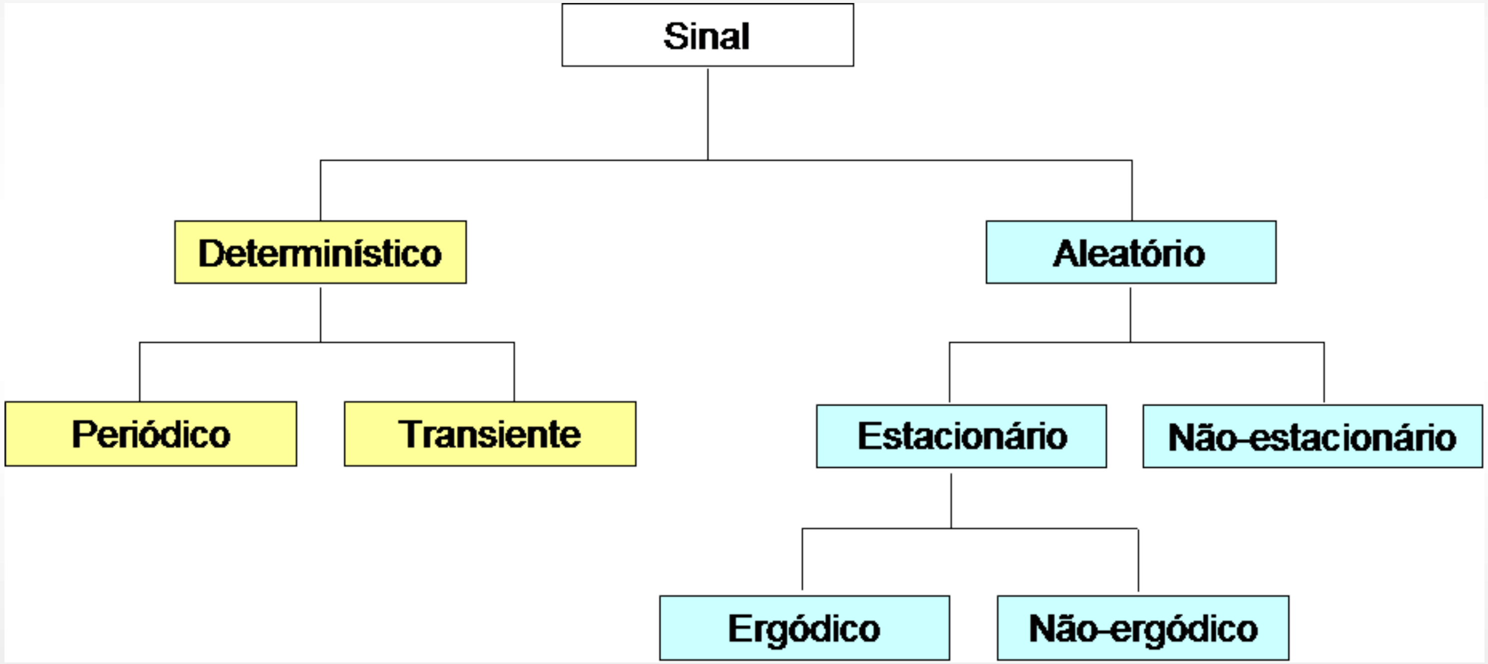
Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢**Tipos de sinal:**



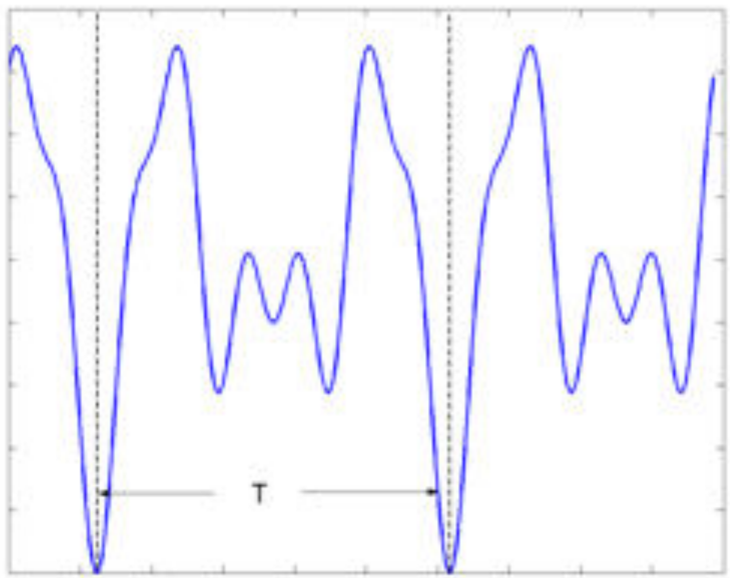
Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

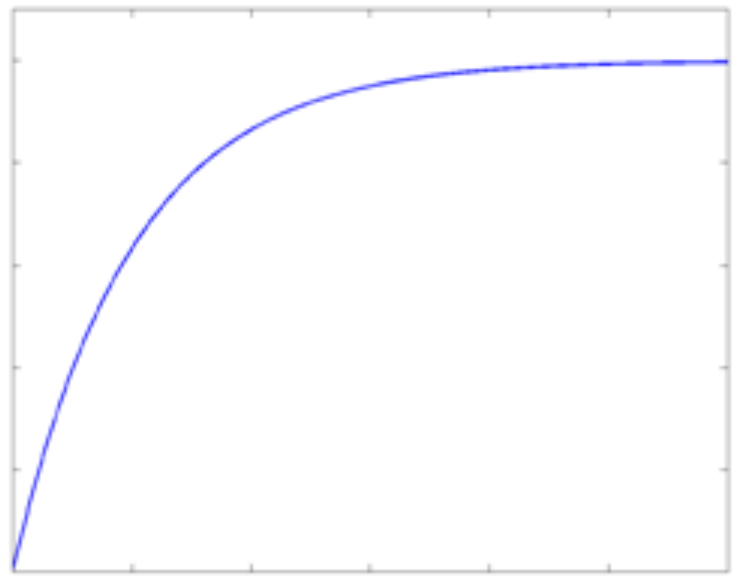
➢**Tipos de sinal:**

➢<u>Determinístico</u>:*Sinais determinísticos são aqueles que podem ser perfeitamente reproduzidos caso sejam aplicadas as mesmas condições utilizadas sua geração*.

Periódico



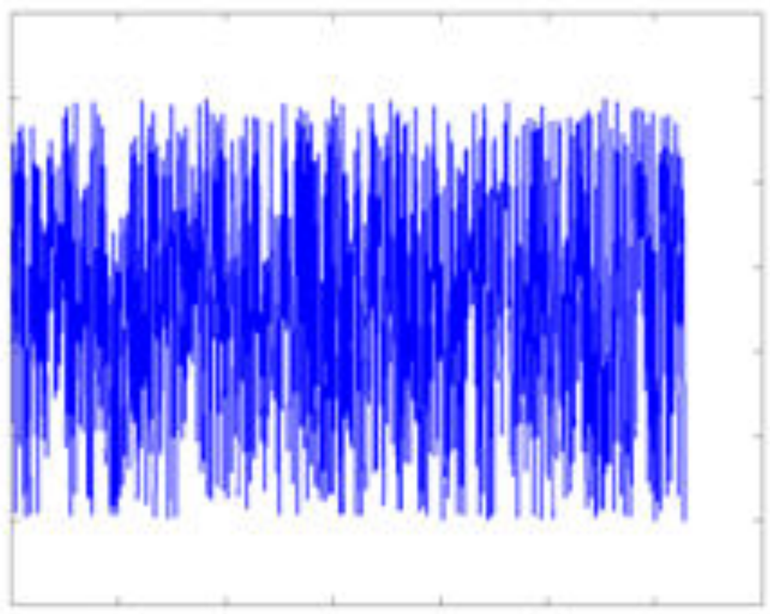
Transiente



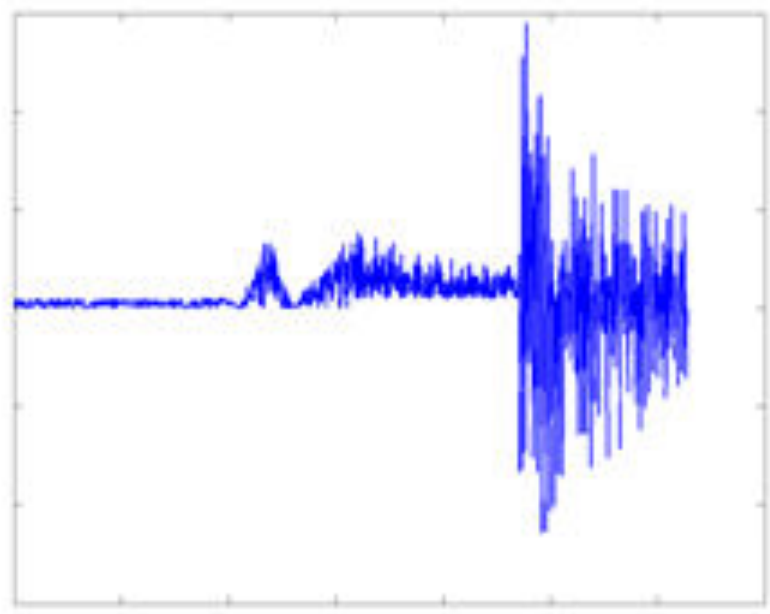
Aula de Processamento de Sinais

- **Tipos de sinal:**
  - <u>Estocástico (Aleatório):</u> *possuem uma variabilidade que dificulta a predição dos seus valores por funções analíticas e que também não possuem periodicidade aparente*

Estacionário



Não Estacionário



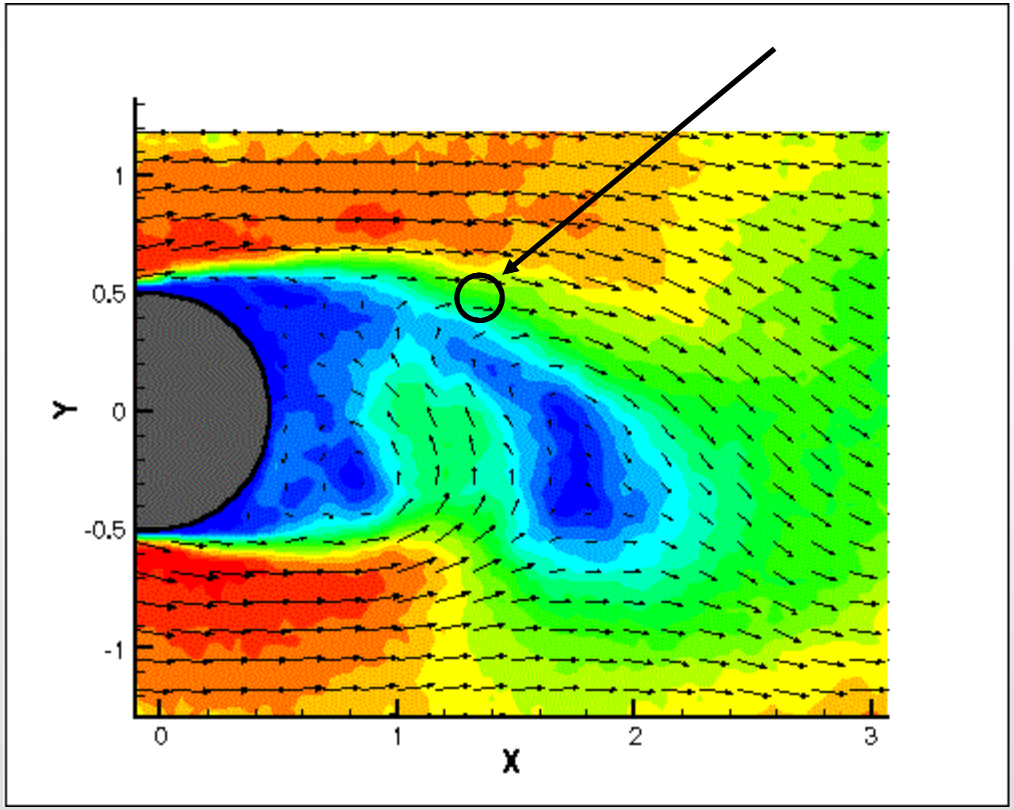
Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢**Análise de Sinais (introdução):**

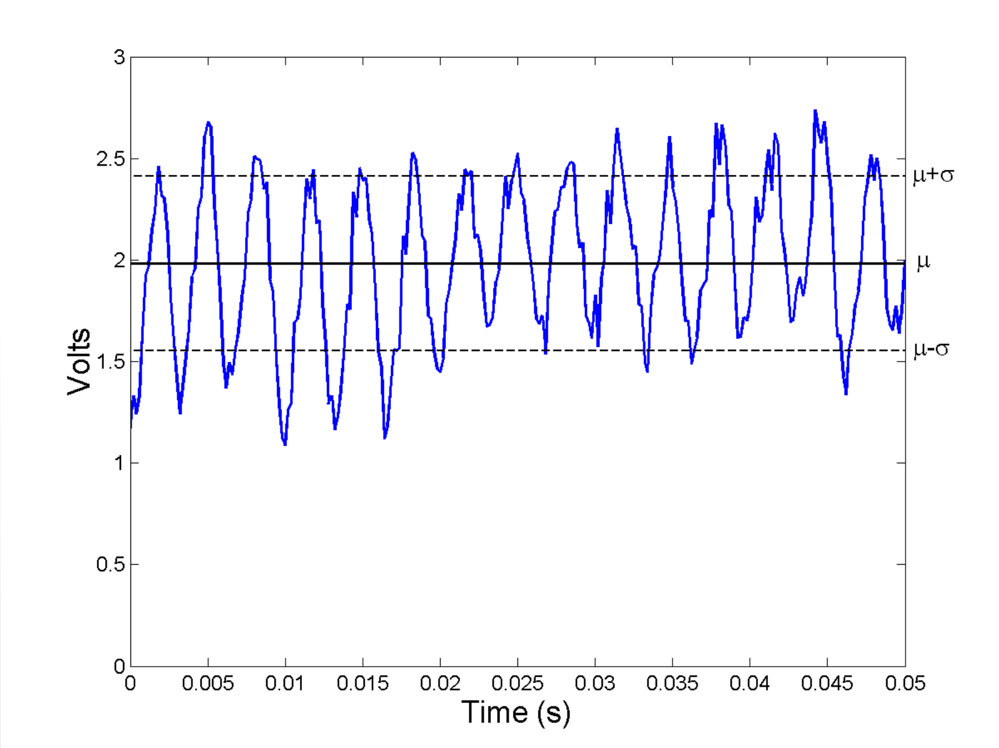
➢Na prática é comum a ocorrência de uma situação combinada onde coexista uma parcela determinística e uma estocástica.

➢<u>Exemplo</u>: Escoamento na esteira de um cilindro



➢Análise de Sinais (introdução):

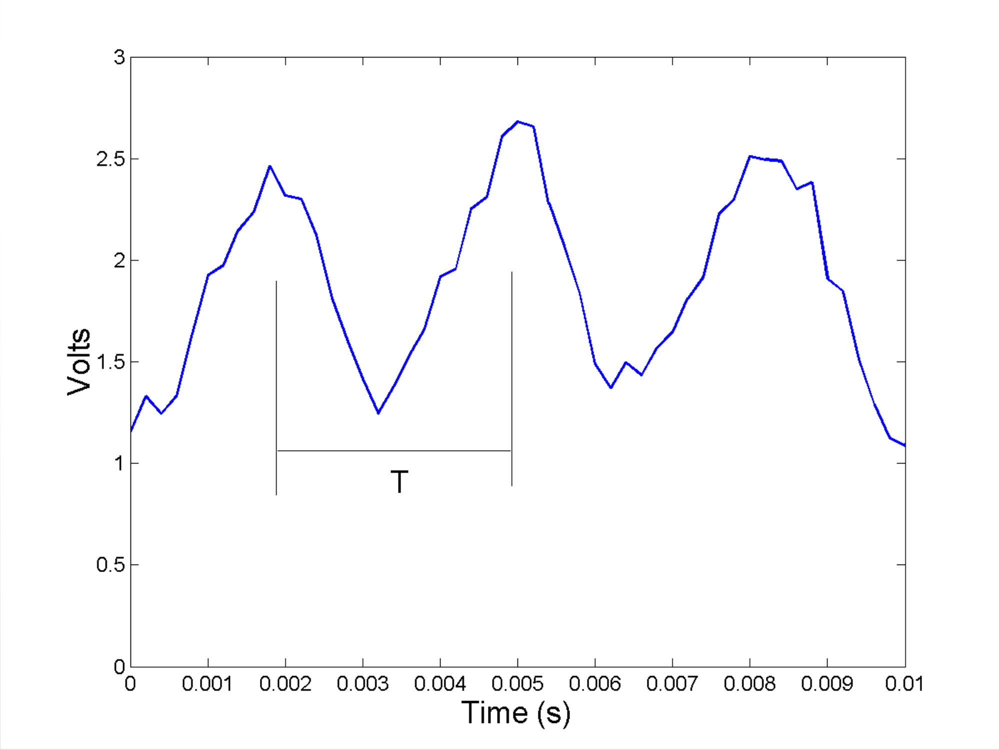
➢<u>Exemplo</u>: De volta ao sinal do anemômetro de fio quente. Estimadores simples do tipo média e desvio padrão, não permitem que sinais determinísticos e aleatórios de diferentes tipos sejam separados e analisados individualmente.



➢**Análise de Sinais (introdução):**

➢<u>Exemplo</u>: De volta ao sinal do anemômetro de fio quente.

Dificuldade na definição do período do sinal através da análise no tempo.



Aula de Processamento de Sinais

➢ Representação de sinais em séries de Fourier:

$$x(t)=\sum_{k=0}^{\infty}\left[a_k\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)+b_k sen\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right]=\sum_{k=0}^{\infty}\left[a_k\cos(\omega_0 kt)+b_k sen(\omega_0 kt)\right]$$

onde *T* é o período fundamental do sinal *x(t)*, ω_0 *(=2π/T)* a frequência fundamental, *k* o número do harmônico usado na composição do sinal,

$$a_k=\frac{2}{T}\int_T x(t)\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad k=0,1,2,\ldots$$

$$b_k=\frac{2}{T}\int_T x(t)sen\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad k=0,1,2,\ldots$$

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢Representação de sinais em séries de Fourier:

$$x(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}\left[a_k\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)+b_k sen\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right]=\frac{a_0}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}\left[a_k\cos(\omega_0 kt)+b_k sen(\omega_0 kt)\right]$$

para $k=0$ o valor de b_k é irrelevante pois o sen($\omega_0$kt)= *0.* Já o valor do cosseno presente na integral de a_k fica constante e igual a *1*. Assim, o coeficiente a para $k=0$ pode ser reescrito como,

$$a_0=\frac{2}{T}\int_T x(t)dt, \qquad k=0$$

O termo a_0 refere-se a média da série em um período de tempo T. Não tem fase pois não depende de valores de *seno* ou *cosseno*

➢Representação de sinais em séries de Fourier:

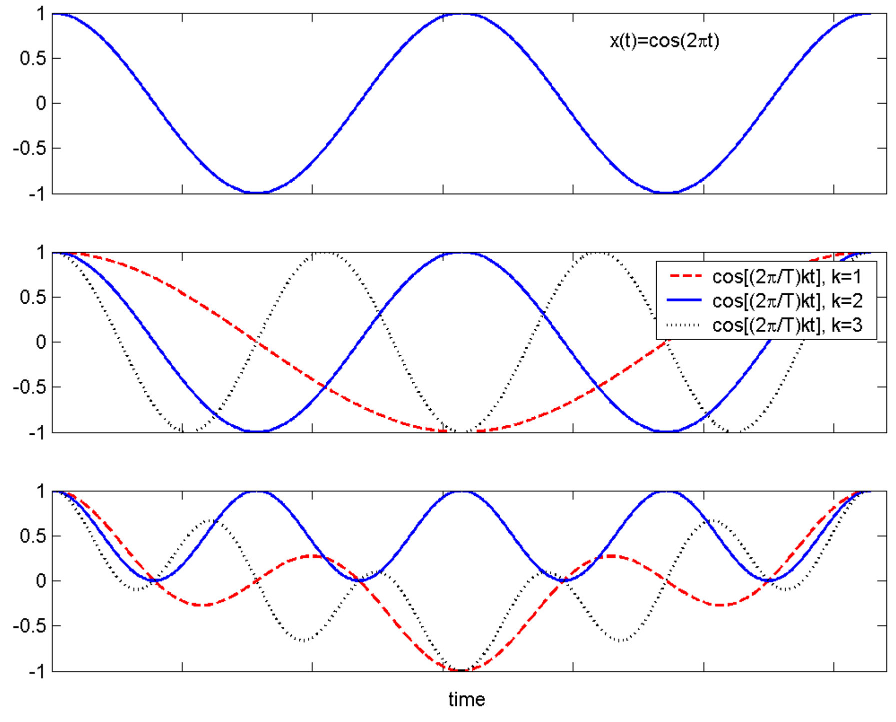
$$a_k = \frac{2}{T}\int_T x(t)\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad b_k = \frac{2}{T}\int_T x(t)sen\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad k = 0,1,2,\ldots$$

Como funciona?

Ex: Caso: cos(2πt)

(*Tem algo da covariância, vista na última aula?*)

a_k

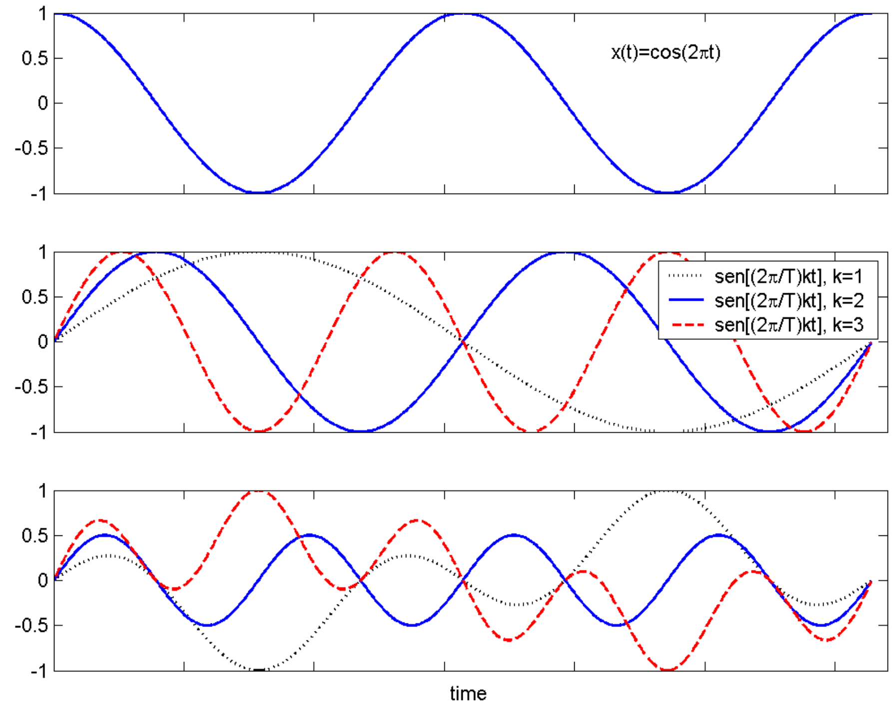


➢Representação de sinais em séries de Fourier:

$$a_k = \frac{2}{T}\int_T x(t)\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad b_k = \frac{2}{T}\int_T x(t)sen\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad k = 0,1,2,...$$

Como funciona?
Ex: Caso: cos(2πt)

b_k



Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢Representação de sinais em séries de Fourier:

$$a_k = \frac{2}{T}\int_T x(t)\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad b_k = \frac{2}{T}\int_T x(t)sen\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)dt, \qquad k = 0,1,2,\ldots$$

➢Amplitude e Fase do sinal

$$A(\omega_0 k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\phi(\omega_0 k) = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right).$$

➢Representação de sinais em séries de Fourier:

Amplitude e Fase do sinal

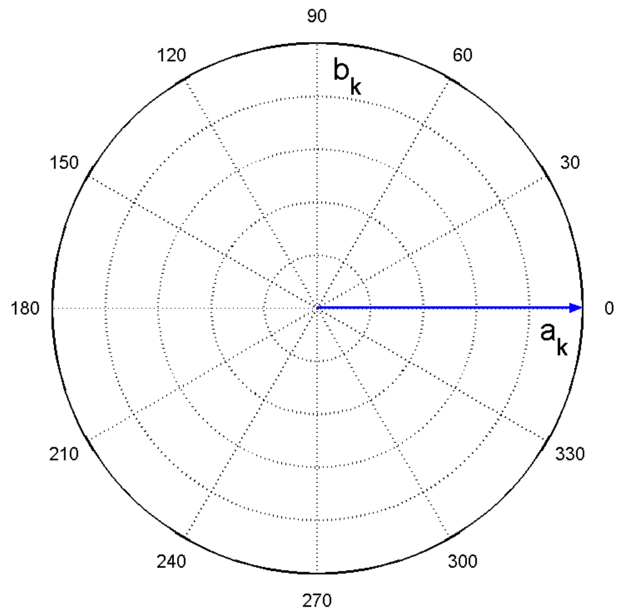
$$A(\omega_0 k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\phi(\omega_0 k) = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right).$$

Análise da Fase:
Continuando com
ex: cos(2πt)

$a_k>0$; $b_k=0$;

logo, $\varphi=0$



Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢ Representação de sinais em séries de Fourier:

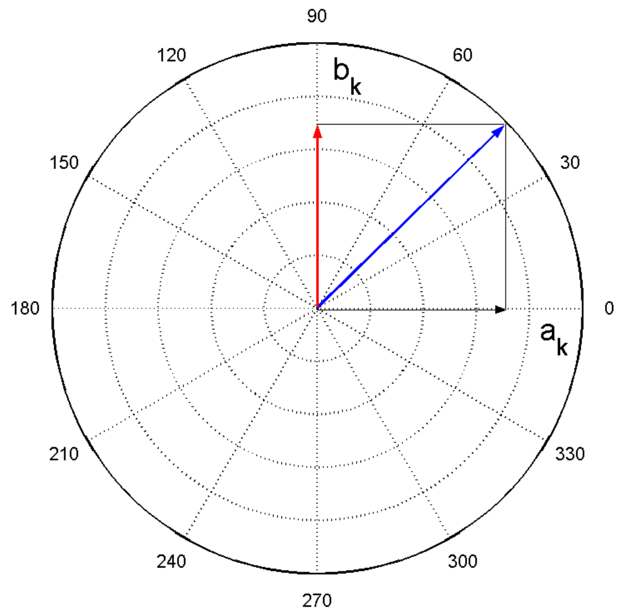
Amplitude e Fase do sinal

$$A(\omega_0 k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\phi(\omega_0 k) = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right).$$

Análise da Fase:
Continuando com
ex: $\cos(2\pi t+\varphi)$
com $\varphi = \pi/4$ (45°)

$a_k>0$; $b_k>0$;



Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢ <u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

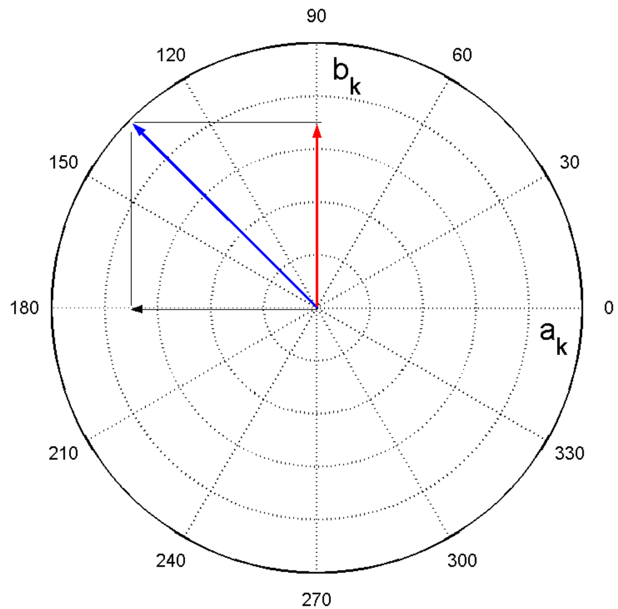
Amplitude e Fase do sinal

$$A(\omega_0 k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\phi(\omega_0 k) = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right).$$

Análise da Fase:
Continuando com
ex: cos(2πt+φ)
com φ= 3π/4 (135°)

$a_k<0$; $b_k>0$;



Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

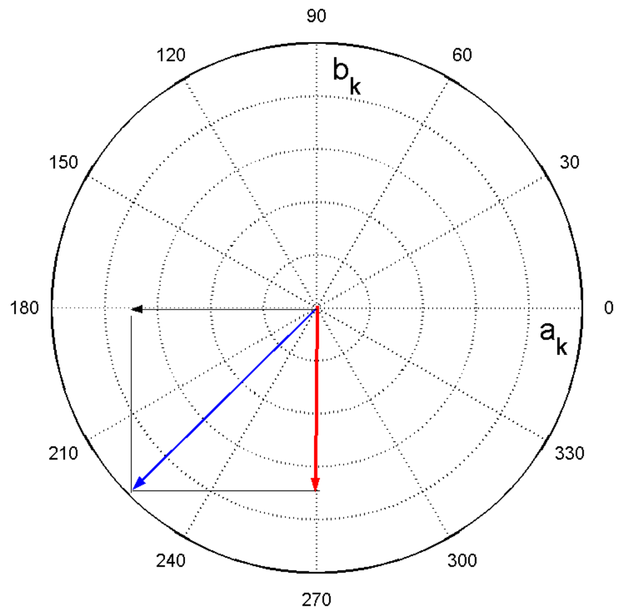
Amplitude e Fase do sinal

$$A(\omega_0 k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\phi(\omega_0 k) = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right).$$

Análise da Fase:
Continuando com
ex: cos(2πt+φ)
com φ= 5π/4 (225°)

$a_k<0$; $b_k<0$;



Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

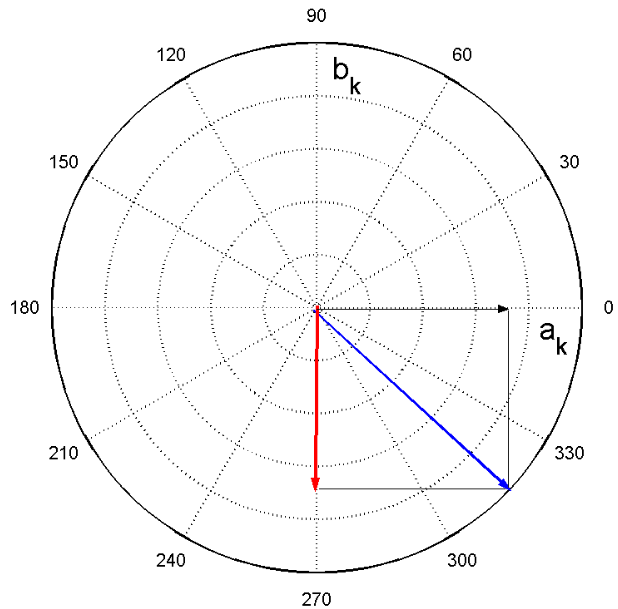
Amplitude e Fase do sinal

$$A(\omega_0 k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2};$$

$$\phi(\omega_0 k) = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right).$$

Análise da Fase:
Continuando com
ex: cos(2πt+φ)
com φ= 7π/4 (315°)

$a_k>0$; $b_k<0$;

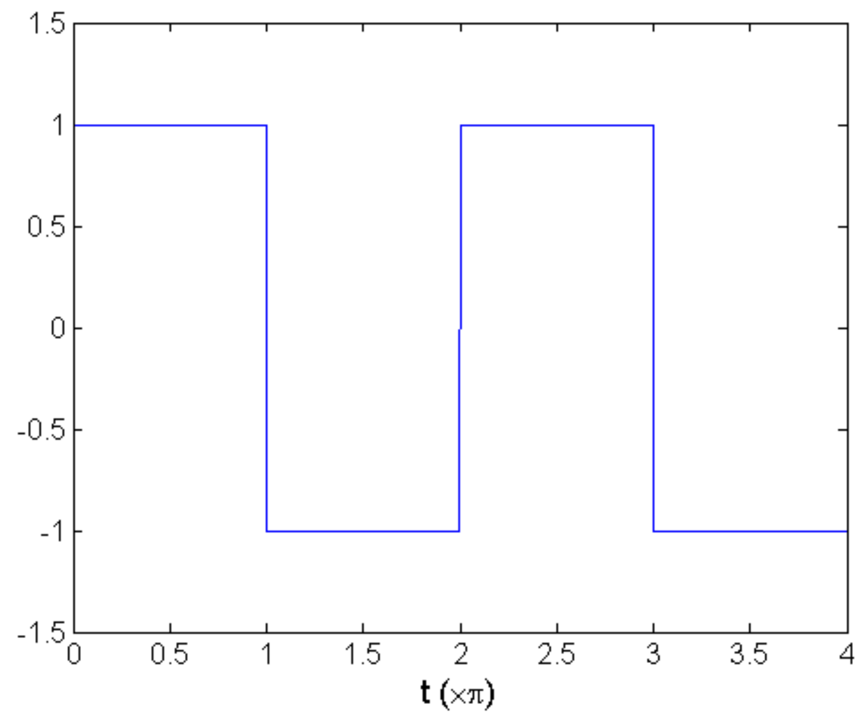


➢Representação de sinais em séries de Fourier:

Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

onde sign é o sinal da função sen(t) e que assume -1 para valores negativos de seno(t) e +1 para positivos.



➢Representação de sinais em séries de Fourier:

Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

;

Calculando-se os termos da série de Fourier dessa função, temos:

$$a_0 = \frac{2}{T}\int x(t)dt = \int_0^{\pi} 1dt + \int_{\pi}^{2\pi} -1dt = 0$$

$$a_k = \frac{2}{T}\int x(t)\cos(kt)dt = \frac{1}{k\pi}\left[1 \cdot sen(kt)\Big|_0^{\pi} + (-1)sen(kt)\Big|_{\pi}^{2\pi}\right] = 0, \qquad k = 1,2,3...$$

Aula de Processamento de Sinais

➢Representação de sinais em séries de Fourier:

Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

;

Calculando-se os termos da série de Fourier dessa função, temos:

$$b_k = \frac{2}{T}\int x(t)sen(kt)dt = \frac{1}{\pi}\left[\int_0^{\pi} 1\cdot sen(kt)dt + \int_{\pi}^{2\pi} -1\cdot sen(kt)dt\right]$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-\frac{1}{k}\cos(kt)\Big|_0^{\pi} + \frac{1}{k}\cos(kt)\Big|_{\pi}^{2\pi}\right] = \begin{cases} \dfrac{4}{k\pi}, & para\ k\, impar \\ 0 \quad , & para\, k\ par \end{cases}$$

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢ Representação de sinais em séries de Fourier:

Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign\left[sen(t)\right]$

;

Com os coeficientes $a_k = a_0 = 0$

$$b_k = \begin{cases} \dfrac{4}{k\pi}, & para\ \ k\, impar \\ 0 \quad, & para\ k\ \ par \end{cases}$$

A série de Fourier dessa função fica:

$$x(t) = \frac{4}{\pi}sen(t) + \frac{4}{3\pi}sen(3t) + \frac{4}{5\pi}sen(5t) + \frac{4}{7\pi}sen(7t) + \ldots$$

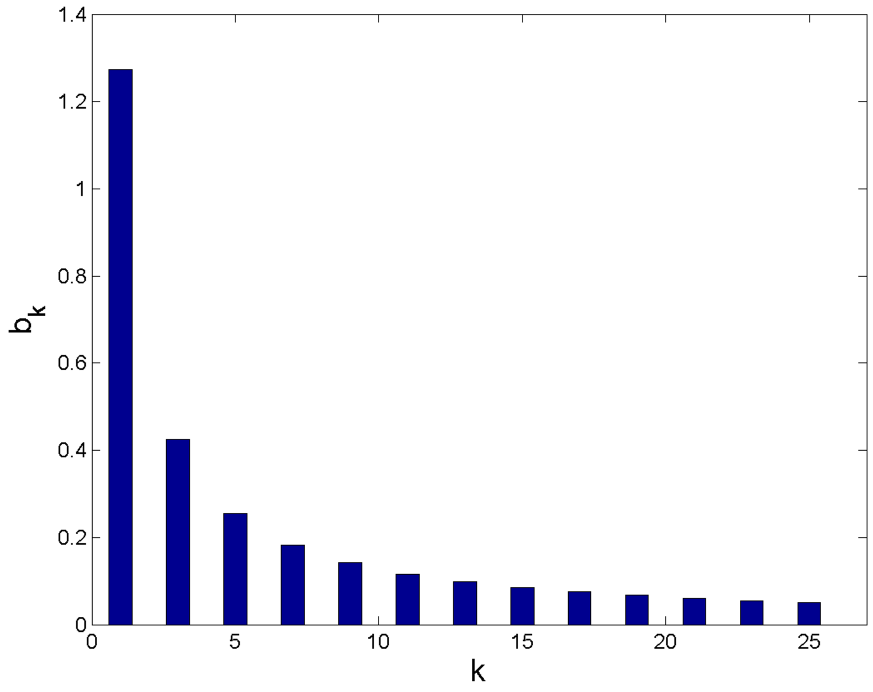
➢Representação de sinais em séries de Fourier:

Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

;

Representação espectral (no domínio das freqüências) da série



➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

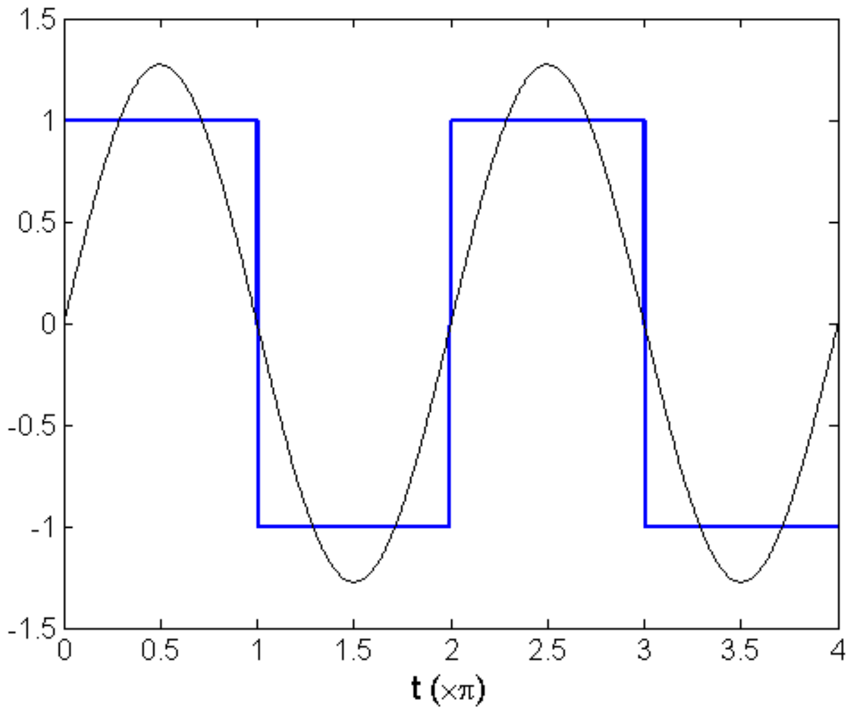
Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

;

Representação temporal da série truncada a um número finito de modos.

k=1



➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

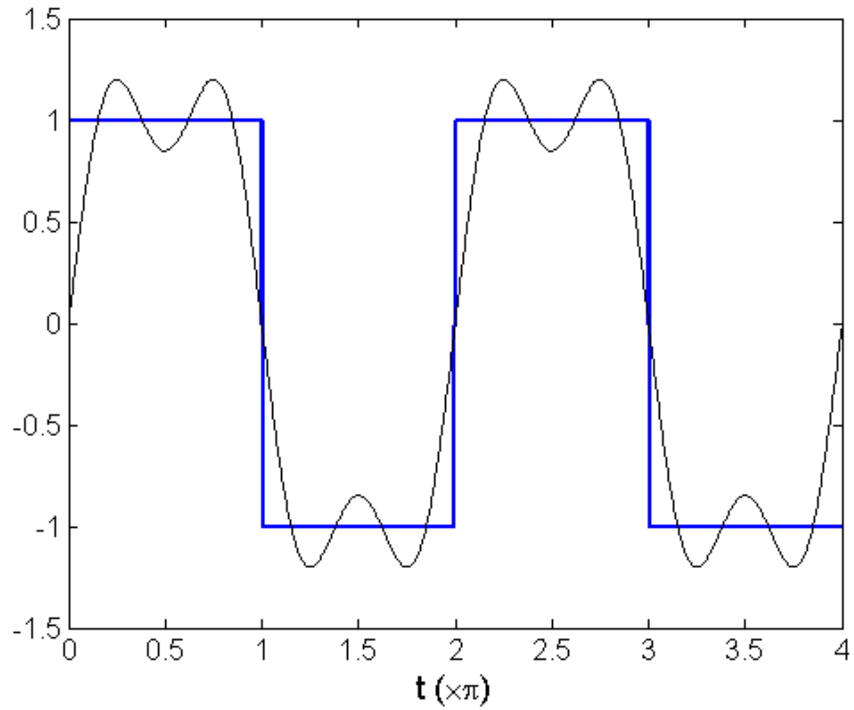
Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

;

Representação temporal da série truncada a um número finito de modos.

k=1,3



➢Representação de sinais em séries de Fourier:

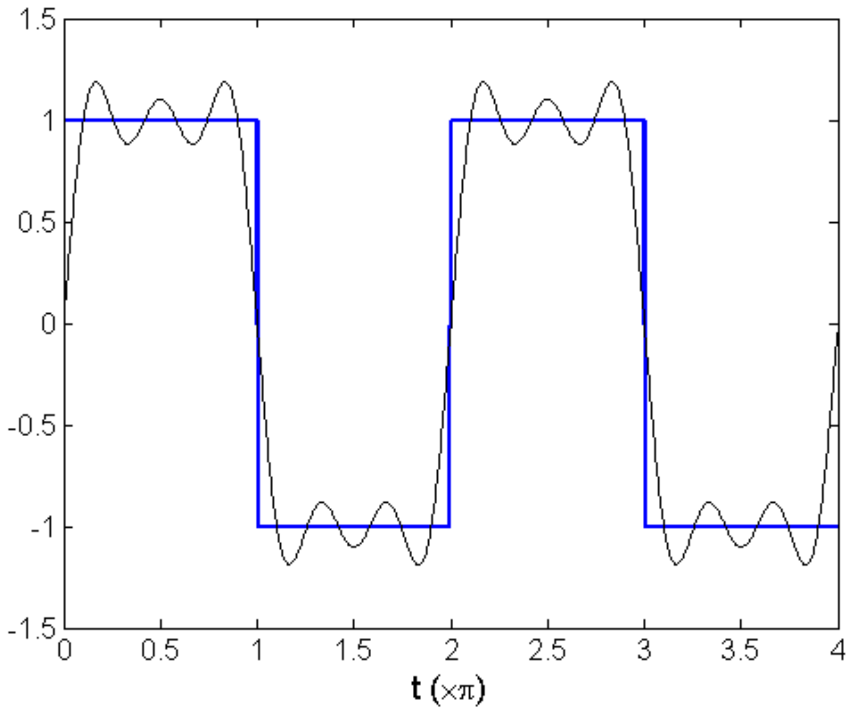
Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign\left[sen(t)\right]$

;

Representação temporal da série truncada a um número finito de modos.

k=1,3,5



Aula de Processamento de Sinais

➢Representação de sinais em séries de Fourier:

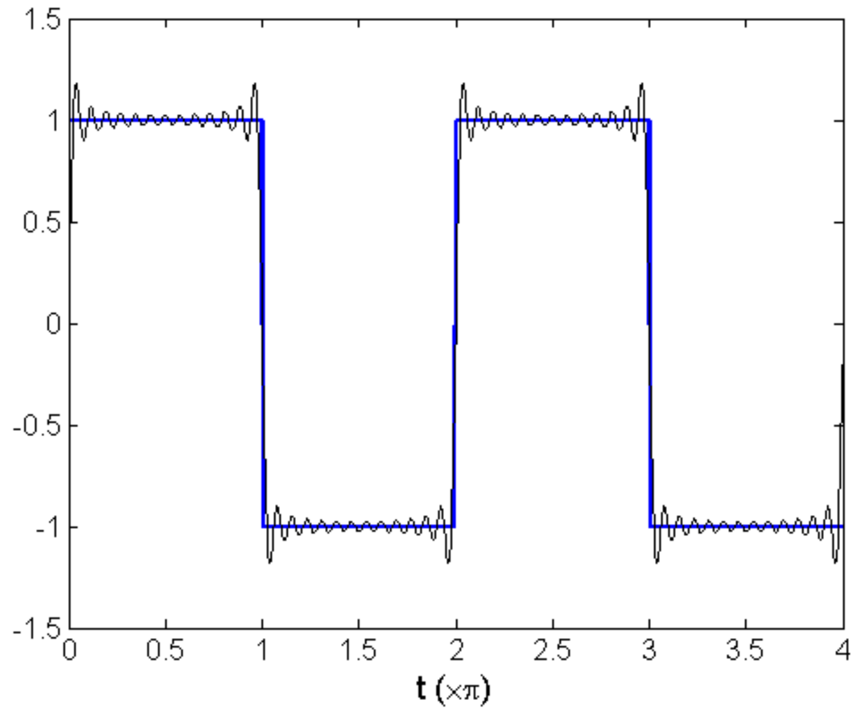
Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

;

Representação temporal da série truncada a um número finito de modos.

k=1,3,5..25



➢Representação de sinais em séries de Fourier:

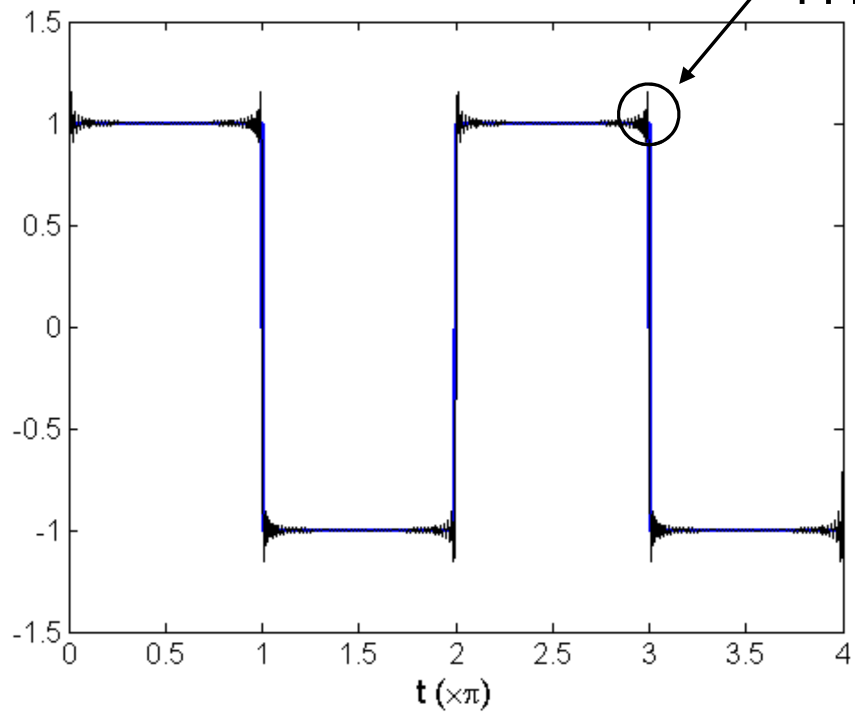
Exemplo)

➢ Onda quadrada: $x(t) = sign[sen(t)]$

;
Representação temporal da série truncada a um número finito de modos.

????

k=1,...,99

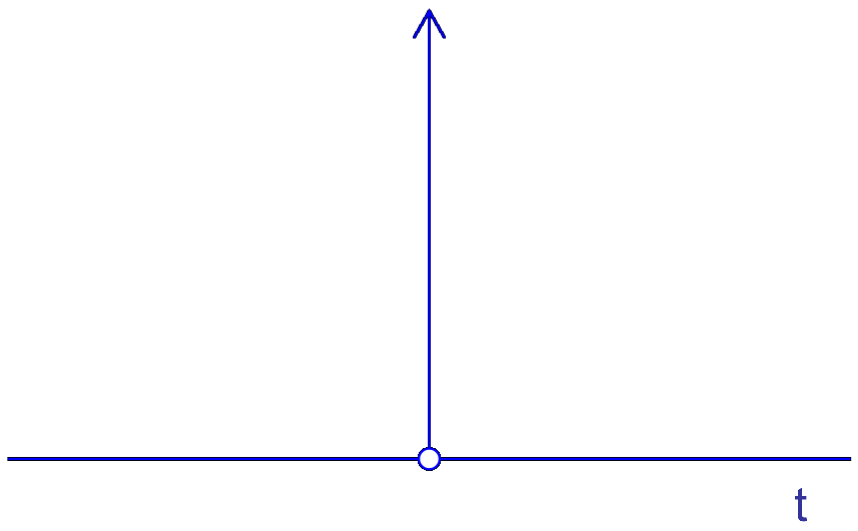


➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

Exemplo 2)

➢ Delta de Dirac δ(t):

Função pulso.



➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

Exemplo 2)

➢ Delta de Dirac δ(t):

Antes de calcular a série de Fourier é necessário relembrar algumas propriedades fundamentais da função delta de Dirac.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1;$$

$$\int_{a-\varepsilon}^{a+\varepsilon} \delta(t-\tau) f(t)dt = f(\tau)$$

E também definir um período para a função: $-\pi<t<\pi$.

➢Representação de sinais em séries de Fourier:

Exemplo 2)

➢ Delta de Dirac δ(t-*τ*): com *τ=0*

Os coeficientes da serie de Fourier dessa função são dados por:

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_{-\pi}^{\pi}\delta(t)dt = \frac{1}{\pi}$$

$$a_k = \frac{2}{T}\int_{-\pi}^{\pi}\delta(t)\cos(kt)dt = \frac{1}{\pi}\cos(k\cdot 0) = \frac{1}{\pi}, \qquad k = 1,2,3\ldots$$

$$b_k = \frac{2}{T}\int_{-\pi}^{\pi}\delta(t)sen(kt)dt = \frac{1}{\pi}sen(k\cdot 0) = 0, \qquad k = 1,2,3\ldots$$

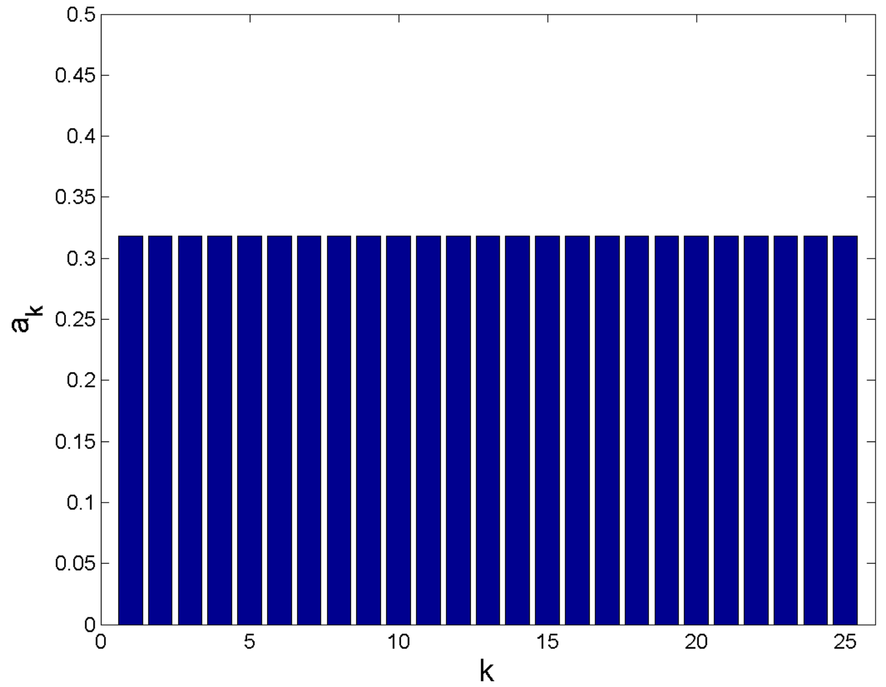
➢Representação de sinais em séries de Fourier:

Exemplo 2)

➢ Delta de Dirac:

Representação espectral da série

;



➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

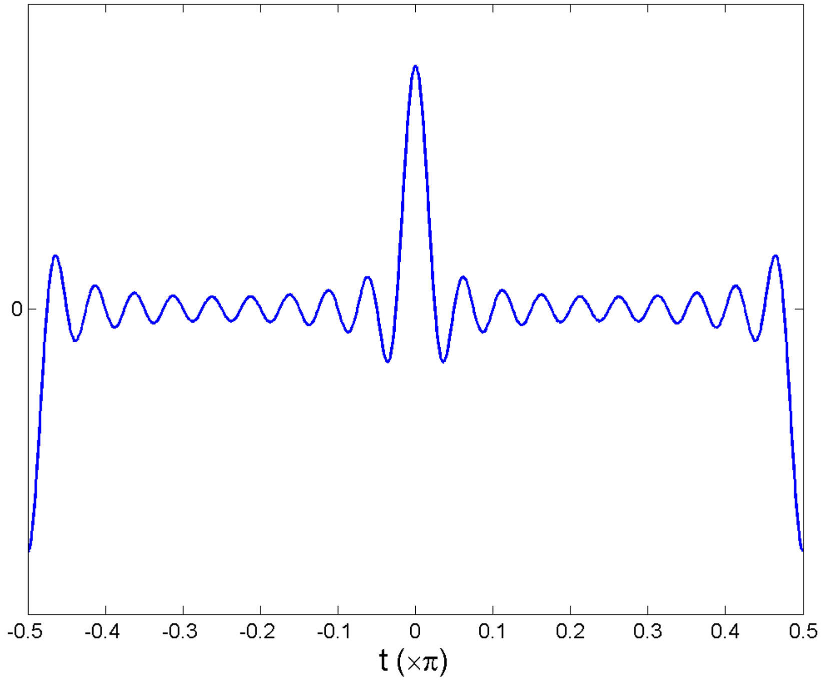
Exemplo 2)

➢ Delta de Dirac:

Representação da série truncada a um número finito de modos

;

k=1...10



➢ <u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

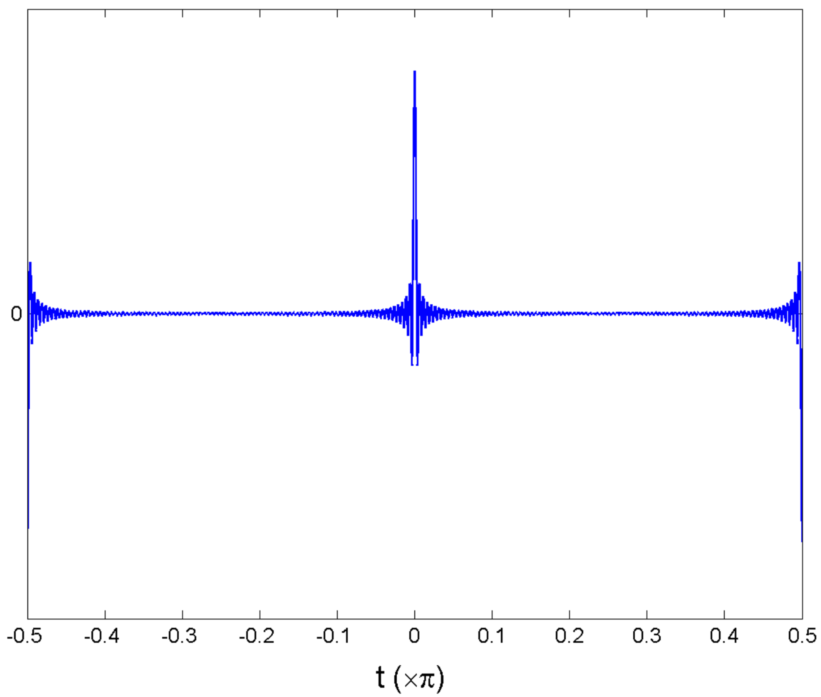
Exemplo 2)

➢ Delta de Dirac:

Representação da série truncada a um número finito de modos

;

k=1...100



➢<u>Representação de sinais em séries de Fourier</u>:

Exemplo 2)

➢ Delta de Dirac:

;

➢*Com base na representação da função delta de Dirac, nota-se que um evento localizado no tempo distribui energia para todos os modos no domínio da freqüência*;

➢*Regiões onde existe descontinuidade no tempo necessitam de um grande número de termos para um representação razoável da série temporal*.

➢*Esse efeito devido ao truncamento da série a um número finito de modos é conhecido como* ***efeito de Gibbs***

➢<u>Introdução a Transformada de Fourier (FT)</u>:

A representação de sinais através da série de Fourier é limitada, pois a série só pode ser calculada para sinais periódicos e de período conhecido.

Para criar um método mais robusto que pudesse ser aplicado a quase todos os tipos de sinais Fourier desenvolveu uma transformada baseada no mesmo princípio de representação em series de senos e cossenos

A transformada de Fourier permite que sinais que ocorrem sem periodicidade também tenham uma representação no domínio das freqüências.

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢Introdução a Transformada de Fourier (FT):

Relembrando a formulação da representação em freqüências da série de Fourier :

$$F(\omega_0 k) = \begin{cases} a_k & ,termo \text{ cosseno} \\ b_k & ,termo\, seno \end{cases}$$

utilizando a notação exponencial: $e^{-i\omega t} = \cos(\omega t) - isen(\omega t)$

$$F(\omega_0 k) = \begin{cases} c_{kREAL} & ,relacionado\, ao\, termo\, \text{cosseno} \\ c_{kIMAG} & ,relacionado\, ao\, termo\, seno \end{cases}$$

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➤<u>Introdução a Transformada de Fourier (FT)</u>:

A série pode ser reescrita como: $$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{-i\omega_0 kt}$$

Com os coeficientes c_k dados por: $$c_k = \frac{1}{T}\int_T x(t)e^{-i\omega_0 kt}dt$$

Para um domínio de [–∞; +∞], o período T tende a ∞ enquanto que a a freqüência fundamental (ω_0) tende para 0. Assim as componentes c_k's formam um contínuo.

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢ <u>Transformada de Fourier (FT)</u>:

O somatório da série de c_k's se converte em uma integral, obtendo-se assim a transformada de Fourier.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt$$

onde $X(\omega)$ é o sinal $x(t)$ no domínio da freqüência. A operação inversa para transformar o sinal $X(\omega)$ do domínio para o tempo é dada pela transformada inversa (IFT)

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

➢ <u>Transformada de Fourier (FT)</u>:

FT

Tempo, espaço

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt$$

Freqüência, número de onda

IFT

A transformada permite que o mesmo sinal possua representação tanto no tempo quanto na freqüência.

Ao longo dos anos essa provou ser uma das ferramentas de análise de dados mais utilizadas nos mais diversos campos de estudo.

➢<u>Transformada de Fourier (FT)</u>:

Tempo, espaço

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)^2\, dt \iff \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)^2\, d\omega$$

Freqüência, número de onda

De acordo com o teorema de Rayleigh a potência dos sinais é a mesma não importando o domínio (muito útil para sinais).

➢ Transformada de Fourier (FT):

Diferença em relação a série:

Na série de Fourier o intervalo de amostragem no tempo (Δt) tende a zero o que resulta em infinitos modos harmônicos no domínio da frequência.

Na transformada de Fourier o período de amostragem tende a infinito, de modo que a resolução no domínio da frequência ($\Delta\omega$) tende a 0.

Isso implica que a transformada é uma função contínua no domínio da frequência.

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢ <u>Transformada Discreta de Fourier (DFT)</u>:

Para o uso da transformada no processamento digital de sinais é necessário a utilização da transformada discreta de Fourier (DFT).

Para restringir os limites de integração da transformada a um número finito de pontos, assume-se que o sinal amostrado seja periódico e de período igual ao período de amostragem.

Isso equivale a dizer que para a transformada a série temporal de dados se repete periodicamente, em um intervalo de tempo igual a N·Δt, até um tempo infinito.

A versão da transformada para pontos discretos é dada em termos de somatório de pontos:

$$X_k = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-i\frac{j2\pi k}{N}}, \qquad para \;\; k = 0,1,...,N-1$$

➢Transformada Discreta de Fourier (DFT):

$$X_k = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-i\frac{j2\pi k}{N}}, \qquad para \;\; k = 0,1,\ldots,N-1$$

Transformada Inversa (IDFT):

$$x_j = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i\frac{j2\pi k}{N}}, \qquad para \;\; k = 0,1,\ldots,N-1$$

Para cada frequência correspondente a k um somatório deve ser computado.

Isso resulta em N^2 operações, o que torna o processo caro do ponto de vista computacional.

➢Transformada Rápida de Fourier (FFT):

Para reduzir o número de operações e aumentar a eficiência no cálculo da transformada foram criados algoritmos chamados de transformadas rápidas de Fourier (Fast Fourier Transform- FFT).

Nesses métodos o número de operações realizadas para o cálculo da transformada é reduzido para O(Nlog(N)) operações.

Ex: Para uma série de 1024 dados:

$$N^2=1048576;$$

$$N\log(N)\sim 3083!!!$$

Esses métodos são extremamente úteis mesmo com o atual aumento da capacidade de processamento dos computadores

Aula de Processamento de Sinais

➢Transformada Rápida de Fourier (FFT):

Os coeficientes da FFT permitem que a amplitude e a fase do sinal sejam obtidos para cada modo k de maneira análoga à série de Fourier

$$A_k = \sqrt{real(X_k^2) + imag(X_k^2)};$$

$$\phi_k = \tan^{-1}\left(\frac{imag(X_k)}{real(X_k)}\right).$$

Aula de Processamento de Sinais

➢ Transformada Rápida de Fourier (FFT):

Os limites de integração da FFT são finitos, consequentemente a resolução no domínio das frequências fica limitada ao período de amostragem do sinal

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{1}{T} = \frac{f}{N}$$

A frequência de cada modo k da FFT é dada por:

$$f_k = \frac{k}{N\Delta t} = \frac{kf}{N}$$

➢ Transformada Rápida de Fourier (FFT):

A discretização dos dados no tempo também acarretam limitação na FFT.

A relação entre intervalo de amostragem e a frequência máxima do espectro é dada pela teoria de amostragem de Shannon-Nyquist.

A frequência máxima que pode ser resolvida é igual a metade da frequência de amostragem fs, onde fs = $1/\Delta t$.

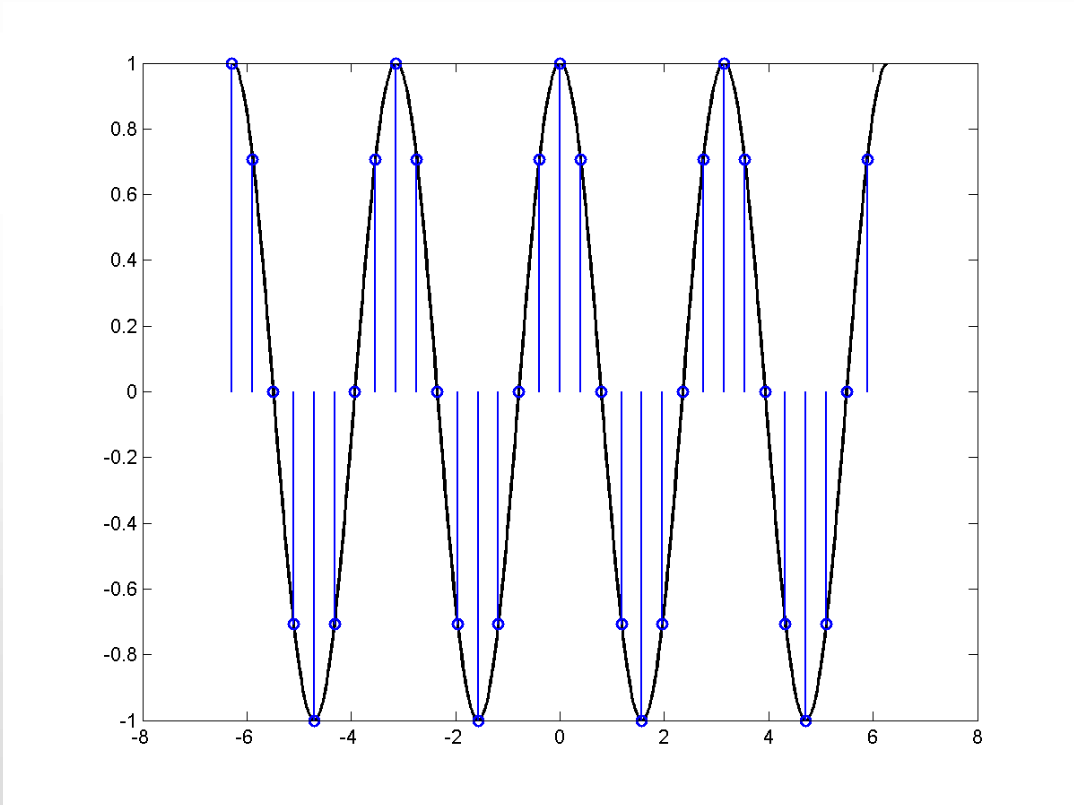
Essa frequência limite é chamada de frequência de **Nyquist.** (Demonstração detalhada na aula de laboratório)

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

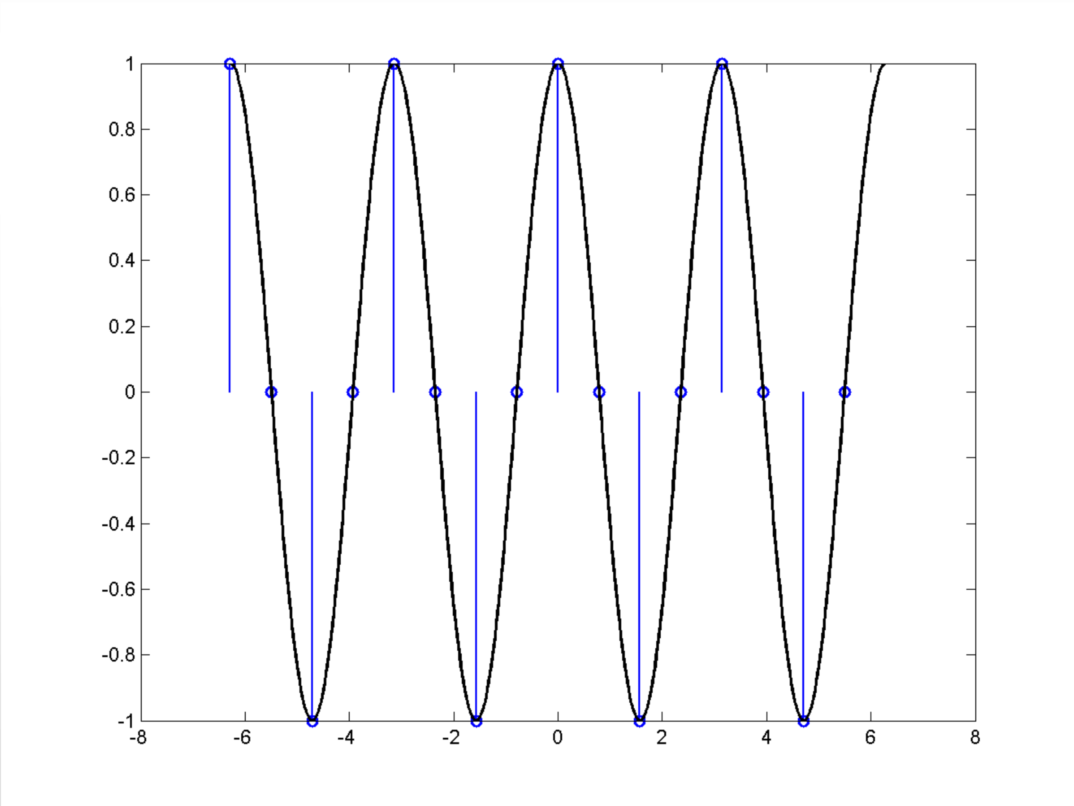
➢ Transformada Rápida de Fourier (FFT):

Frequência de **Nyquist.** (Demonstração detalhada na aula de laboratório)



➢<u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Frequência de **Nyquist.** (Demonstração detalhada na aula de laboratório)

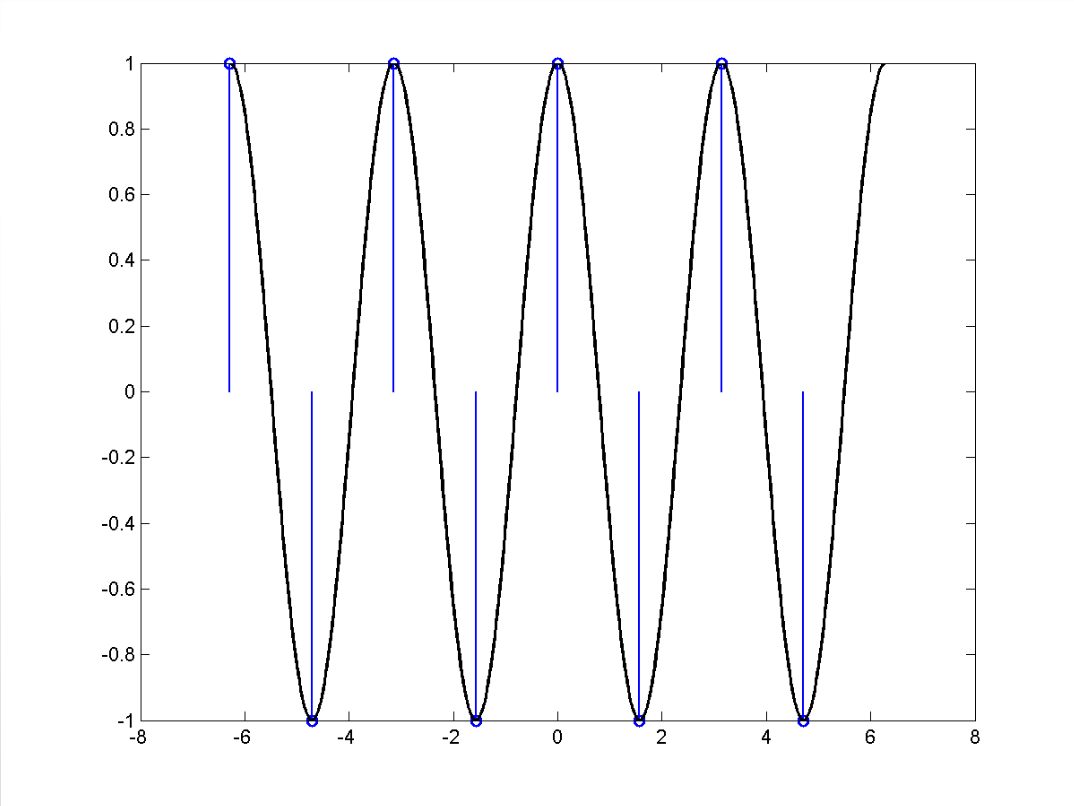


Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

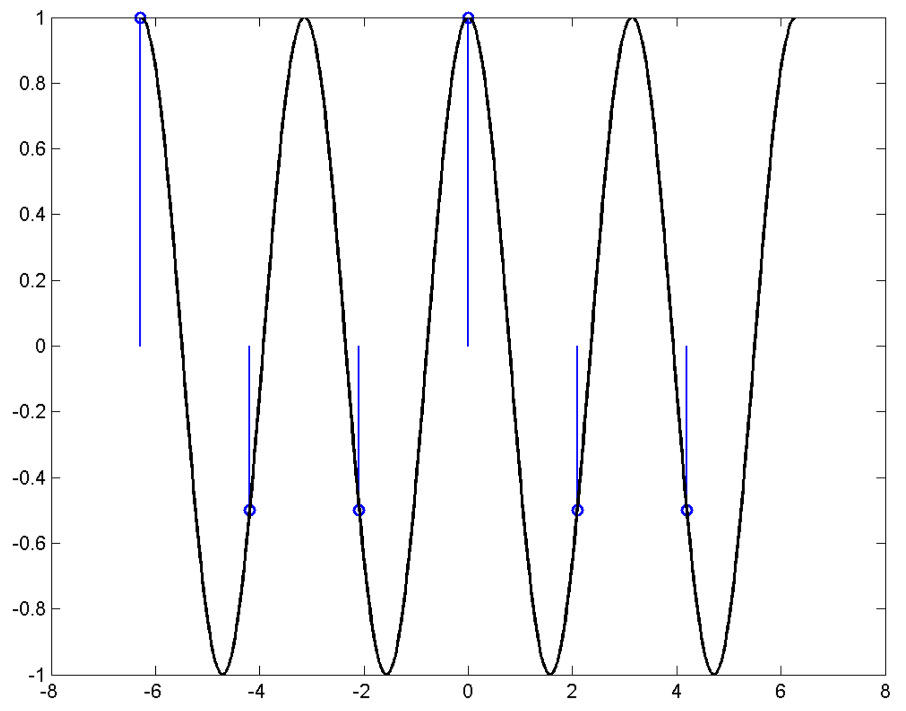
➢<u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Frequência de **Nyquist.** (Demonstração detalhada na aula de laboratório)



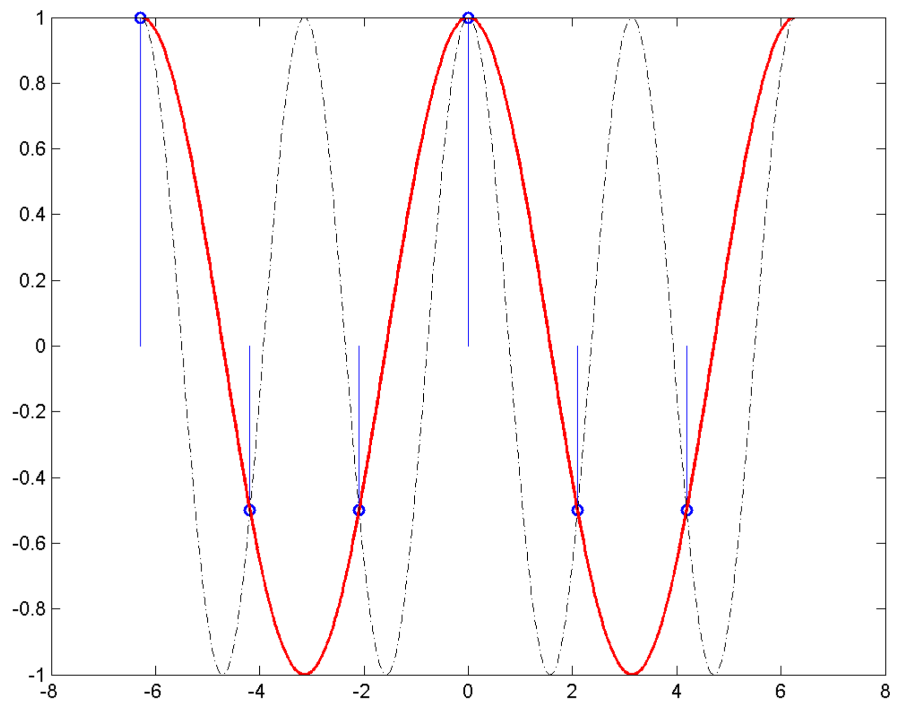
➢<u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Frequência de **Nyquist.** (Demonstração detalhada na aula de laboratório)



➢ Transformada Rápida de Fourier (FFT):

Frequência de **Nyquist.** (Demonstração detalhada na aula de laboratório)



Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢Transformada Rápida de Fourier (FFT):

Algoritmos e funções para o cálculo da transformada rápida de Fourier encontram-se disponíveis em várias bibliotecas para diferentes linguagens de programação.

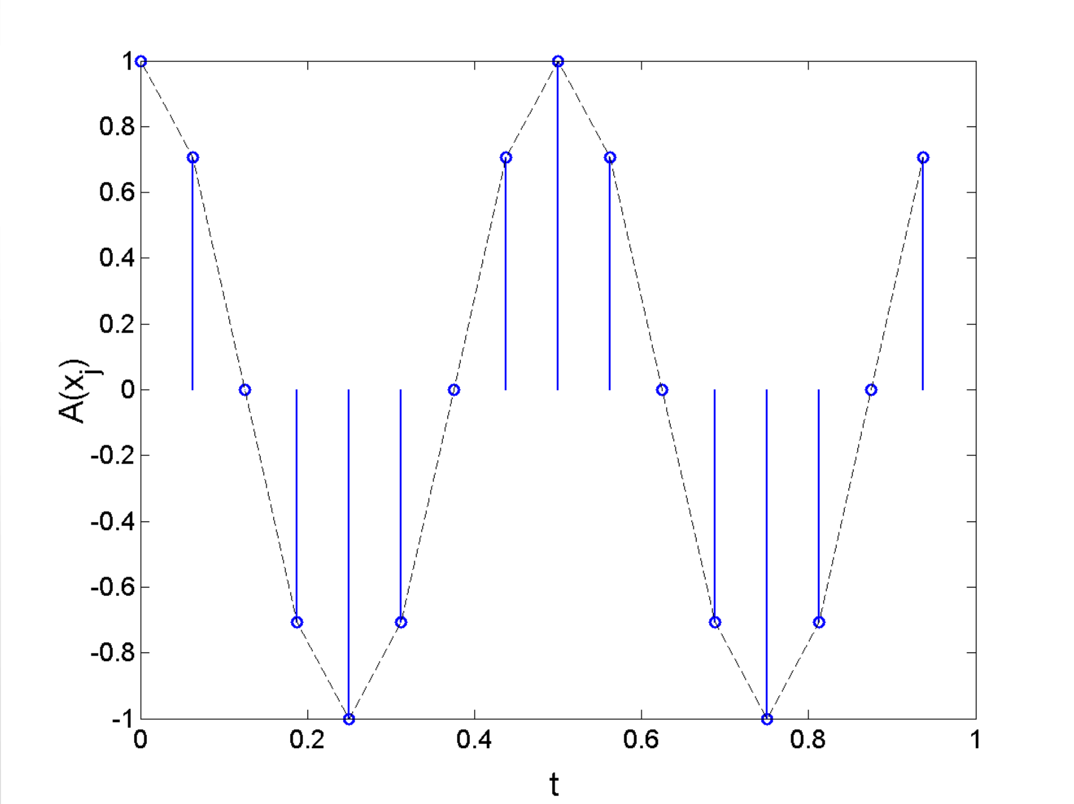
Uma compilação dessas rotinas pode ser encontrada no endereço http://www.nr.com/ (numerical recipes).

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢Transformada Rápida de Fourier (FFT):

➢**Exemplo 3)** cos(2* π *(2*t)) com t=[0,1| e com N=16

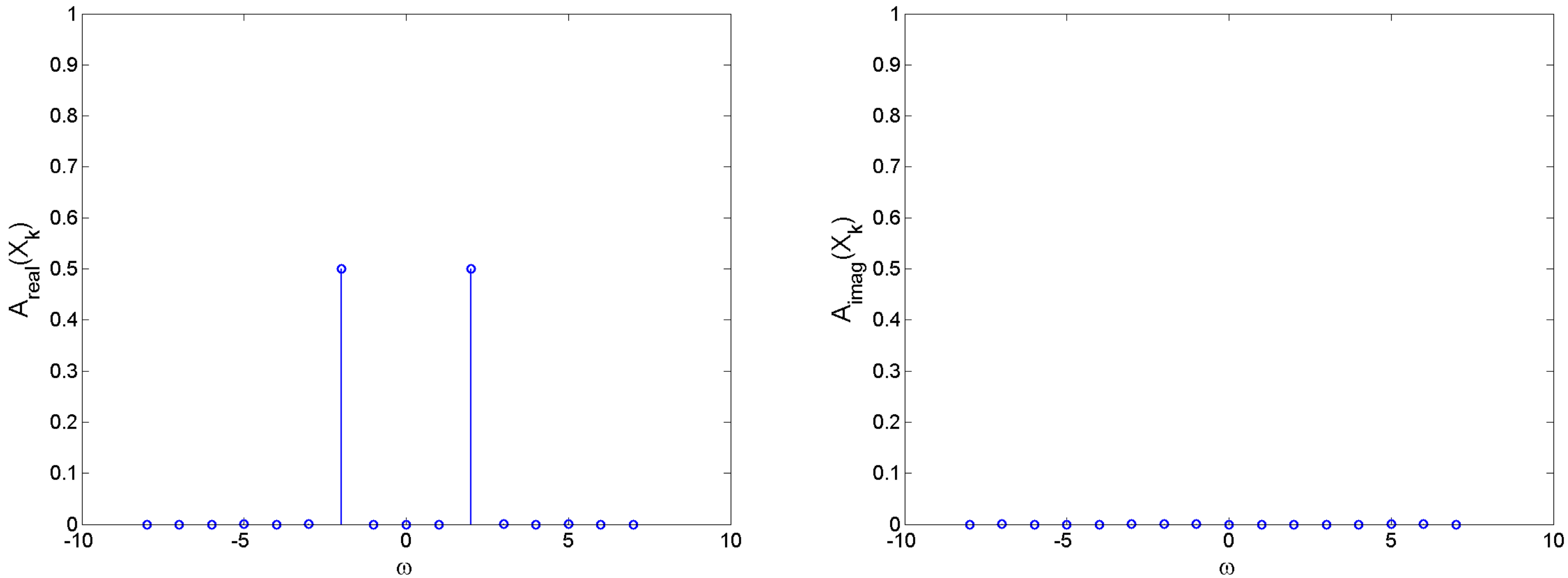


Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢ <u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Exemplo 3) cos(2* π *(2*t)) com t=[0,1| e com N=16



Frequências positivas e negativas!?! FT assume periódico de –∞ a + ∞.

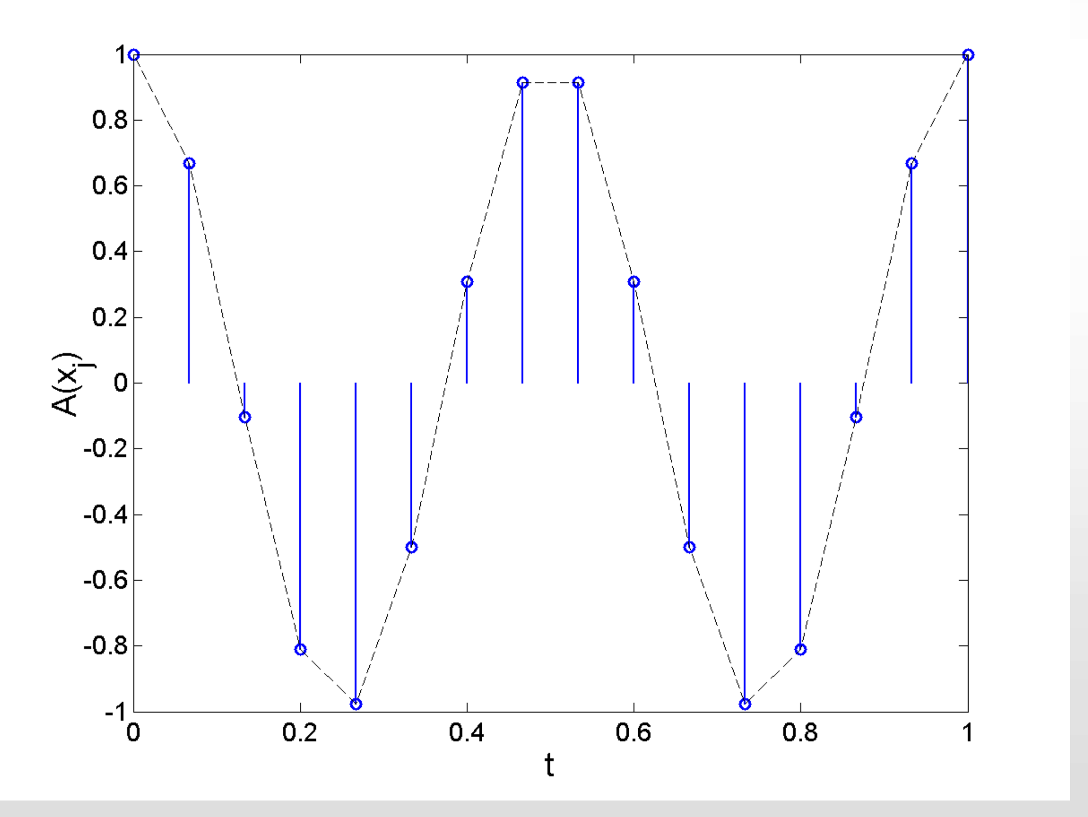
A transformada inclui também os valores do conjugado complexo dos coeficientes X_k, de modo que para uma série de dados real X_k=-i*X_{-k}.

Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

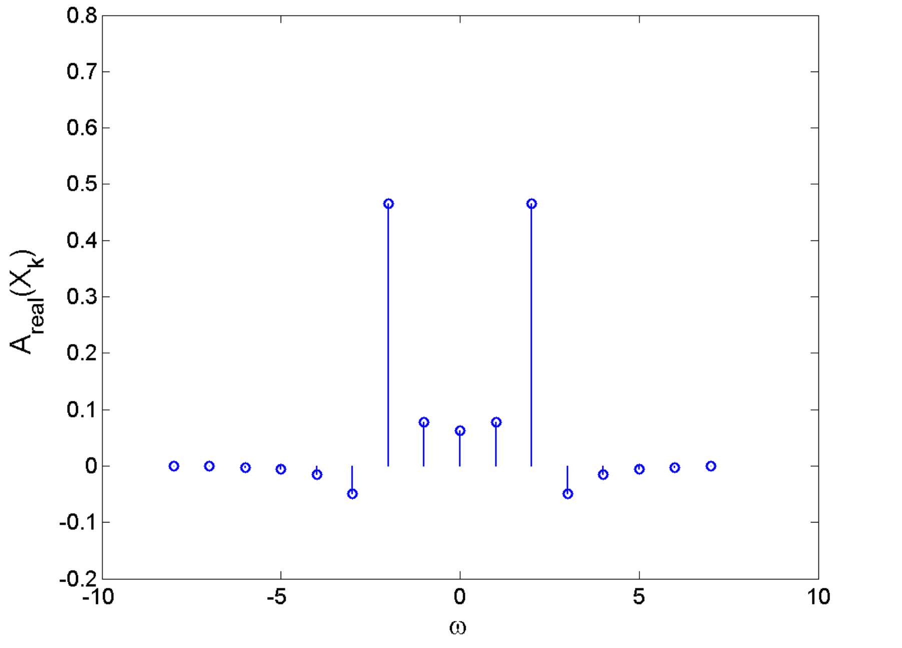
➢<u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

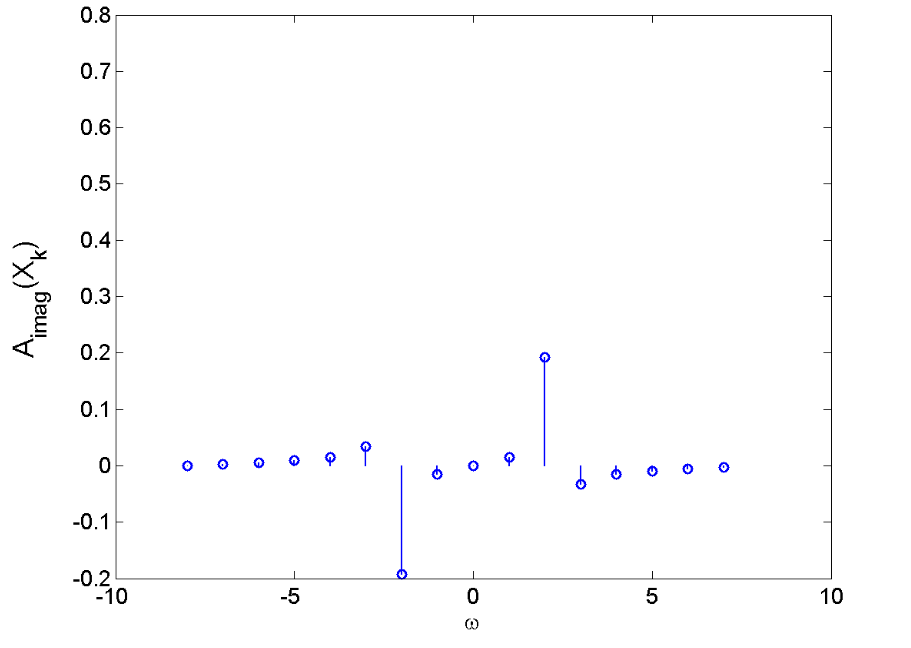
➢**Exemplo 3)** cos(2* π *(2*t)) com t=[0,1**]** e com N=16



➢ <u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Exemplo 3) cos(2* π *(2*t)) com t=**[**0,1**]** e com N=16





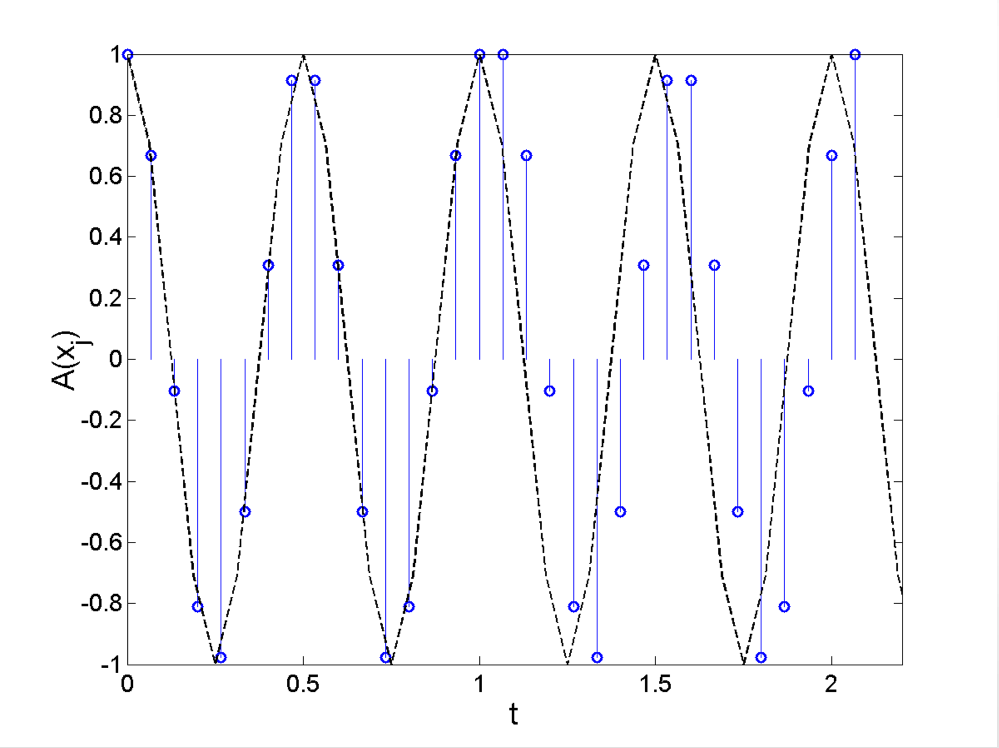
Espalhamento em vários modos

➢ <u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Exemplo 3) cos(2* π *(2*t)) com t=[0,1**]** e com N=16

Espalhamento em vários modos ocorre devido a não periodicidade do sinal com relação ao período de amostragem.

Causa descontinuidade e tem efeito semelhante ao observado na série de Fourier



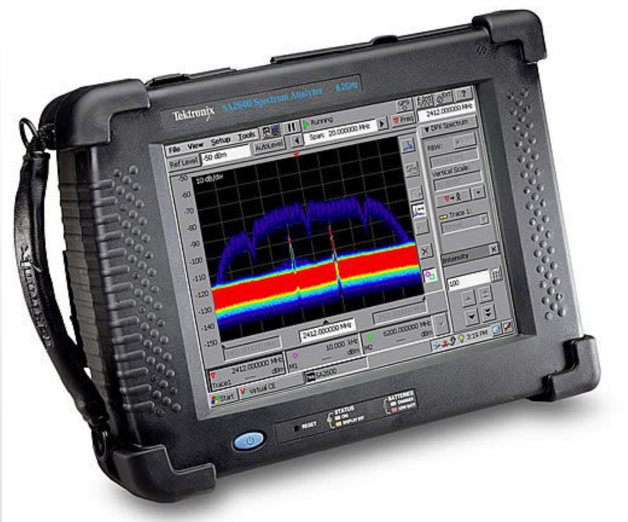
Aula de Processamento de Sinais

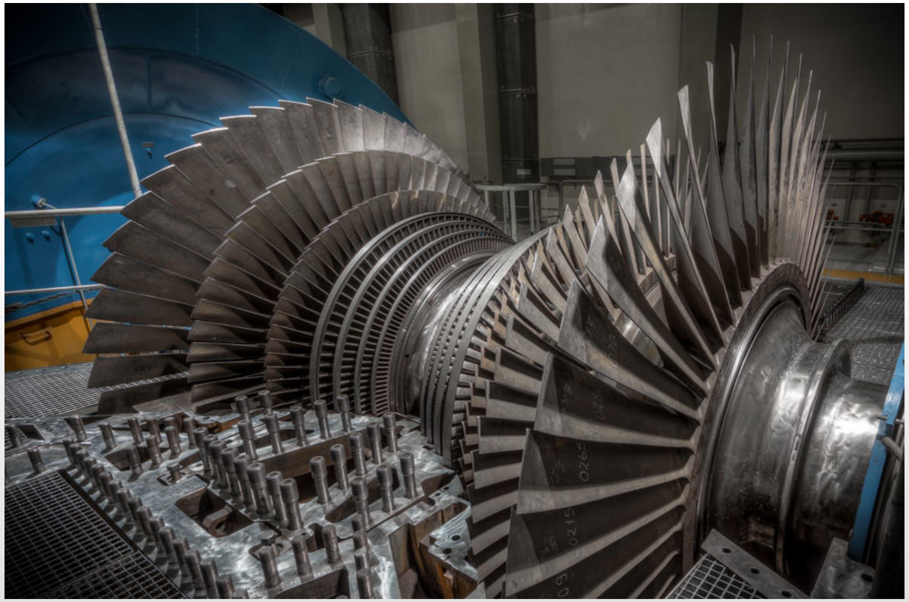
I.B De Paula

➢ <u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Exemplos de aplicação (somente algumas pois são inúmeras):

- ➢ Análise de vibrações;





Aula de Processamento de Sinais

I.B De Paula

➢<u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

Exemplos de aplicação (somente algumas pois são inúmeras):

➢Audio (processamento e compactação);

Aula de Processamento de Sinais

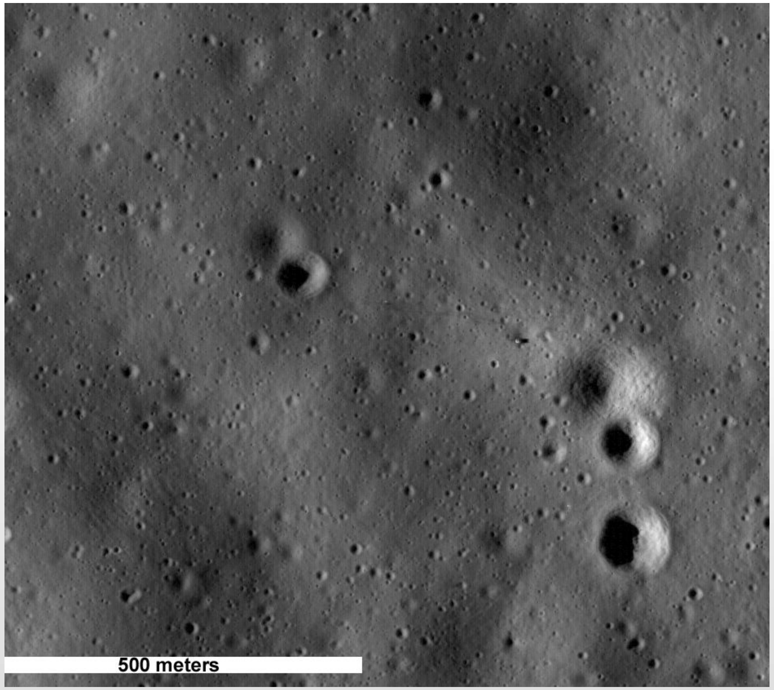
I.B De Paula

➢ <u>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</u>:

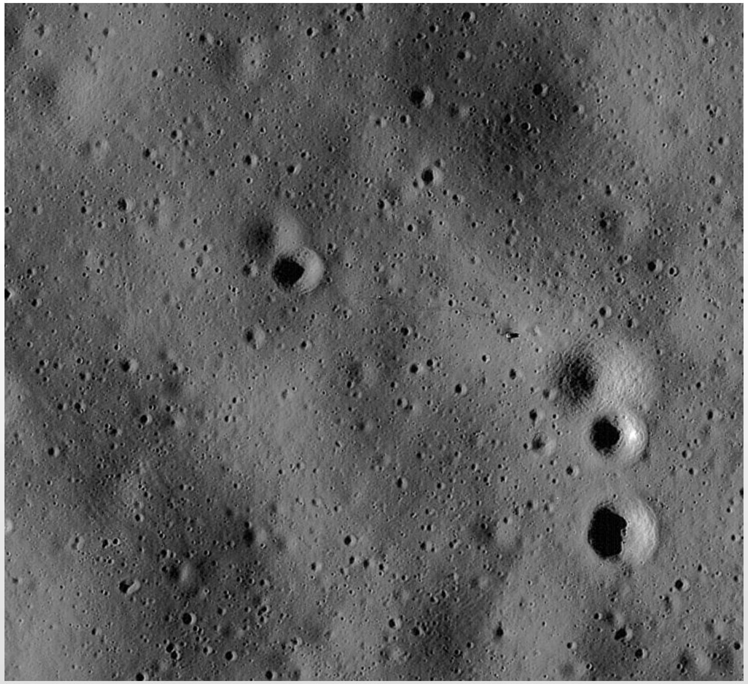
Exemplos de aplicação (somente algumas pois são inúmeras):

➢ Processamento de imagens (Superfície Lunar – Apolo 14);

Sem Processamento



Após processamento

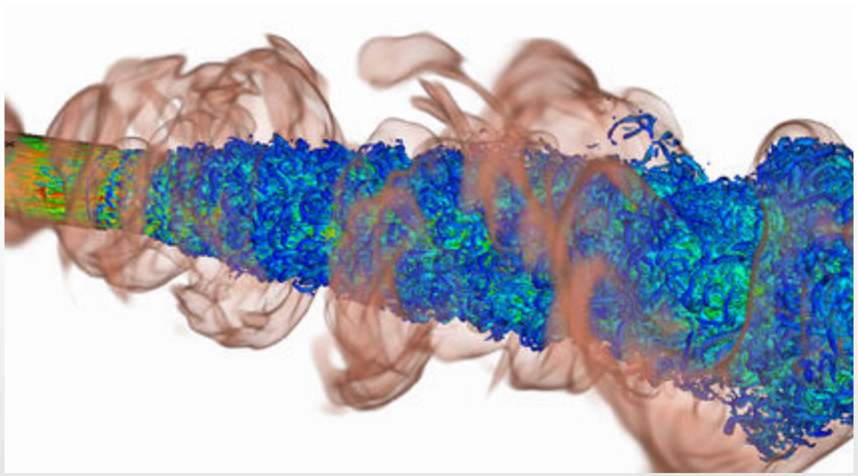


Aula de Processamento de Sinais

➢Transformada Rápida de Fourier (FFT):

Exemplos de aplicação (somente algumas pois são inúmeras):

➢Solução de equações diferenciais (Ex:.Simulação das Eq. de Navier-Stokes de um jato. Obs: campo acústico em cinza)



…continua no próximo capítulo