

# Processamento temporal

Prof. Regis Rossi A. Faria



# Tópicos da aula

- Nesta aula abordaremos os fundamentos de processamento sonoro temporal, os principais efeitos baseados na variação do parâmetro tempo, processadores típicos e aplicações práticas

# Introdução

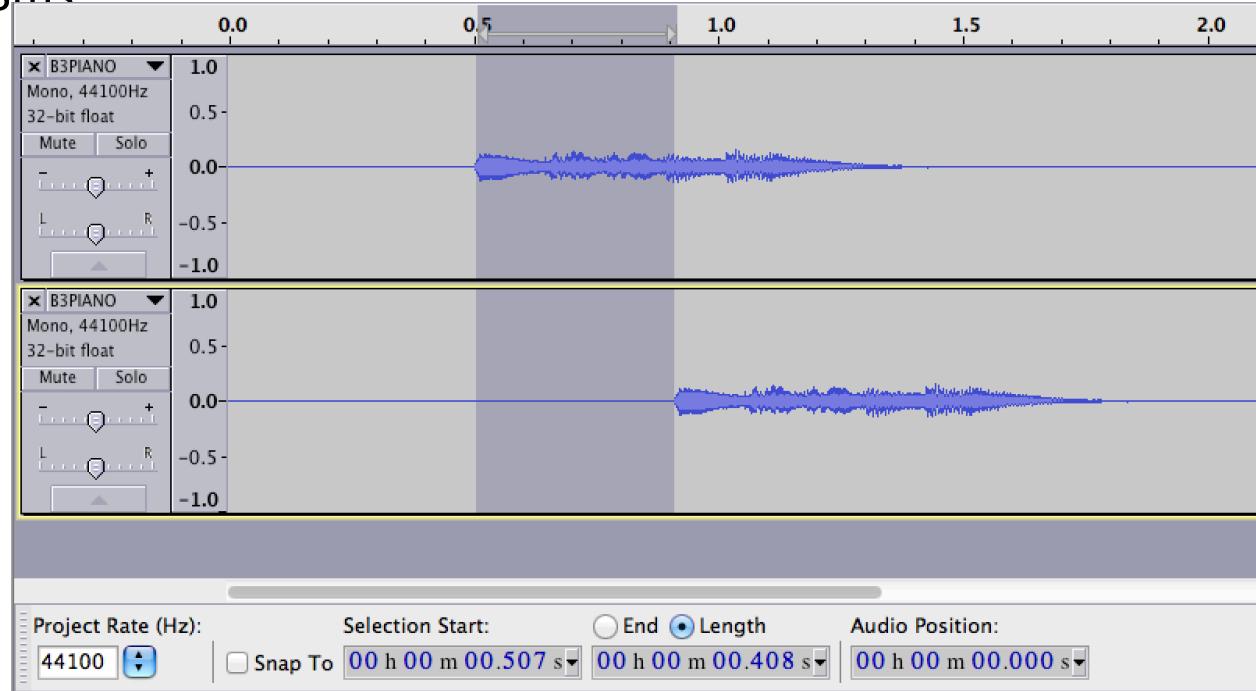
- Fundamentalmente efeitos sonoros são gerados por:
  - Atrasos de tempo
    - linhas de atraso de tempo (*delay lines*) (ex: eco, reverberação)
  - Variações de amplitude
    - envelopes (ex: tremolo, auto-wah)
    - compressores e compansores
  - Alterações no espectro
    - filtros (ex: distorção de guitarra, equalização)

# Efeitos de tempo

- Efeitos baseados no atraso de tempo (*time delays*) incluem:
  - reverberação e ecos
  - *chorus*
  - *flanger* e *phaser*
  - *pitch shifters* ou deslocadores de tom
  - *time-stretchers*

# Atraso de tempo (*time delay*)

- Um atraso de tempo entre dois sons é o tempo decorrido entre o início (ataque) de cada um deles
  - Ex: uma frase de piano, que toca a partir de  $t_1=507\text{ms}$  e uma cópia sua, que inicia a partir de  $t_2=915\text{ms}$ , tem um **atraso de tempo**  $\Delta t = 408\text{ms}$

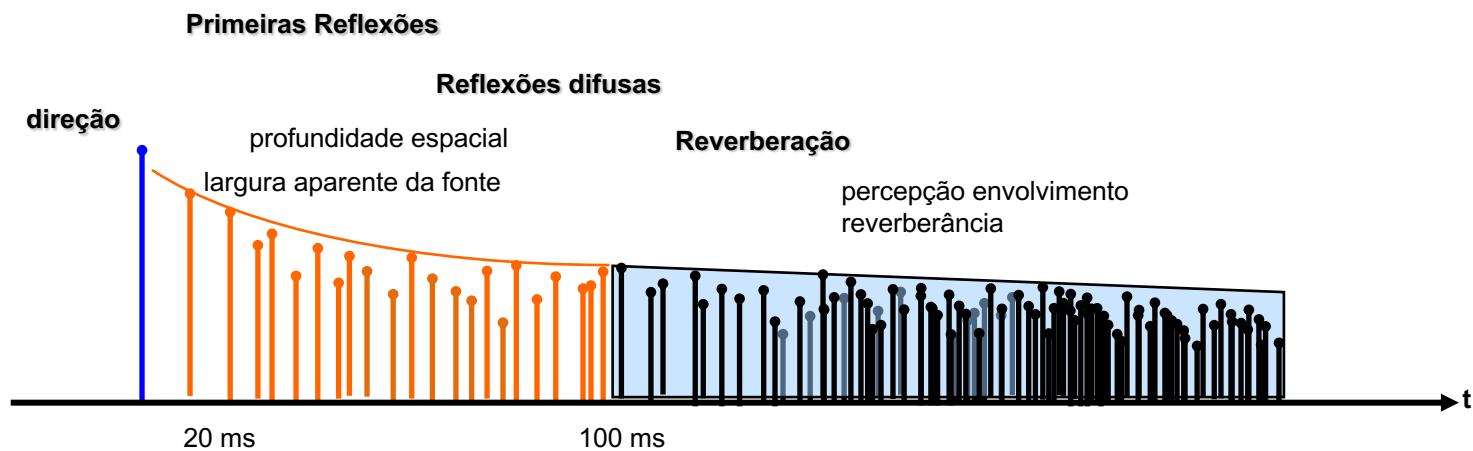


# Atrasos de tempo e reflexões

- Vários efeitos baseados em atrasos de tempo (como reverberação e ecos) são modelados como reflexões acústicas em um certo ambiente, e as reflexões acústicas podem ser implementadas por linhas de atraso do som combinadas (*delay lines*)
- Estes efeitos podem ser caracterizados e diferenciados em função da
  - Densidade dos reflexos,
  - Da amplitude dos reflexos
  - De sua distância no tempo (atraso) do som original
- Tais parâmetros são abstraíveis usando-se uma *curva de resposta impulsiva (impulse response)* do ambiente

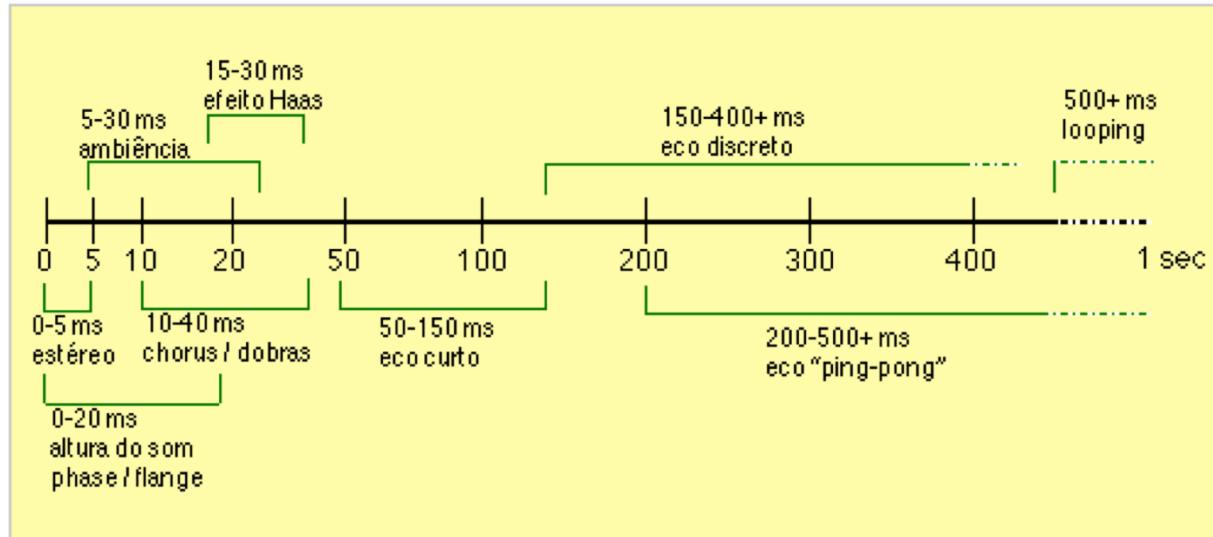
# Resposta Impulsiva

- A curva de resposta impulsiva (*Impulse Response* ou *IR*) mostra os reflexos de um som impulsivo registrados num ambiente acústico
- Ela permite caracterizar estes reflexos, sua densidade e intensidade em vários momentos posteriores à ocorrência do som direto
- Algumas regiões importantes são aquelas dos primeiros reflexos (20 a 100ms) e a região típica da reverberação (a partir de 100ms)



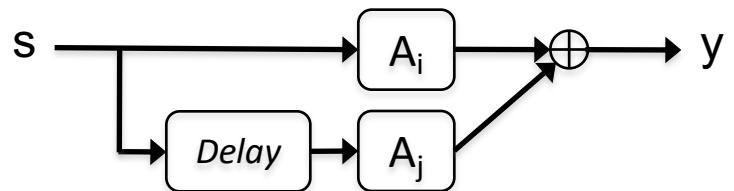
# Efeitos de tempo e seus atrasos

- Efeitos psicoacústicos distintos vão ocorrer dependendo do tempo de atraso dos eventos repetidos em relação ao som original ( $\Delta t$ )
- Os efeitos baseados em atraso de tempo mais populares apresentam diferenças de tempo diferentes, como sugere o quadro abaixo



# Linha de atraso de tempo

- Uma linha de atraso de tempo é produzida armazenando um sinal de áudio  $S$  em um buffer eletrônico por um certo período de tempo, para depois ser somado na saída de áudio
- O efeito mais simples é conseguido pela soma do sinal original  $S$  com uma versão de  $S$  atrasada, com um controle de ganho ( $A$ )



- Na maior parte das aplicações são necessárias muitas linhas de atrasos combinadas (*delays* múltiplos) que podem ser gerados por múltiplas linhas de atraso associadas e também pela reinserção repetida do sinal atrasado, como veremos a seguir

# Linha de atraso

- Um operador de atraso (*delay*) pode ser expresso como

$$y[n] = x[n - n_d], \quad n \in \mathbb{Z}$$

onde  $n_d$  é um inteiro que representa o atraso

- Podemos construir estruturas de atraso básicas como a seguir

# Linha de atraso

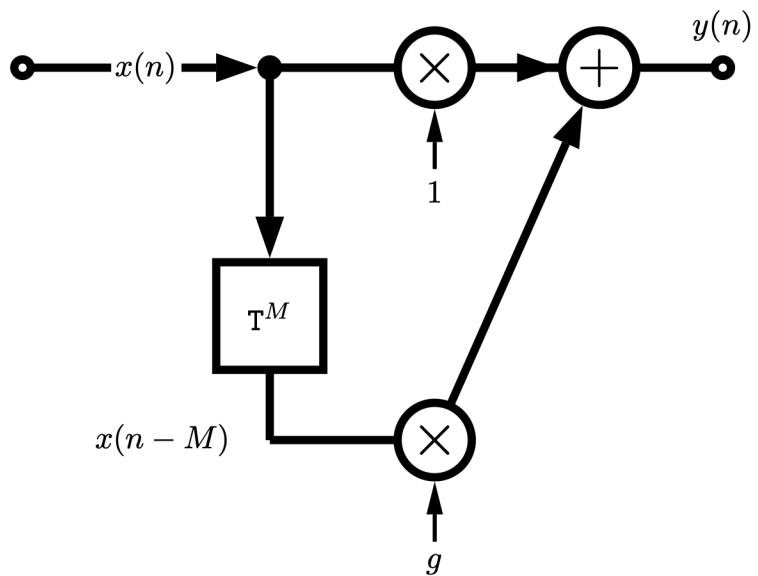
- O sinal de entrada é atrasado por uma quantidade  $\tau$  e o sinal atrasado é adicionado à entrada com ganho  $g$

$$y(n) = x(n) + gx(n - M) \quad \text{com } M = \tau/f_a$$

- Função de transferência:

$$H(z) = 1 + gz^{-M}$$

Isto equivale a um filtro FIR (finite impulse response)



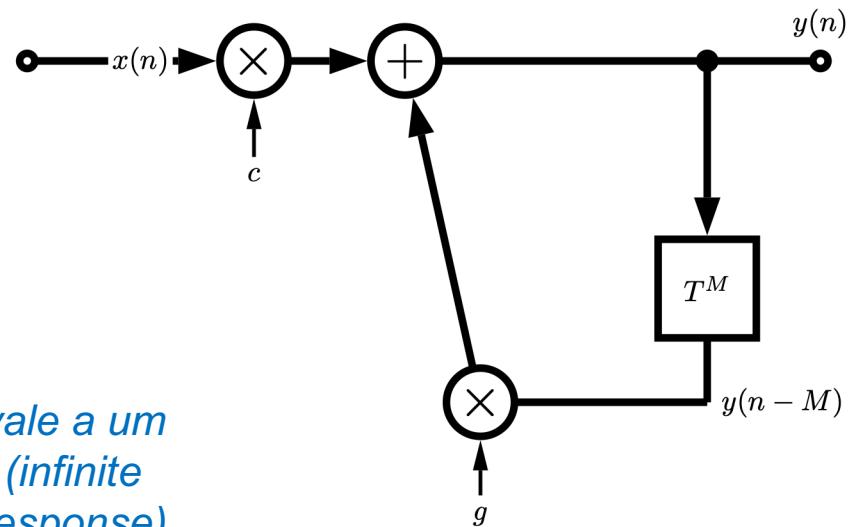
# Linha de atraso

- O sinal de entrada circula em versões atrasadas por uma quantidade  $\tau$  que é adicionado novamente à com ganho  $g$

$$y(n) = Cx(n) + gy(n - M) \text{ com } M = \tau/f_a$$

- Função de transferência:

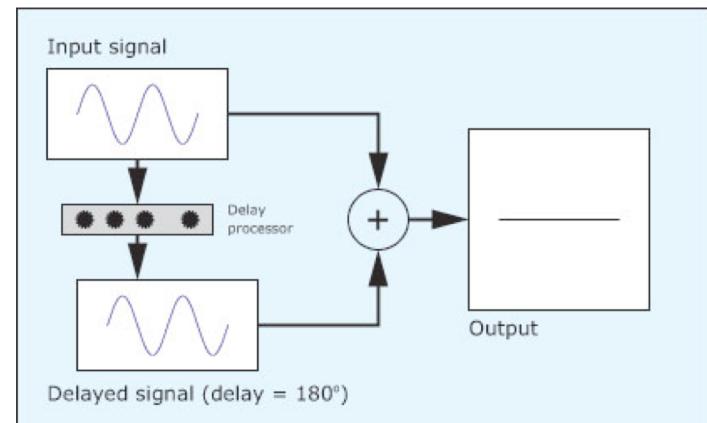
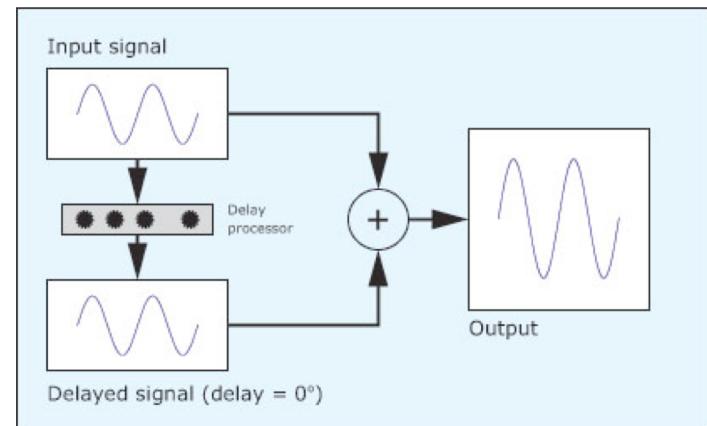
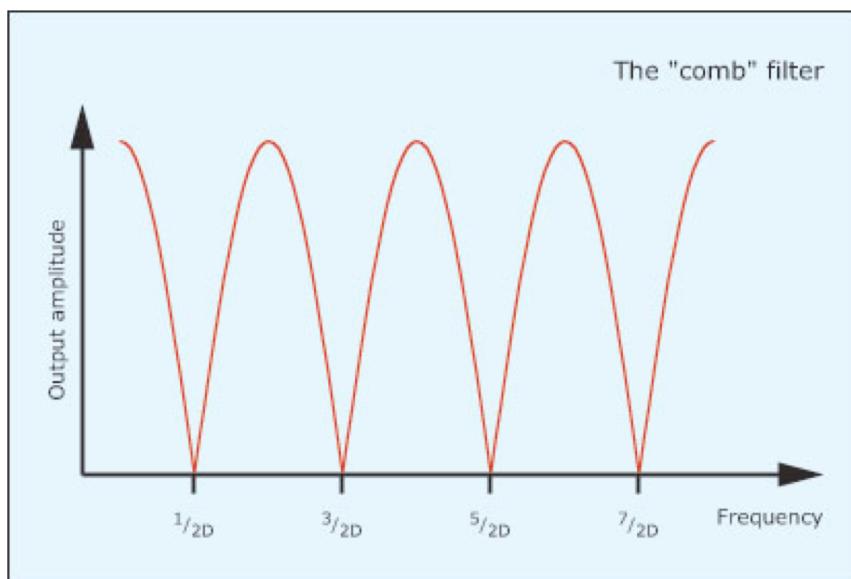
$$H(z) = \frac{c}{1 - gz^{-M}}$$



Isto equivale a um filtro IIR (infinite impulse response)

# Filtro pente (*comb filter*)

- Quando o sinal original é atrasado em relação ao sinal repetido ocorre um efeito conhecido por *comb filter* no qual as frequências cujos períodos estão diretamente relacionados ao tempo de atraso são atenuadas e reforçadas devido ao cancelamento de fase.



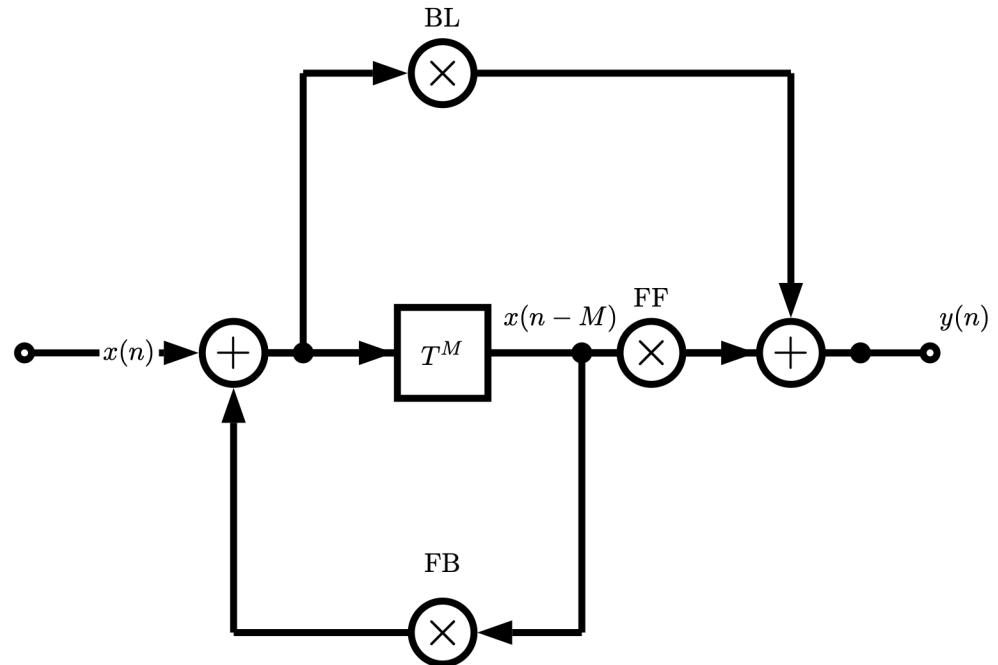
# Comb filter universal

- A combinação do atraso por FIR com atraso por IIR fornece uma matriz universal para um “comb filter” (filtro pente)

BL: opera uma soma  
da entrada com o  
feedback

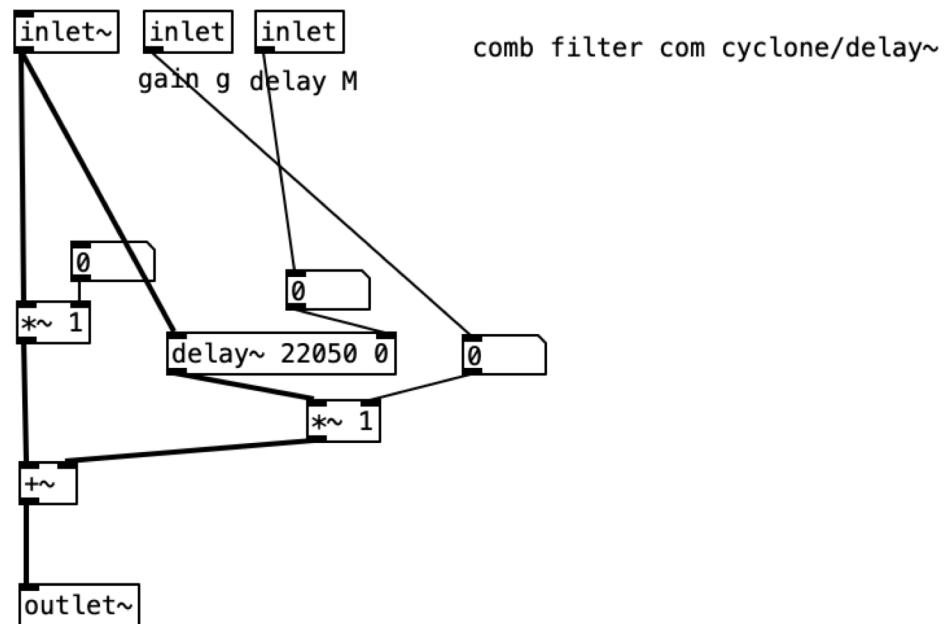
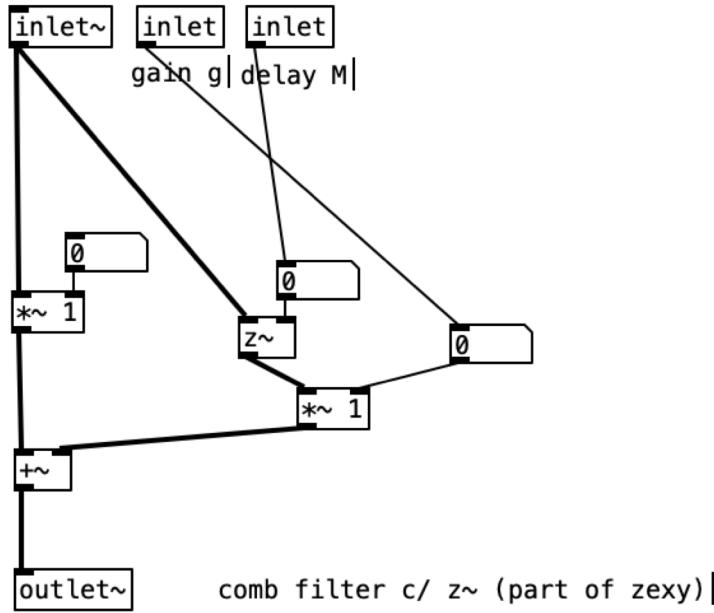
FF: implementa o FIR

FB: implementa o IIR



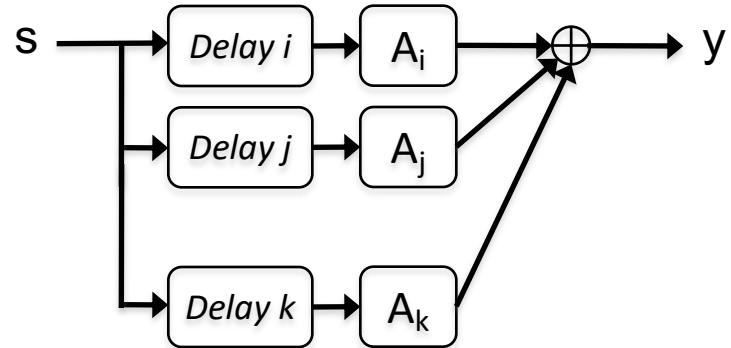
# Implementando *delays* com Pd

- Duas formas básicas para construir *delays* no Pd:



# Múltiplas linhas de atraso

- Efeitos como reverberação podem ser implementados por meio da associação de múltiplas linhas de atrasos de tempo: a soma de múltiplas ocorrências atrasadas do sinal original
- Cada linha de atraso pode ter associado um controle de ganho e/ou de filtro ( $A_i$  na figura)
- Uma forma útil de implementar linhas de atraso é criar um leitor da tabela do som  $s(t)$  para cada reflexão  $i$  lendo em uma posição  $t-t_i$  (um tempo passado) e aplicando um filtro  $A_i$  em cada linha (ex: envelope “*fade out*”)

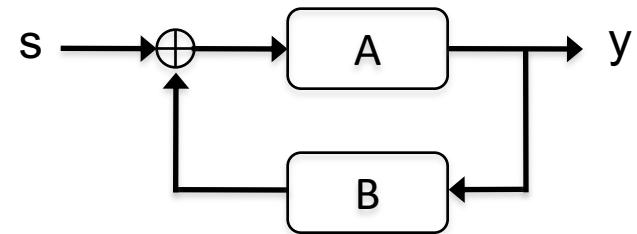


$$y = \sum_i A_i s(t - t_i)$$

- Se os atrasos forem em menor número e distantes o suficientes entre si, esta técnica pode ser usada também para implementar ecos

# Retroalimentação (*feedback*)

- Linhas de atraso de alta densidade podem ser implementadas por meio de *feedback*, em que o sinal resultante é reinjetado na entrada, multiplicando assim o número de sinais atrasados
- Este implementação é usualmente modelada como um filtro com *feedback*
- O sinal resultante  $y$  pode ser calculado por meio de uma função de transferência  $F_T$  que leva em consideração os atrasos, ganhos/atenuações e filtragens



$$y = A[s(t) + By]$$

$$y = As(t) + AB y$$

$$y[1 - AB] = As(t)$$

$$F_T = \frac{y}{s(t)} = \frac{A}{1 - AB}$$

# Linhas de atraso (*delay lines*)

- Parâmetros típicos

- *Delay time*: controla quanto tempo o buffer vai atrasar o som, ou seja, quanto tempo vai decorrer entre o sinal original e as repetições
- *Intensidade*: controla a intensidade do efeito
- *Feedback*: controla a quantidade de sinal atrasado que vai ser reinjetada na entrada do efeito. Aumentar o feedback significa aumentar o número de repetições e o tempo de decaimento do efeito.
- *Filtro passa-baixa* : Em ambientes acústicos reais, as frequências mais altas são atenuadas nos sons atrasados, e essa atenuação aumenta proporcionalmente ao número de repetições. Para simular esse efeito usa-se um filtro passa-baixa a cada repetição do sinal.

- Aplicações

- Produção artificial de ecos e reverberação
- Transformar um som mono em estéreo, tornando-o mais "cheio"
- Looping (repetir o mesmo som novamente)
- Produção de phaser, flanger, e chorus ("dobra" de vozes, atrasos de 20 a 40 ms)

# Reverberação e Ecos

- Objetivos
  - Criação de ambiência
  - Ênfase à percepção espacial correta: realismo (simulação)
- Caracterização
  - Reverberação e ecos podem ser caracterizados pelo padrão de reflexos em uma resposta impulsiva
  - São condicionados em função de aspectos físicos do ambiente sonoro, como a geometria, paredes e suas propriedades acústicas, como coeficientes de absorção/reflexão em função da frequência
  - São diferenciados pela densidade de reflexões e o tempo do atraso (em relação ao som original)
  - A grosso modo, a reverberação envolve uma densidade de eventos atrasados maior e mais concentrados numa faixa de tempo do que os ecos, que são mais espaçados e em menor número

# Ecos

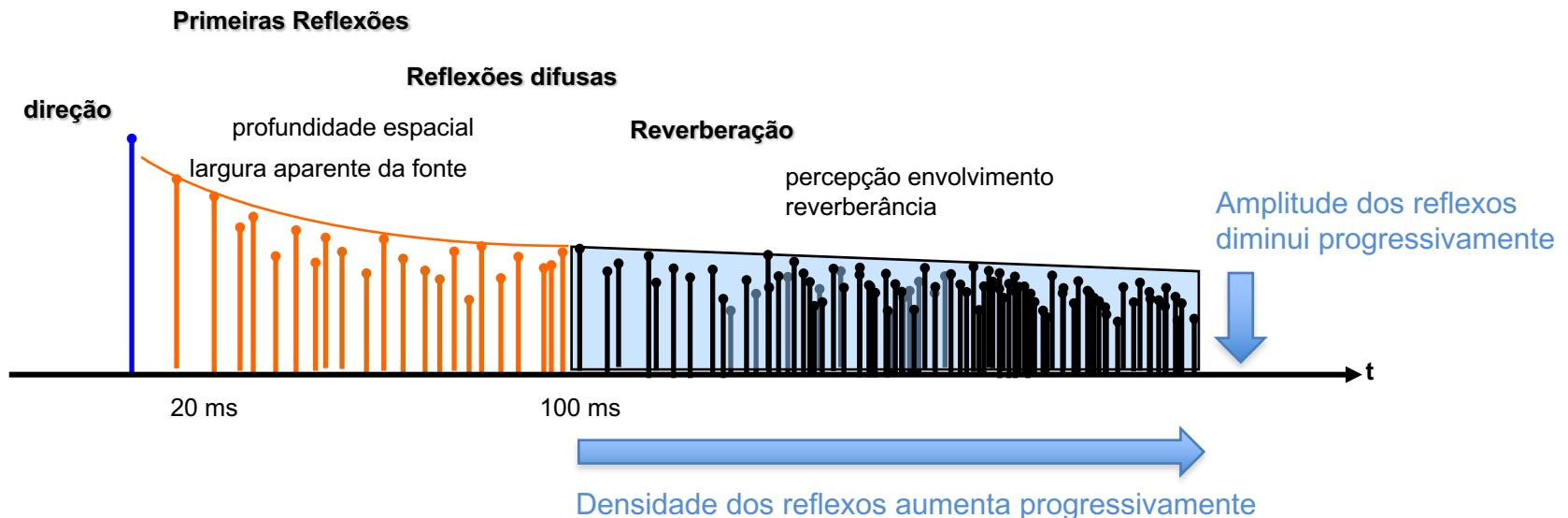
- Ecos são caracterizados por uma repetição do sinal original com alguma queda de amplitude e variação espectral e que ocorrem após um tempo suficiente para que sejam interpretados pelo ouvido como um som independente do original
- O eco simula um obstáculo refletor distante
- Em um sistema de síntese musical, sua implementação pode ser obtida repetindo-se a nota musical mais à frente, ou simplesmente re-disparando envelopes das notas (ex: pode-se usar um LFO para controlar o redispacho de notas com um período T adequado entre disparos)

# Reverberação

- Qualidade
  - Depende do ambiente: reflexos são filtrados segundo as propriedades acústicas das paredes (coeficiente de absorção e reflexão, variáveis em função da frequência)
- Uso
  - Enriquece o som
  - Disfarça erros
  - Realismo: ênfase à percepção espacial correta
  - Uso incorreto:
    - Voz com muita reverberação (perde inteligibilidade)
    - Piano com muita reverberação (mistura notas)

# Reverberação

- Na *curva de resposta impulsiva (IR)* a região correspondente à reverberação ocorre após os primeiros reflexos e é caracterizada por uma *alta densidade de reflexões* tanto do sinal original quanto de outros reflexos anteriores, com amplitude progressivamente menor, e percebidos como um reforço ou enriquecimento do sinal original

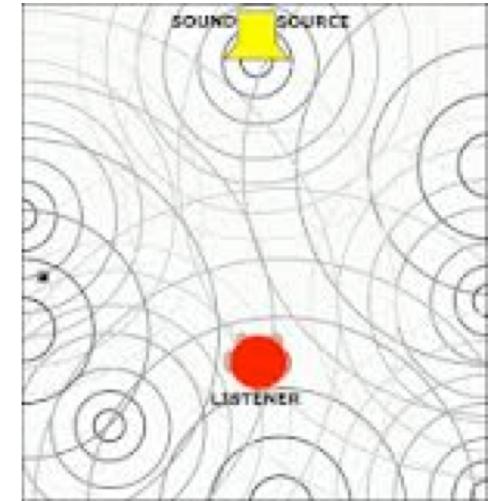


# Reverberação

- Implementação clássica
  - O efeito pode ser implementado por meio da associação de centenas ou milhares de linhas de atrasos de tempo, somando múltiplas ocorrências atrasadas do sinal original
  - Para manter o realismo, cada linha de atraso pode ter associado um controle de ganho e/ou de filtro associado, de forma a simular o efeito de atenuação e amortecimento que cada reflexo teria
  - Uma implementação muito mais eficiente, no entanto, é feita utilizando-se *feedback*, redes de realimentação

# Reverberação

- Histórico de sua implementação
  - A implementação da reverberação consiste na multiplicação de ecos, e desde 1920 inicia-se o interesse em ferramentas para criá-lo
  - Câmaras de eco: salas reverberantes especiais em estúdios
    - [Harmonicats](#) (1947)
  - Dispositivos especiais para reverberação mecânica: Reverb plate (1957)
  - Em 1970: *reverb* de mola (mecânico)
  - Com os sistemas baseados em fita e cabeçotes, surgiram os *reverb* de fita
  - De 1980 em diante: DSP (algoritmos de reverberação baseado em cálculo de reflexões geradas numa sala de dimensões conhecidas)



Fonte: <http://bobbyowsinski.blogspot.com>

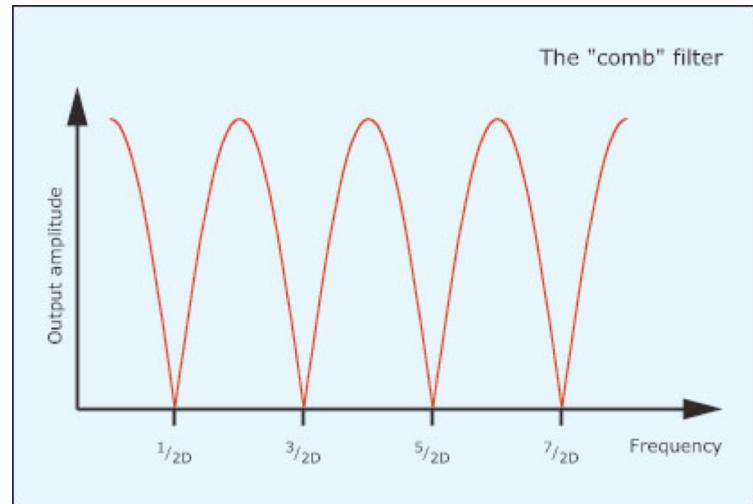


# Phaser, Flanger, Chorus

- O período das oscilações das ondas sonoras na faixa audível (20Hz - 20kHz) varia entre 50ms e 0,05ms
- Portanto, defasagens (isto é, *atrasos*) nessa faixa de tempo vão interferir na forma como oscilações periódicas são combinadas, produzindo cancelamentos e reforços de algumas frequências no sinal devido às diferenças de fase
- Este *atraso* relacionado às frequências sonoras é a base para 3 tipos de efeitos populares, a diferença entre eles estando ligada ao tempo de atraso usado (*delay time*). São eles:
  - Phaser
  - Flanger
  - Chorus

# Phaser

- O efeito de phaser emprega atrasos muito curtos, na faixa de 1 a 10 ms.
- Quando o sinal original é atrasado em relação ao sinal repetido ocorre um efeito conhecido por *comb filter* (filtro pente) no qual as frequências cujos períodos estão diretamente relacionados ao tempo de atraso são atenuadas ou reforçadas periodicamente (dependendo da relação de fases entre o sinal original e o sinal atrasado)
- O efeito de phaser requer ainda que o filtro *comb* se desloque na frequência, isto é, seja dinâmico (se move no espectro)



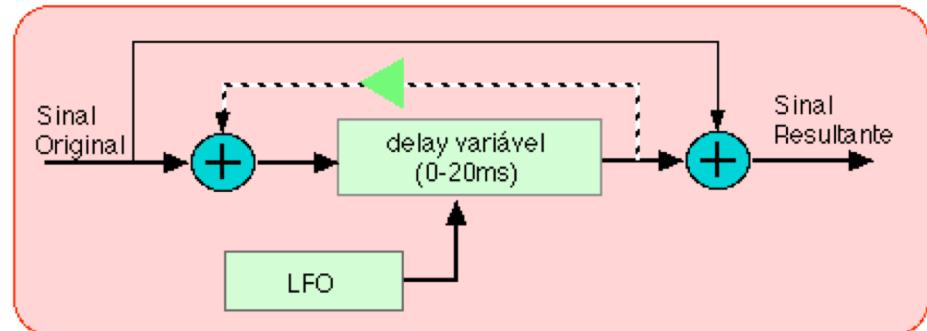
- Usando um modulador (como por exemplo um oscilador LFO) para mover esse filtro dentro de uma determinada região do espectro causará um cancelamento periódico de algumas frequências também variável
- Esse efeito é conhecido como phaser

# Phaser

- Na prática o atraso (*delay time*) usado deixa de ser estático, mas fica oscilando entre um valor mínimo e máximo (ex: de 1 a 10 ms)
- A qualidade do phaser é fortemente influenciada por esta taxa de variação (velocidade do efeito)
- Parâmetros típicos
  - *Rate* (taxa ou *speed* ): determina a velocidade com o que o modulador irá alterar o *delay* (que será igual à velocidade em que será varrida ciclicamente a faixa de espectro determinada)
  - *Range* : determina a faixa de atrasos (e portanto a faixa de espectro) a ser varrida pelo modulador
  - *Outros* : filtros, feedback loop.

# Flanger

- Esse efeito é muito semelhante ao phaser e foi usado pela primeira vez em uma gravação pelo inovador guitarrista Les Paul
- O efeito era alcançado com dois gravadores magnéticos contendo o mesmo material sonoro fazendo com que um dos gravadores diminuisse ocasionalmente a rotação para gerar uma diferença de fase entre os sinais
- Nos sistemas digitais, o flanger é obtido de modo semelhante ao phaser, com atrasos de 1 a 20ms e um modulador que varia o atraso regular ou randomicamente



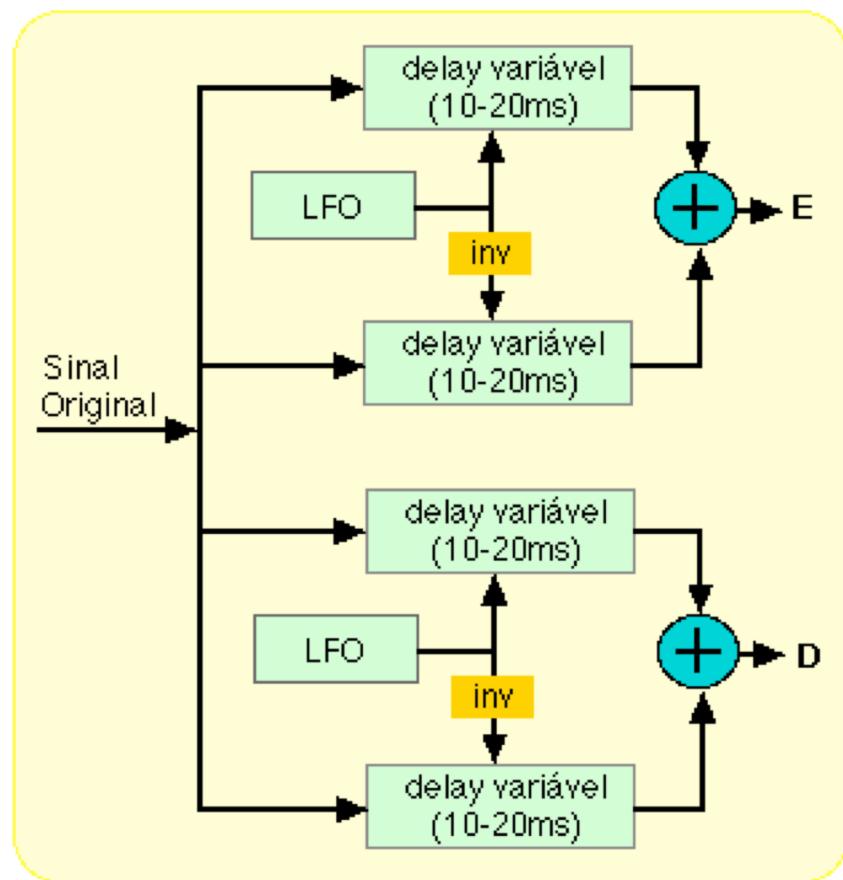
- Uma diferença entre phaser e flanger é que neste a atenuação e o reforço das frequências ocorrem em intervalos regulares, enquanto que no phaser isso depende da disposição dos filtros
- Além disso, no phaser o espaçamento, a largura e a intensidade (*depth*) podem ser variáveis. Em geral, flanger tem um efeito no campo das alturas mais pronunciado que o phaser

# Flanger

- Parâmetros típicos
  - *Delay*: Controla o tempo de *delay*
  - *Feedback*: Controla a quantidade de sinal processado que é reinjetada no efeito. Alguns permitem determinar se o feedback é positivo (em fase, acentua harmônicos pares, som mais metálico) ou negativo (fora de fase, acentua harmônicos ímpares, som mais "quente")
  - *Rate*: Controla a velocidade com que o modulador varia a o delay. Por exemplo, Rate= 0.1 Hz significa que o efeito fará uma varredura de um ciclo a cada 10 segundos
  - *Depth*: Em geral expresso como uma razão, especifica a relação entre o delay mínimo e máximo. Por exemplo, 6:1 pode gerar uma varredura de 1 a 6 ms ou de 3 a 18ms.
  - *Outros* : tipo de onda moduladora

# Chorus

- Atua introduzindo pequenas variações de afinação no sinal através de um *delay* gerando o efeito de "dobra" dos sons
- Geralmente produzidos em estéreo, utilizando delays mais longos que o flanger (10 a 30ms) e muitas vezes sem *feedback* (o que introduz um caráter artificial no som)
- Existem várias implementações de chorus. Geralmente, são empregados 2 *delays* variáveis modulados pelo mesmo oscilador, mas a saída de um oscilador é invertida antes de ir para um dos *delays* (o que elimina mudanças mais acentuadas na afinação)



# Chorus

- Parâmetros típicos

- *Rate*: Controla a velocidade com que o modulador varia o delay. Por exemplo, Rate= 0.1 Hz significa que o efeito fará uma varredura de um ciclo a cada 10 segundos
- *Depth*: Em geral expresso como uma razão, especifica a relação entre o delay mínimo e máximo. Por exemplo, 6:1 pode gerar uma varredura de 1 a 6 ms ou de 3 a 18ms.

# Deslocadores de tom

- Deslocadores de tom ou *Pitch-shifters*: fazem a transposição de uma altura para outra
- A operação age sobre o som  $s(t)$  como um todo deslocando todo o seu envelope espectral  $S(\omega)$  na frequência
  - Exemplo: Transpondo  $S(\omega)$  uma oitava acima para  $S'(\omega) = S(2\omega)$  → a amplitude de  $S'$  em 880 Hz será igual a de  $S$  em 440 Hz [ isto é  $S'(880 \text{ Hz}) = S(440)$  ]

# Deslocadores de tom

- O deslocamento do tom (*pitch shift*) para cima ou para baixo ocorre naturalmente devido ao aumento ou à redução respectivamente na velocidade de reprodução do som no tempo
  - Exemplo: dobrando-se a velocidade de reprodução, o trecho que era tocado em  $x$  segundos será tocado em  $x/2$  segundos, as oscilações serão 2x mais rápidas portanto as frequências serão 2x mais altas
- No entanto é possível implementar uma transposição (*pitch-shift*) sem alterar o tempo (duração) dos eventos sonoros utilizando-se de técnicas mais sofisticadas que operam sobre fragmentos (ou grãos) do som

# Esticadores de tempo

- Esticador de tempo ou *Time-stretcher*: modificam a duração do evento sonoro sem no entanto alterar seu *pitch* (isto é, aumentam ou diminuem a duração do som sem transposição)
- O efeito pode ser obtido segmentando a forma de onda em pequenos fragmentos (grãos) e rearranjando a forma como eles são reproduzidos em sequência
- Para aumentar a duração os grãos são repetidos mais vezes, e para reduzir, eliminam-se grãos da sequência a fim de tornar o som mais curto

# Processador tempo-frequência

- Um tipo de processador que pode ser usado para fazer ambos os efeitos – a transposição (*pitch-shift*) e a alteração na duração (*time-stretch*) – é um *processador de tempo-frequência*
- Pode-se usar os efeitos de forma independente, sem que uma transposição modifique a duração e vice-versa
- A modificação de pitch e duração pode ser acompanhada numa representação do som que mostre ao mesmo tempo a dimensão de tempo e a dimensão de frequência – um espaço tempo-frequência ( $t \times f$ )

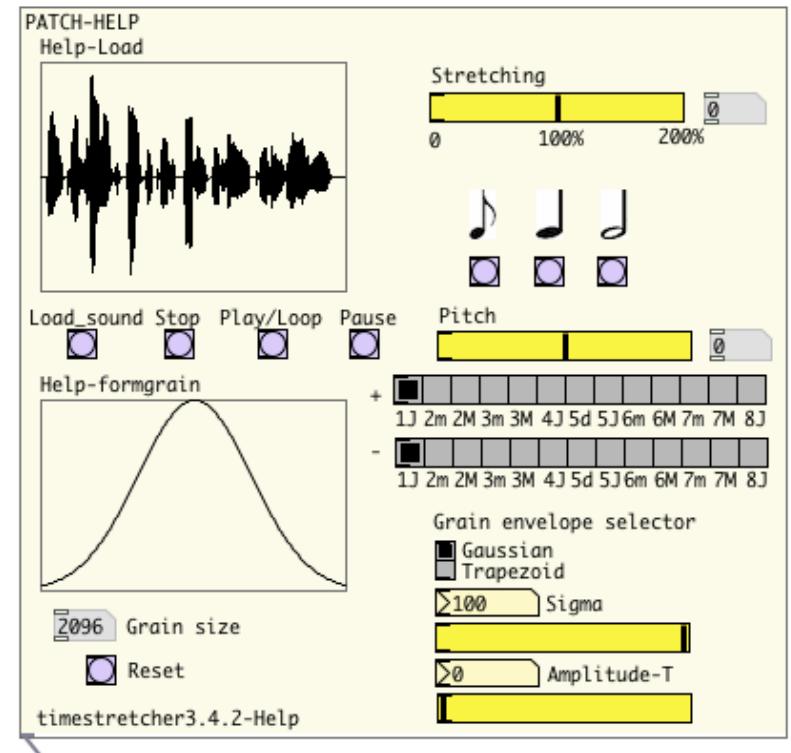
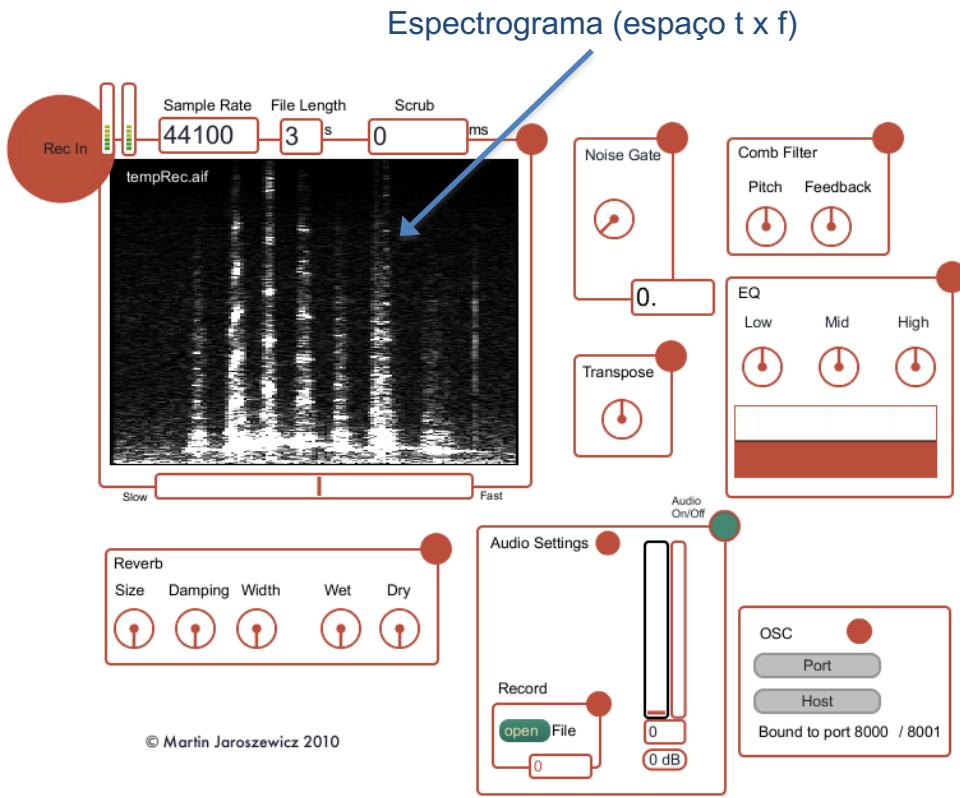
- Esta forma de representação é comum nas *partituras* e nos *espectrogramas*



- É possível com um *software* adequado implementar meios de esticar ou encurtar regiões deste espaço, o que vai levar a efeitos combinados de *pitch-shift* e *time-stretch*

# Processador tempo-frequêcia

- Exemplo 1: *Spectral Tools* (M. Jaroszewicz 2010)
- Exemplo 2: *Reactive time-stretcher* (LATM, DM-USP, 2013)



# Recursos (hardware e software)

- Hardware
  - Gravadores portáteis, placas de áudio PCI, Firewire, USB
  - Geradores de efeitos e processadores de amplitude, frequência e sequenciadores
- Software
  - Programas geradores de efeitos
  - Plugins e programas de edição multipista e multicanal (Audition, Pro Tools, Cubase, Logic, etc.).

# Revisão da aula

- Nesta aula apresentamos os principais tipos de processamento temporal e os principais efeitos sonoros derivados
- Conhecemos os princípios de funcionamento dos efeitos e técnicas de implementação destes processamentos