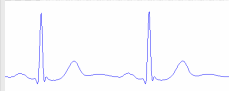


Processamento de sinais eletrocardiográficos

João Luiz Azevedo de Carvalho, Ph.D.
<http://www.ene.unb.br/~joaoluiz>



Universidade de Brasília
 Faculdade UnB-Gama
 Especialização em Engenharia Clínica
 13 de março de 2010

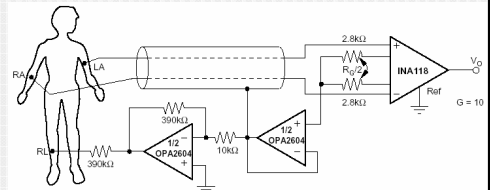
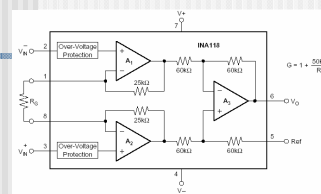
Organização da aula

- Eletrocardiograma
 - Aquisição do sinal
 - Redução de ruído
 - Detecção de QRS
- Variabilidade da frequência cardíaca
 - O que é? Pra que serve?
 - Construção e processamento do sinal
 - Análise no domínio do tempo
 - Análise com técnicas geométricas
 - Análise no domínio da frequência
 - Análise tempo-frequência

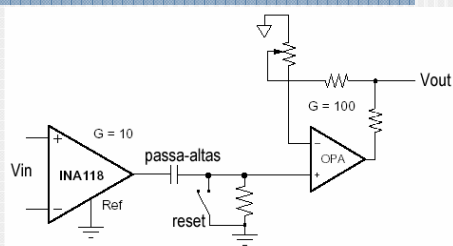
Eletrocardiograma

Aquisição do sinal de ECG

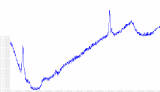
Aquisição do ECG: INA



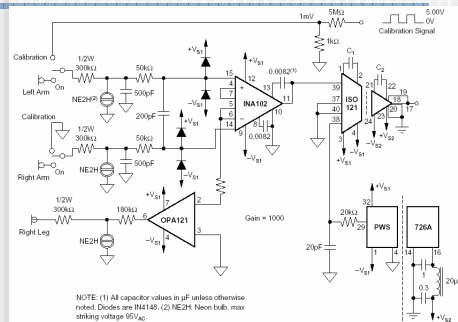
Aquisição de ECG: segunda etapa



Cuidado: proteção ao equipamento e ao paciente!



Aquisição do ECG: isolamento



NOTE (1) All capacitor values in μF unless otherwise noted. Diodes are 1N4148. (2) NE2H Neon bulb, max striking voltage 55V_{AC}.

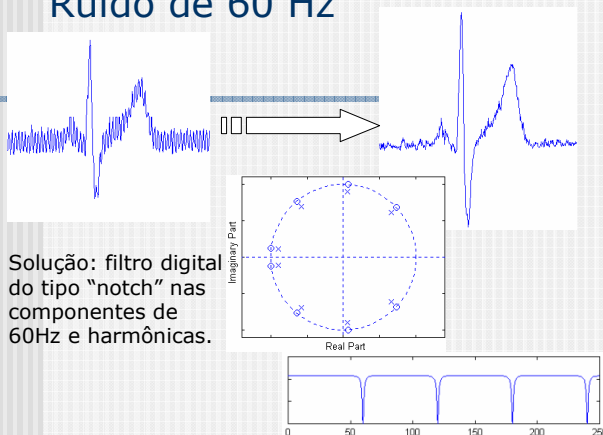
Como construir

- Obter amostras grátis da Texas Instruments
- Amplificador de instrumentação: INA101
- Amplificador operacional: TL064
- Amplificador isolado: ISO100
- Fonte isolada: DCV
- www.ti.com

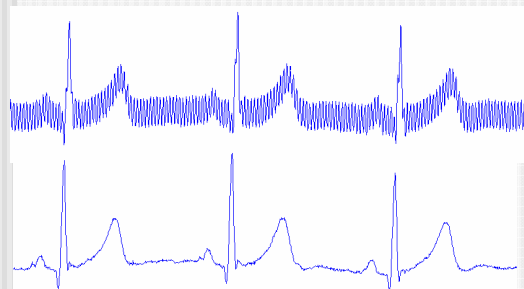
Eletrocardiograma

Redução de Ruído

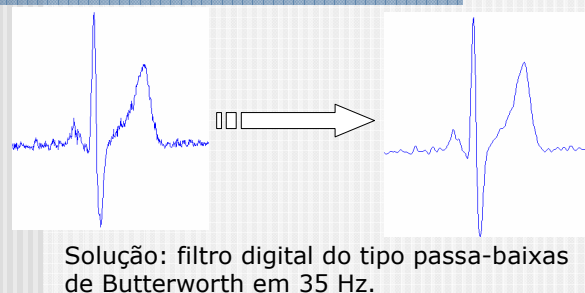
Ruído de 60 Hz



Ruído de 60 Hz



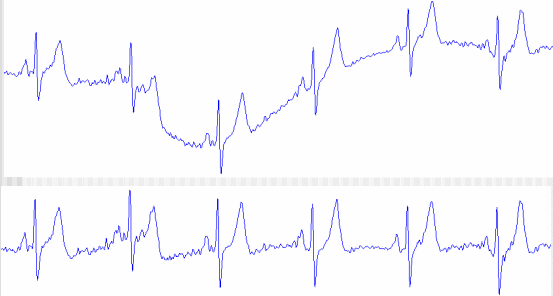
Eliminação do ruído muscular



Ruído Muscular



Oscilação da linha de base: passa-altas (0.05Hz)



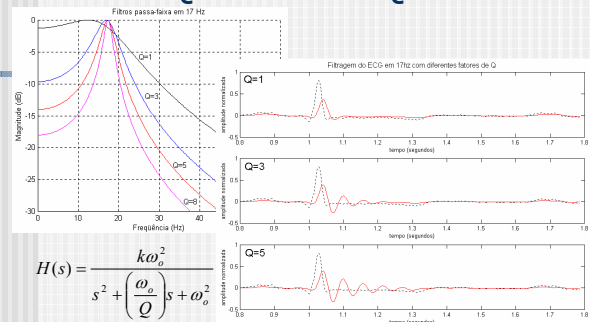
Eletrocardiograma

Detecção de QRS

Detecção de batimentos cardíacos (detecção de QRS)

- Filtro Q em 17 Hz
- Diferenciador
- Cálculo da energia
- Detecção de limiar
- Busca para trás

Isolar QRS: filtro Q em 17Hz



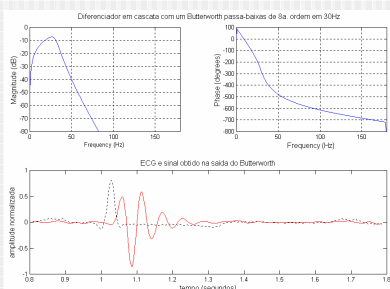
$$H(s) = \frac{k\omega_c^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_c}{Q}\right)s + \omega_c^2}$$

- Transformação bilinear, Q=3
- Oscila na presença de QRS

Diferenciação + Passa-Baixas

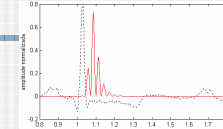
- Enriquece oscilações rápidas e fortes
- Cuidado: enriquecimento de ruído

$$y[n] = x[n] - x[n-1]$$

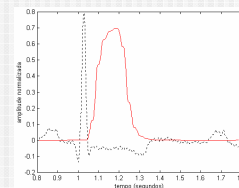


Cálculo da energia

- Quadrado: Módulo e +SNR



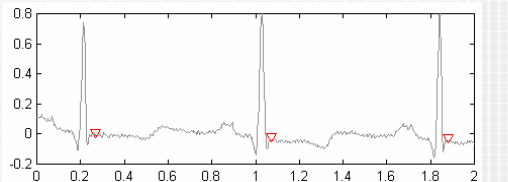
- Média móvel: une os picos
- Janela de 150ms



$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n-i]$$

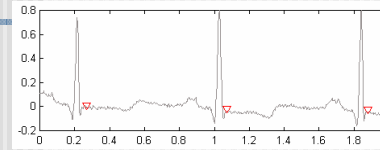
Detecção de Limiar

- Limiar baixo: falso positivo
- Limiar alto: falso negativo
- Solução: limiar adaptativo

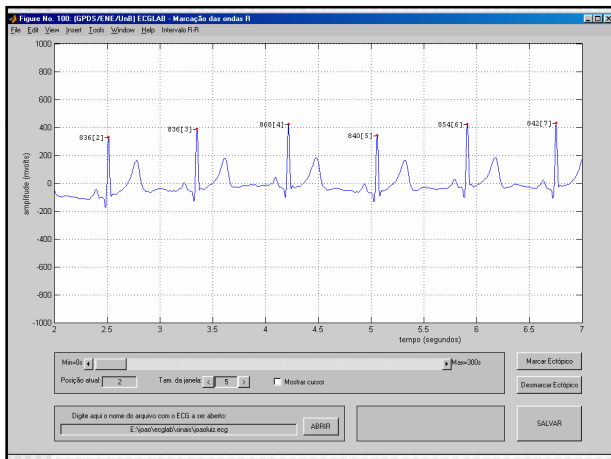


Busca Para Trás

- Corrige atraso nos filtros e no detector



- Se voltar muito: marca onda P
- Se voltar pouco: onda S ou T
- Busca pelo máximo absoluto

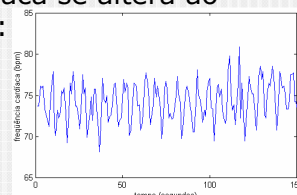


Variabilidade da Frequência Cardíaca

O que é?
Pra que serve?

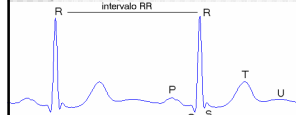
Variabilidade da Frequência Cardíaca

- Termo em inglês: *Heart Rate Variability (HRV)*
- O sinal de HRV mostra como a frequência cardíaca se altera ao longo do tempo:

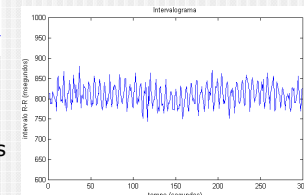
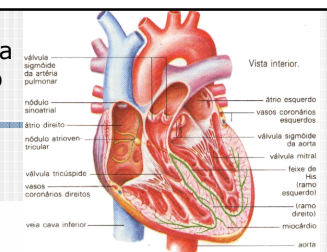


O sistema nervoso controla a frequência cardíaca atuando no nódulo sinoatrial.

Traçado típico do ECG:



Normalmente, o intervalo entre dois batimentos oscila em torno de 800 ms (75 bpm).



Objetivo

- Medir as influências dos ramos simpático e parassimpático do sistema nervoso
 - Simpático: aumenta freq. cardíaca
 - Parassimpático: diminui freq. cardíaca
- O objeto de estudo é o sistema nervoso, e não o coração!
- A variabilidade é saudável!

Aplicações

- Medir a maturação em fetos e prematuros
- Prevenir morte súbita
- Neuropatia autonômica
- Neuropatia associada a diabetes
- Interação cardio-respiratória
- Na UnB: doença de Chagas, AIDS e hipertensão (Prof. Junqueira)

Mais Aplicações

- Avaliação de risco de:
 - Hipertensão
 - Enfarto agudo do miocárdio
 - Falha cardíaca
 - Morte cardíaca súbita
- Mecanismos psicológicos
 - Stress
 - Demandas cognitivas
 - Experiência afetiva

Vantagens

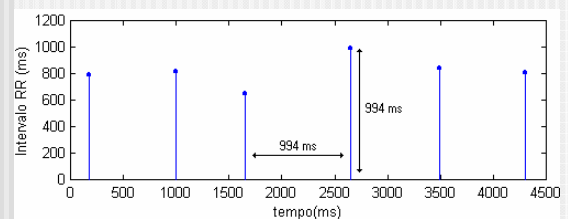
- Completamente não-invasivo
- Fácil de coletar
- Equipamento barato
- Uso ambulatorial
- Possibilidade de observar o paciente no dia-a-dia (Holter)

Variabilidade da Freqüência Cardíaca

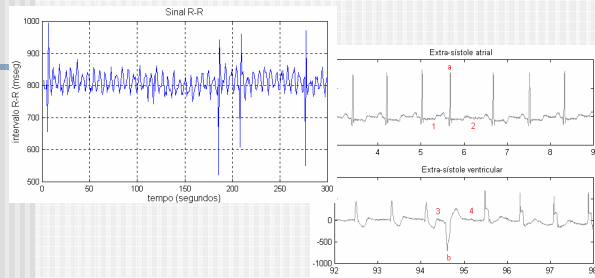
Construção e processamento do sinal

Construção do Sinal de HRV

- Sinal RR: gráfico dos intervalos entre duas ondas R consecutivas (intervalos RR)
- Espaçamento não-uniforme



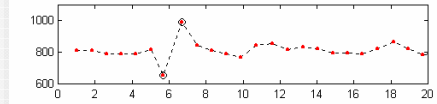
Extra-sístoles no sinal R-R



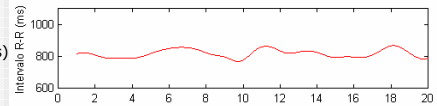
- Não tem origem no sistema nervoso
- Distorcem toda a análise
- Devem ser removidas!

“Correção” das extra-sístoles

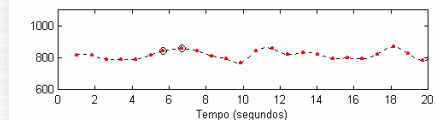
Remove



Interpola (splines cúbicas)



Reamostra



Estacionariedade

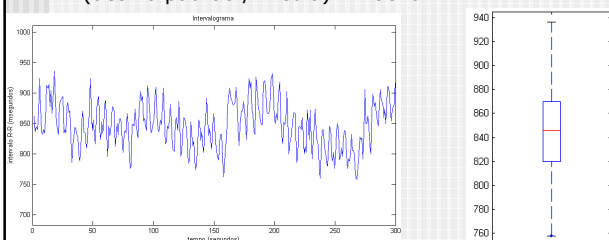
- Técnicas tradicionais de análise da HRV exigem estacionariedade
 - Características estatísticas não variam com o tempo
- Restringir a análise a um trecho curto do sinal (5 minutos)
- Paciente em repouso

Variabilidade da Frequência Cardíaca

Análise no domínio do tempo

Análise estatística

- Máximo, Mínimo, Faixa dinâmica (máx-mín)
- Média, desvio padrão, variância
- Mediana, 1º quartil, 3º quartil
- Coeficiente de variação
 - (desvio padrão / média) X 100%



Outros índices temporais

- pNN50: porcentagem das diferenças absolutas entre intervalos normais sucessivos que excedem 50 ms
- RMSSD: raiz da média quadrática das diferenças entre RR sucessivos.

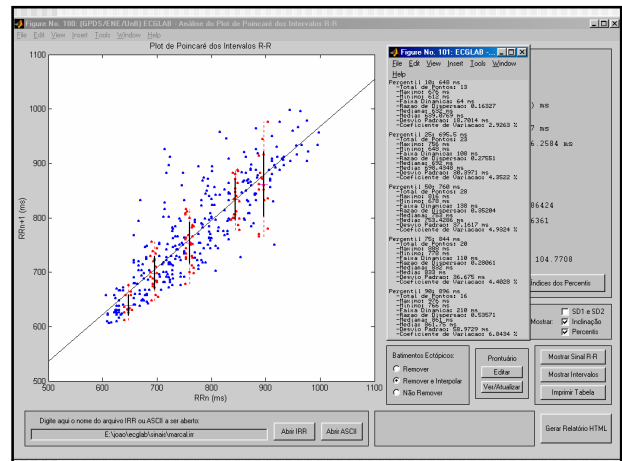
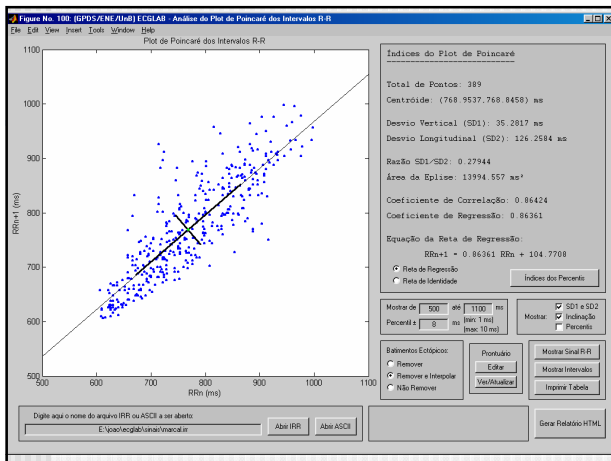
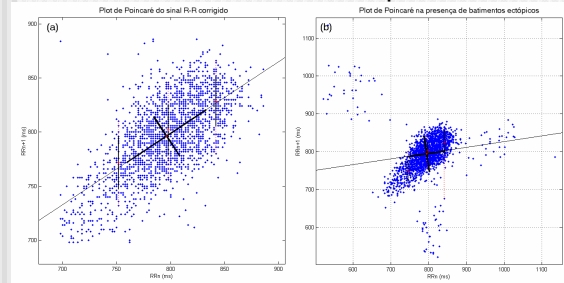
$$RMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} (X_{i+1} - X_i)^2}{(N-1)}}$$

Variabilidade da Frequência Cardíaca

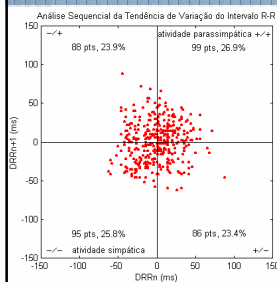
Análise com técnicas geométricas

Plot de Poincaré

■ Gráfico do RR atual vs. próximo RR



Análise Seqüencial da Tendência de Variação do R-R



- Diferença atual pela diferença anterior: $[RR_{n+2} - RR_{n+1}]$ vs. $[RR_{n+1} - RR_n]$
- Número de pontos por quadrante
- Determina equilíbrio do sistema nervoso

Variabilidade da Frequência Cardíaca

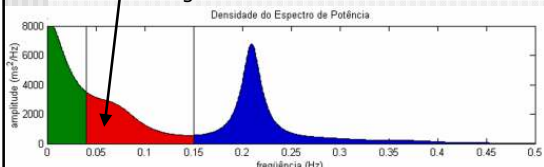
Análise no domínio da frequência

Espectro de potência

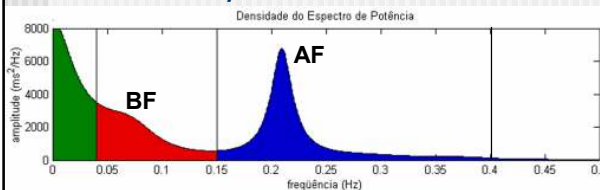
- Inglês: *Power Spectral Density*
- É o quadrado do espectro de frequência

$$PSD(\omega) = |F(\omega)|^2$$

área = energia



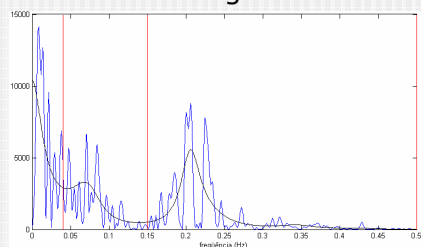
Razão BF/AF



- BF (.05 a .15 Hz): atividade simpática (+lenta)
- AF (.15 a .40 Hz): atividade parassimpática (+rápida)
- Razão BF/AF:
 - Razão entre energia nas baixas frequências (BF) e nas altas frequências (AF)
 - Mede o equilíbrio simpático-parassimpático

Como estimar o PSD?

- Transformada Discreta de Fourier
- Modelo Auto-Regressivo



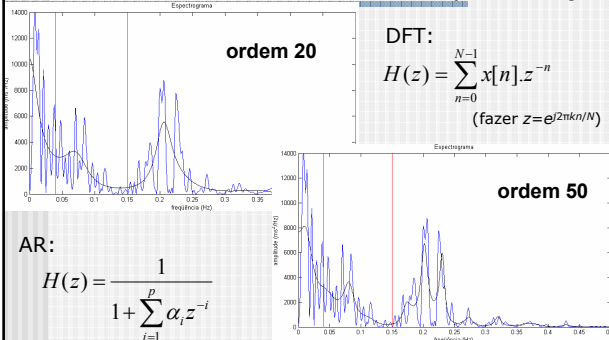
Modelo auto-regressivo

- Tenta aproximar a função de transferência do sinal usando um modelo só de pólos

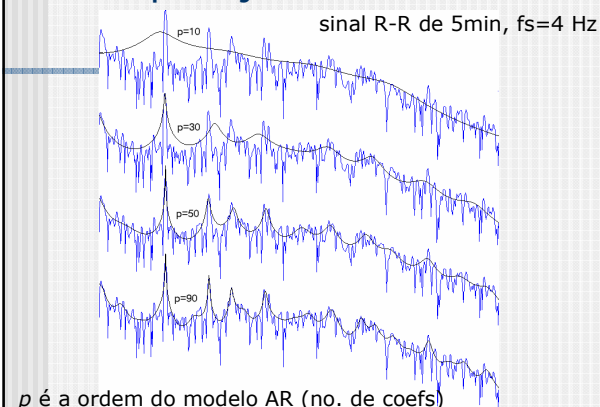
$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p \alpha_i z^{-i}}$$

p : ordem do modelo AR (número de pólos)
 α_i : coeficientes auto-regressivos

- DFT: só zeros, muitos picos
- AR: só pólos, mais suave
- Quanto > a ordem, melhor a aproximação



Comparação: AR x FFT



Espectro de potência a partir da DFT

$$PSD(k) = T_s \cdot \frac{|F(k)|^2}{N}$$

- N: no. de amostras do sinal antes do *zero-padding*
- Ts: intervalo entre amostras do sinal RR
 - fs = 2 Hz → Ts = 0,5 s

Espectro de potência a partir do modelo AR

$$PSD(k) = \lambda \cdot T_s |H(k)|^2$$

- λ: variância do erro de predição
- H(k): função de transferência do modelo AR, H(z), fazendo $z = e^{j2\pi kn/N}$

Cálculo da razão BF/AF

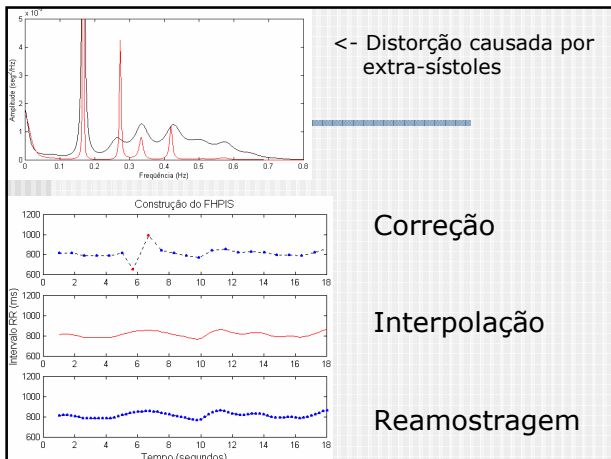
- O espectro em bandas
 - BF (0.05-0.15 Hz) – sistema simpático
 - AF (0.15-0.4 Hz) – parassimpático
- Razão = E_{BF} / E_{AF}

$$E(f_m \rightarrow f_n) = \Delta f \sum_{k=m}^{n-1} PSD(k)$$

$$m = f_m / \Delta f \quad n = f_n / \Delta f \quad \Delta f = \frac{f_s}{N_{fft}}$$

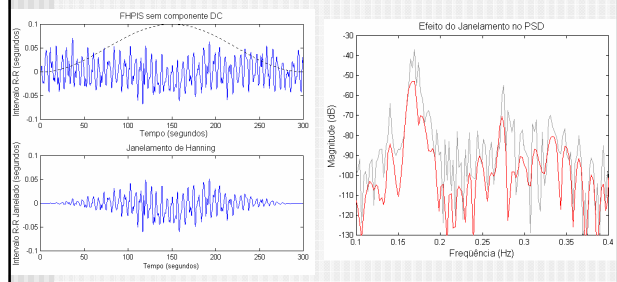
Antes de calcular o PSD:

- Remover extra-sístoles (distorcem as altas frequências)
- Subtrair componente DC (média dos RR)
- Reamostragem: corrige o espaçamento não-uniforme entre os batimentos
- Janelamento: reduz o alastramento espectral
- Recomendado:
 - Interpolação por splines cúbicas (2 Hz)
 - Janela de Hanning de 5 minutos
 - Modelo auto-regressivo de ordem 12



Janelamento

- Hanning: reduz o alastramento espectral
- PSD mais suave



Análise espectral: resumo

- Remove batimentos ectópicos
- Reamostra a uma taxa de amostragem uniforme (2 Hz) usando splines cúbicas
- Multiplicar por janela de Hanning
- Calcula o PSD (usando $AR_{p=12}$ ou DFT)
- Calcula a energia em cada faixa de freqüência
- Calcula a razão BF/AF

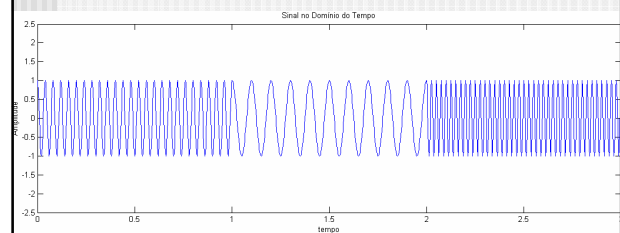
Variabilidade da Freqüência Cardíaca

Análise tempo-freqüencial

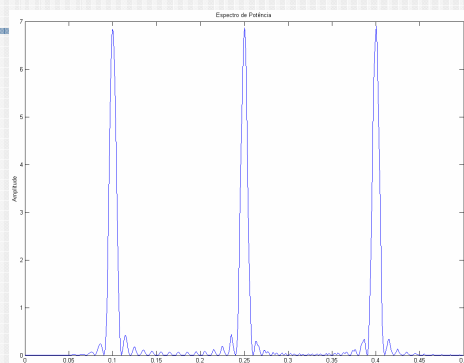
Análise Tempo-Freqüencial

- Mostra como as características espectrais do sinal variam ao longo do tempo.
- Exemplo: música
 - A análise no domínio da freqüência mostra que notas estão presentes em uma melodia e qual a potência de cada uma.
 - A análise tempo-freqüencial, informa:
 - Que notas estão presentes;
 - Quando e por quanto tempo cada uma é tocada;
 - Com que intensidade cada uma é tocada.

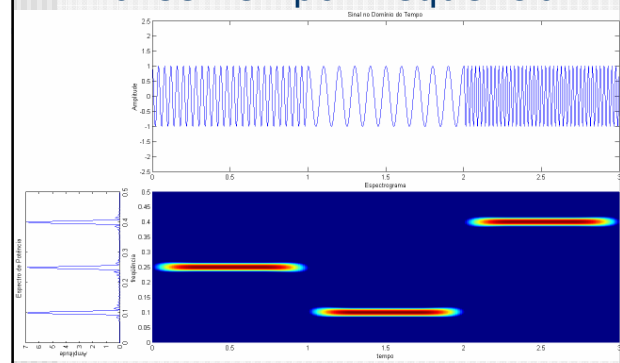
Melodia: Ré – Dó – Mi



Domínio da Freqüência

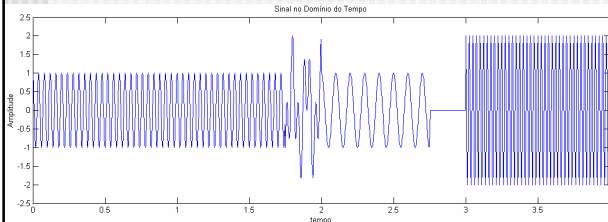


Análise Tempo-Freqüencial



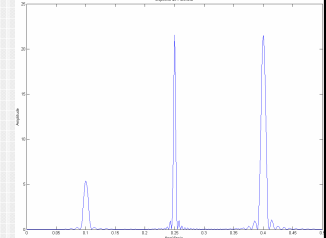
Imagine um Músico Iniciante

- Ré com o dobro da duração
- Sobreposição: Ré + Dó
- Pausa entre Dó e Mi
- Mi com mais potência

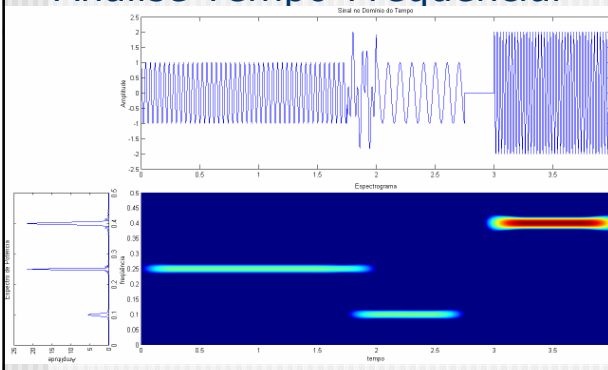


Domínio da Freqüência

- Ré e Mi com a mesma amplitude
- Dó: mais curto ou com menos potência?
- Nenhuma informação sobre a pausa



Análise Tempo-Freqüencial

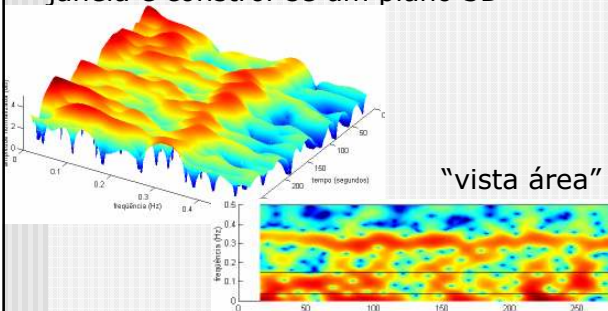


Análise Tempo-Freqüencial da Variabilidade da Freqüência Cardíaca

- A análise clássica é capaz de:
 - Quantificar a variabilidade;
 - Medir a atividade simpática;
 - Medir a atividade parassimpática.
- Limitação: os dados obtidos se referem ao sinal como um todo!
- Análise tempo-freqüencial:
 - Mostra como as os ramos simpático e parassimpático atuam ao longo do tempo.

HRV: análise tempo-freqüencial

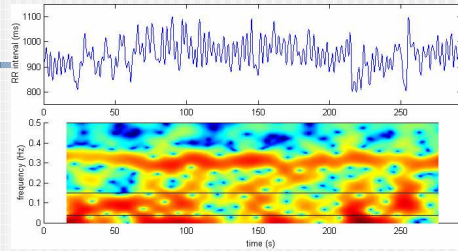
- Dividir o sinal em janelas de 30 seg
- Calcula-se o espectro para cada janela e constrói-se um plano 3D



Técnicas

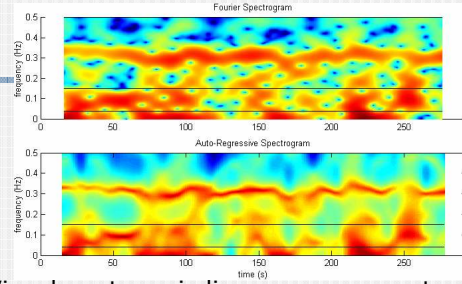
- Espectrograma de Fourier
- Espectrograma Auto-Regressivo
- Espectrograma Wavelet

Espectrograma de Fourier

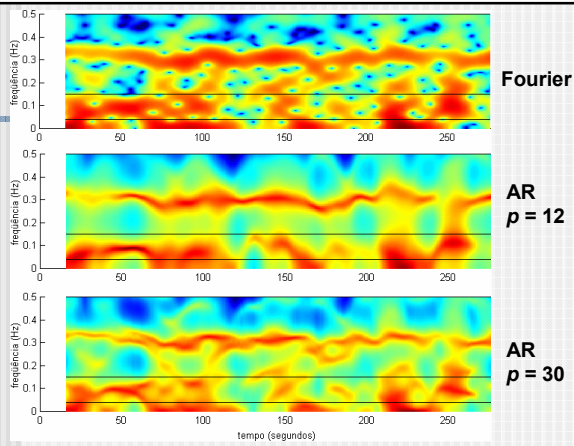


- Usando a DFT
- Resolução freqüencial depende do comprimento da janela
 - Compromisso c/ resolução temporal

Espectrograma Auto-Regressivo

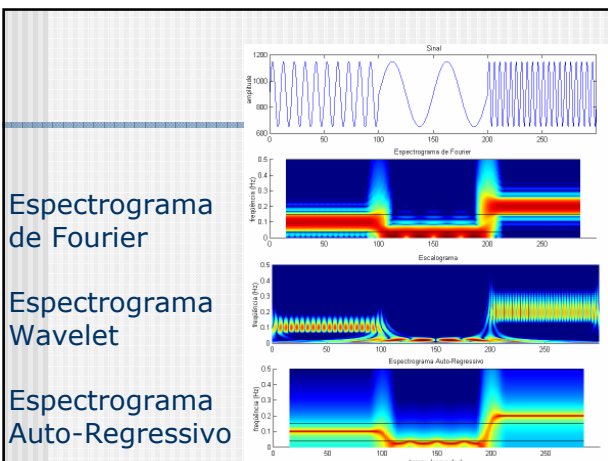
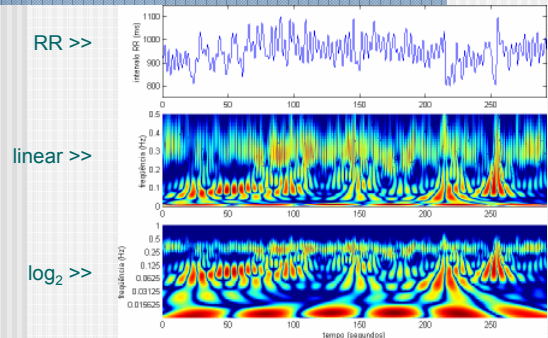


- Visualmente mais limpo que o espectrograma de Fourier
- Resolução freqüencial depende da ordem do modelo AR
 - Não sacrifica resolução temporal

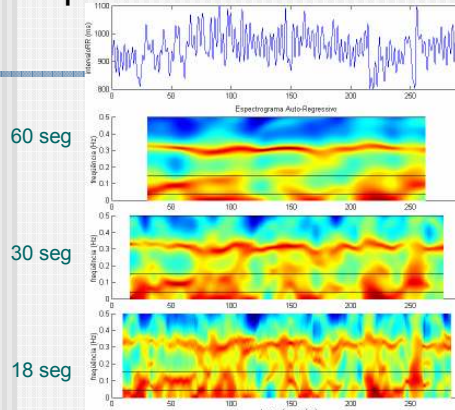


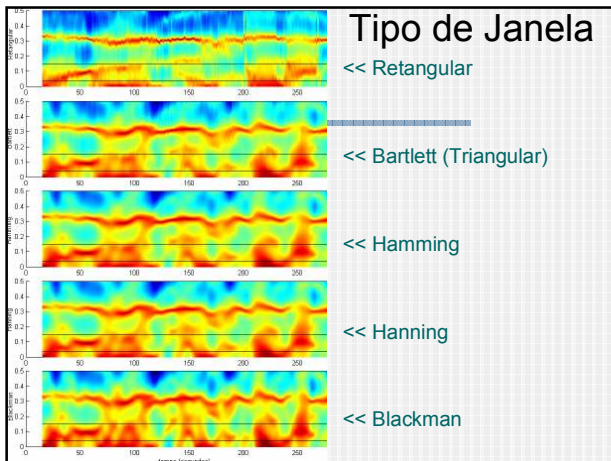
Espectrograma Wavelet

- Resolução tempo-freqüencial varia com a freqüência



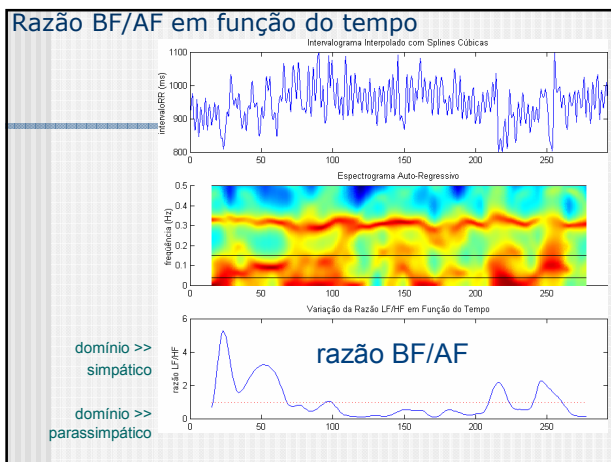
Comprimento da Janela





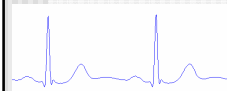
Parâmetros Recomendados


- Reamostragem com splines à taxa de 2 Hz
- Modelo AR com ordem 12
- Janela de Hanning de 30 segundos



Conclusão

- A análise da HRV é uma técnica não-invasiva para avaliar o controle do sistema nervoso sobre a frequência cardíaca
- <http://www.ene.unb.br/~joaoluiz>




UnB Gama
 2010 Universidade de Brasília
 Faculdade UnB-Gama
 Especialização em Engenharia Clínica