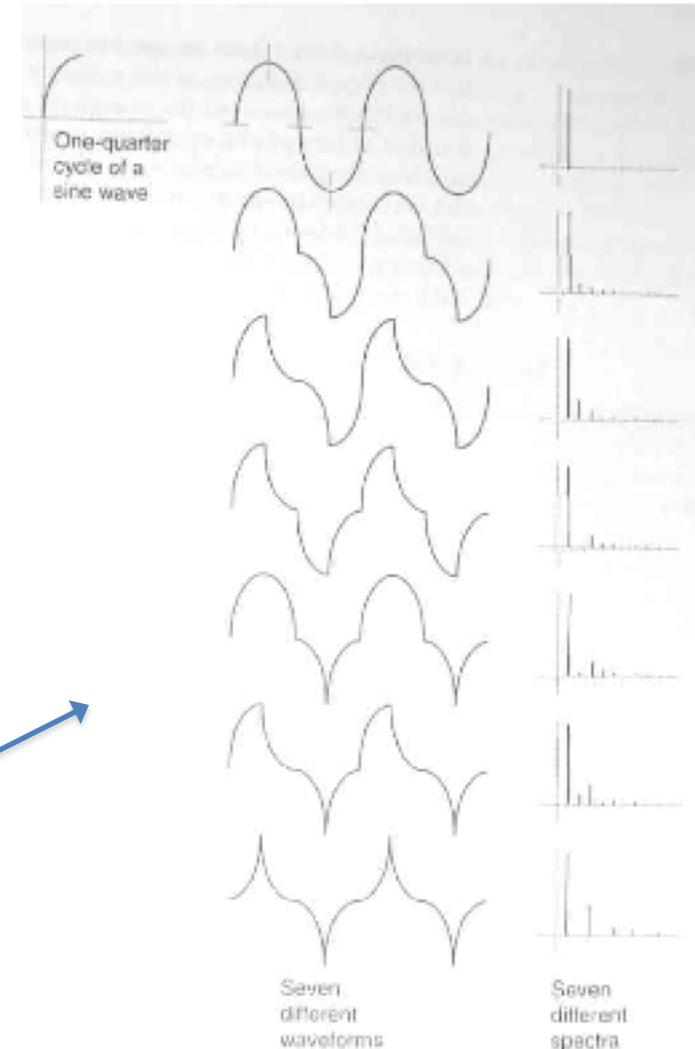


I=k a1.f2/f1
20.24
Índice de Modulação (k=0.1)
(qto. maior I, maior o no. bandas laterais)



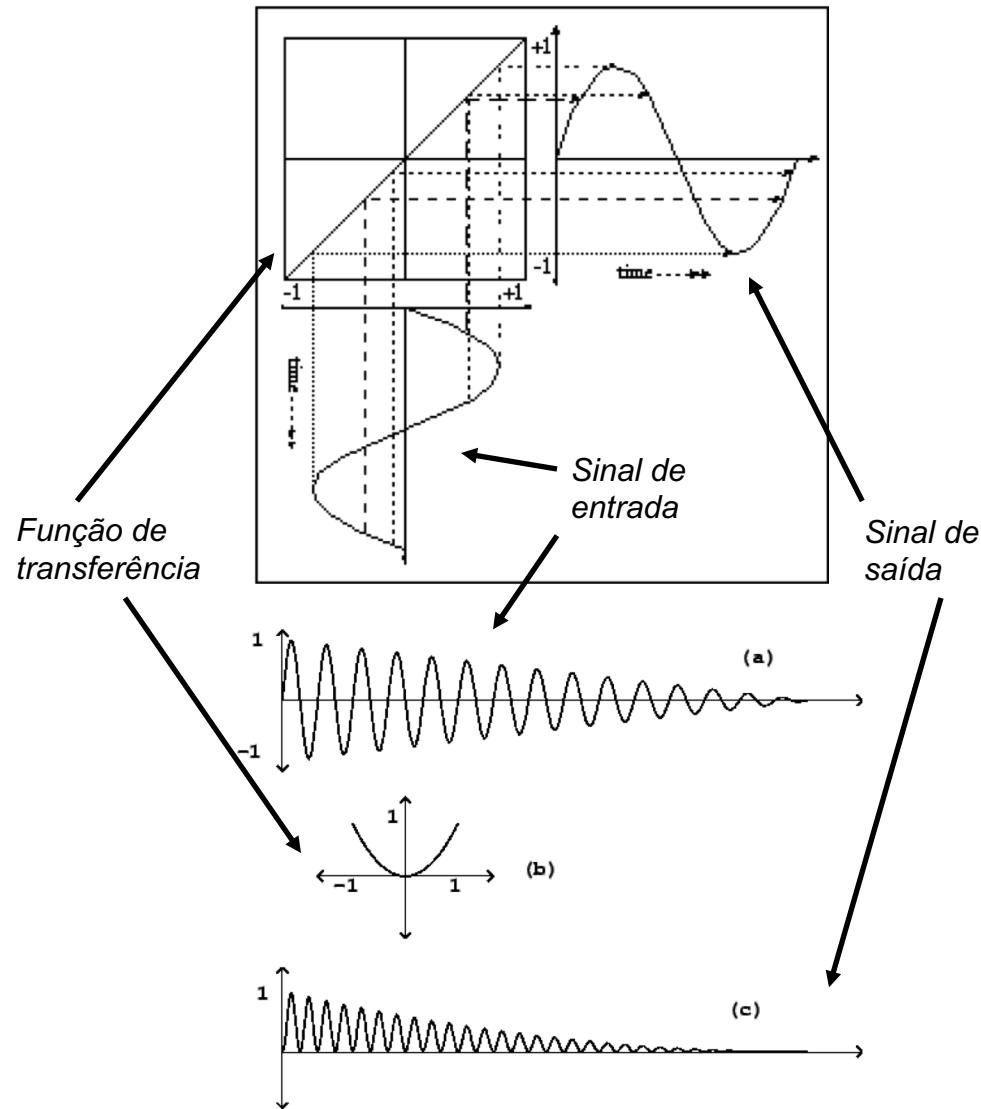
Síntese por formas de onda

- Também conhecida por síntese por modelagem da forma de onda
- Técnica de síntese em que podemos obter formas de onda periódicas complexas a partir da repetição de formas de ondas simples modificadas
- Para isso podemos por exemplo *explorar a simetria da forma de onda de referência*, gerando formas de ondas distintas com espectro diferentes



Síntese por formas de onda

- A modelagem da forma de onda pode ser feitas por muitos outros métodos, como por exemplo
 - Modificar a largura dos pulsos nas fases positivas e negativas (ver exemplos de VCO com PWM do Pd)
 - Modificar o ponto de entrada da forma de onda referência
 - Usar funções de transferência que modificam um sinal de entrada em outro sinal (como ao lado)

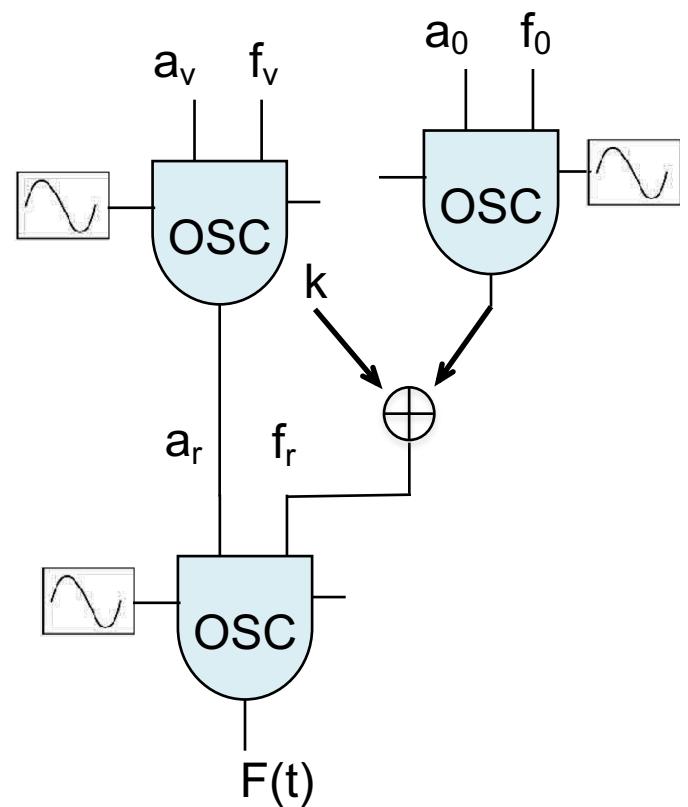


Outras técnicas

- Existem muitas variantes híbridas das técnicas aprendidas e métodos de síntese que empregam várias técnicas combinadas
- Citamos ainda como referência algumas outras técnicas importantes como
 - Síntese granular
 - Síntese FOF (*Fonction d'onde formantique*)
 - *Ring modulation* (modulação em anel)
- Estas técnicas são abordadas na literatura recomendada

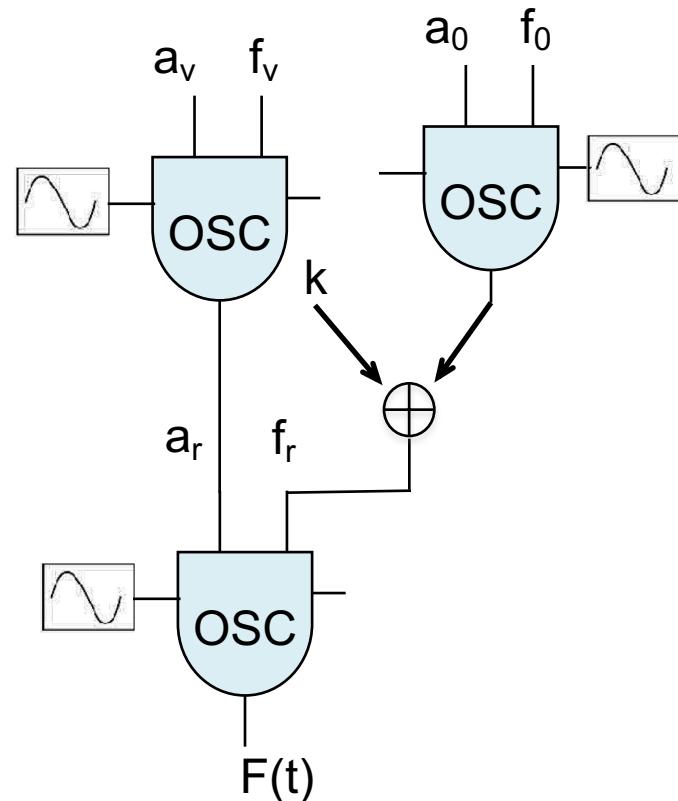
Exercício – Análise de um diagrama de síntese

- Analise o diagrama de síntese apresentado ao lado, observando as funções dos blocos básicos aprendidos, e verifique que operação de síntese está sendo feita.
- Derive uma expressão que represente o processo de síntese mostrado.



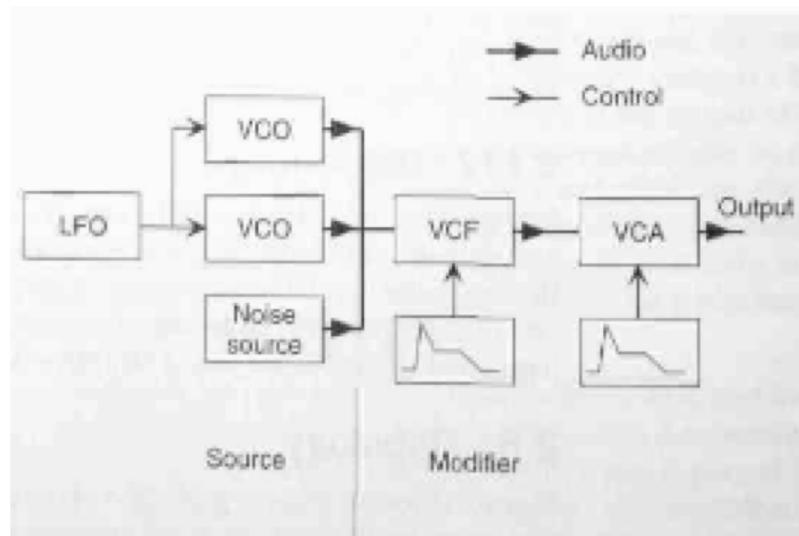
Solução do Exercício

- Temos que $F(t) = a_r \operatorname{sen}(2\pi f_r t)$. Mas $a_r = a_v \operatorname{sen}(2\pi f_v t)$ e $f_r = k + a_0 \operatorname{sen}(2\pi f_0 t)$. Substituindo os termos obtemos a expressão geral de $F(t) = a_v \operatorname{sen}(2\pi f_v t) \cdot \operatorname{sen}(2\pi(k + a_0 \operatorname{sen}(2\pi f_0 t))t)$
- O diagrama implementa uma síntese FM, em que k é a frequência portadora e f_0 é a moduladora.
- Adicionalmente, a amplitude de $F(t)$ é ainda modulada senoidalmente, o que produz um *tremolo*.



Revisão da aula

- Nesta aula vimos que a topologia básica de sintetizadores conta com uma *seção de fonte* seguida por uma *seção modificadora*
- Vimos os principais métodos de síntese, como a síntese aditiva e a síntese FM



Referências complementares

- David Marshall, Digital Audio Synthesis (CM3106, chapter 5, School of Computer Science & Informatics, Cardiff University, UK) ([disponível no edisciplinas](#))
- Luman Magnum, Synthesis by frequency analysis,
www.lumanmagnum.net/physics/fourier.html
- Mark R. Petersen, Musical analysis and synthesis in Matlab,
<https://amath.colorado.edu/pub/matlab/music/>
- Jérôme Sueur, Sound analysis and synthesis with R, Springer, 2018 (livro,
<https://link.Springer.com/book/10.1007/978-3-319-77647-7>)
- Perry R. Cook, Real sound synthesis for interactive applications, A K Peters, 2002 (www.cs.Princeton.edu/~prc/AKPetersBook.htm)