

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

1. INTRODUÇÃO / DEFINIÇÕES

1.1 - Instrumentação

- Importância
- Medições experimentais ou de laboratório.
- Medições em produtos comerciais com outra finalidade principal.

1.2 - Transdutores e Sensores

Medições $\Rightarrow$ Transdutores

Transdutor $\Rightarrow$ Sistema que converte energia de uma forma para outra com o objetivo de se realizar uma medição.

Transdutores de saída ou atuadores $\Rightarrow$ convertem energia elétrica, pneumática ou hidráulica em força mecânica.

Transdutores de entrada ou sensores
⇒ convertem grandezas como temperatura, pressão, força, campo magnético, etc. em energia elétrica (forma mais adequada para se realizar uma medição e processar os sinais).

Transdutor ⇒ sistema completo que gera um sinal elétrico proporcional à grandeza medida.

Sensor ⇒ parte sensível do transdutor.

Três tipos fundamentais de transdutores:

a) Modificador

Energia entrada ⇒ Energia de saída de mesma forma

A energia é modificada em vez de ser convertida. Exemplo: filtro passa banda, que pode ser usado para medir a energia dentro de uma faixa de frequências determinada.

b) Gerador

Energia entrada $\Rightarrow$ Energia de saída de nova forma

Os sinais são gerados diretamente de uma entrada “não - elétrica”, sem a aplicação de nenhuma energia externa. Ex.: termopares, acelerômetros piezoelétricos.

Sinais de saída de baixa energia $\Rightarrow$ amplificação necessária.

c) Modulador

Energia entrada + fonte externa de energia $\Rightarrow$ Energia de saída de nova forma

Necessitam de uma fonte externa para funcionar. Ex.: extensômetros resistivos.

1.3 - Sinal Elétrico

Variação de uma grandeza física $\Rightarrow$ sensor $\Rightarrow$ sinal elétrico

O sinal varia numa razão conhecida como sensibilidade ou função de transferência do transdutor.

Sinais de saída $\Rightarrow$ Δ tensão (preferida)
 Δ corrente
 Δ carga

Circuitos de tratamento de sinais $\Rightarrow$ conversão em sinais de tensão (se necessário), amplificação, filtragem e remoção de ruídos.

Analógico $\Rightarrow$ equipamento ou tecnologia que trata de sinais elétricos de tensão que podem apresentar qualquer valor e que variam de incrementos infinitesimalmente pequenos.

Digital $\Rightarrow$ equipamento ou tecnologia que trata de sinais elétricos que só apresentam valores que possam ser escritos na forma binária.

Incrementos são sempre de bit em bit $\Rightarrow$ quanto maior o número de incrementos desejados para representar um número, maior a quantidade de bits necessários $\Rightarrow$ quanto maior a resolução desejada, maior o número de bits.

Exemplo:

Decimal	Binário
4	100
40	101000
400	110010000
4000	111110100000

Sistema digital $\Rightarrow$ processamento mais elaborado do sinal (mais flexível em termos de programação) $\Rightarrow$ limitações quando se trabalha com sinais “quase contínuos”.

Tipo de processamento de sinal depende do tipo de informação desejada. Ex.:

Amplitude $\Rightarrow$ analógico

Tratamento matemático $\Rightarrow$ digital

1.4 - Instrumento

Sistema que mantém uma determinada relação entre uma grandeza ou parâmetro que está sendo medido e alguma outra variável física usada para a saída de dados.

Saída $\Rightarrow$ observador humano
 outro sistema de medição
 sistema de controle

Verificação da relação funcional adequada entre grandeza medida e o sinal de saída $\Rightarrow$ calibração estática e dinâmica do instrumento.

Instrumento ou sistema de medição pode apresentar alguns ou todos os seguintes elementos:

- Elemento sensor primário
- Transdutor
- Tratamento do sinal (amplificador)
- Conversor analógico / digital
- Comunicação de dados
- Análise do sinal
- Saída

O comportamento de cada elemento interfere no desempenho do sistema.

Um sistema que está sendo medido sempre é afetado pelo instrumento $\Rightarrow$ deve-se minimizar este efeito.

Ex.: sistema vibratório $\Rightarrow$ relação entre as massas do sistema e sensor (acelerômetro).

1.5 - Características de Instrumentos

São importantes para:

- Medir o desempenho do instrumento
- Avaliar a aplicabilidade do instrumento para realizar determinada medição
- Comparar instrumentos diferentes quanto ao uso e desempenho

1.5.1 - Faixa

Faixa (ou “range”) indica os níveis de amplitude do sinal de entrada nos quais o transdutor opera.

1.5.2 - Resolução

Resolução é o menor incremento do sinal de entrada que é sensível ou que pode ser medido pelo instrumento.

Exemplos:

Analógico $\Rightarrow$ menor subdivisão da escala

Digital $\Rightarrow$ uma unidade do último algarismo significativo (último dígito), que corresponde ao bit menos significativo do conversor A/D

Óptico $\Rightarrow$ menor distância entre dois pontos que, observados através do instrumento, são percebidos como dois pontos distintos, em vez de se confundirem num único ponto

1.5.3 - Sensibilidade

É a função de transferência do transdutor, ou seja, a relação entre a entrada no transdutor e o sinal de saída por ele produzido.

1.5.4 - Linearidade

Aferição instrumento x padrão $\Rightarrow$ erros

Linearidade = erro máximo (máxima diferença entre o valor medido e o valor padrão) dividido pela faixa ("range"), vezes 100%.

1.5.5 - Histerese

Propriedade pela qual a resposta a um determinado estímulo depende da seqüência de estímulos precedentes.

Sinal de entrada crescente $\Rightarrow X$
Sinal de entrada decrescente $\Rightarrow X'$

Causas $\Rightarrow$ atritos internos, resposta de frequência, inércia, etc.

1.5.6 -Exatidão ou erro

É a diferença entre o valor medido pelo instrumento e o valor real do padrão.

Pode ser fornecido de várias formas:

- porcentual, para indicação de erro relativo, tomando como referência o fundo de escala
- para vários pontos da escala $\Rightarrow$ curva de calibração
- erro máximo para a faixa de utilização do instrumento

1.5.7 - Precisão ou repetibilidade

É a capacidade do instrumento indicar o mesmo valor quando se faz diversas medições do mesmo valor padrão.

Pode ser dada pelo desvio padrão das medidas ou pelo maior erro encontrado.

Exatidão $\Rightarrow$ média

Precisão $\Rightarrow$ dispersão

1.5.8 - Relação sinal / ruído

É a relação entre a potência de um sinal qualquer na saída do instrumento e a potência do sinal de ruído (sinal de saída quando não existe “input” no aparelho).

Pode ser dado em decibéis (dB) (10 vezes o log da relação sinal/ruído).

1.5.9 - Estabilidade

É a capacidade de um circuito eletrônico voltar a uma situação de regime permanente depois de receber um sinal transitório, como por ex., um sinal degrau ou pulso.

Depende principalmente do ganho de realimentação e da frequência de ressonância do sistema.

1.5.10 - Isolação

É a maior tensão que pode estar presente num determinado circuito do instrumento ou transdutor sem que haja ruptura da junção dielétrica entre o determinado ponto e o potencial de terra do instrumento, provocando descarga elétrica.

Segurança do usuário $\Rightarrow$ aparelhos de medida em altas tensões, equipamentos médicos, etc.

1.5.11 - Deriva

Deriva (“drift”) representa a mudança de algum parâmetro com o passar do tempo.

Envelhecimento de componentes, variações de temperatura, etc.

Indicado por uma variação de propriedade em relação a outra grandeza. Ex.: resistor com “drift” de $-5\%/^{\circ}\text{C}$

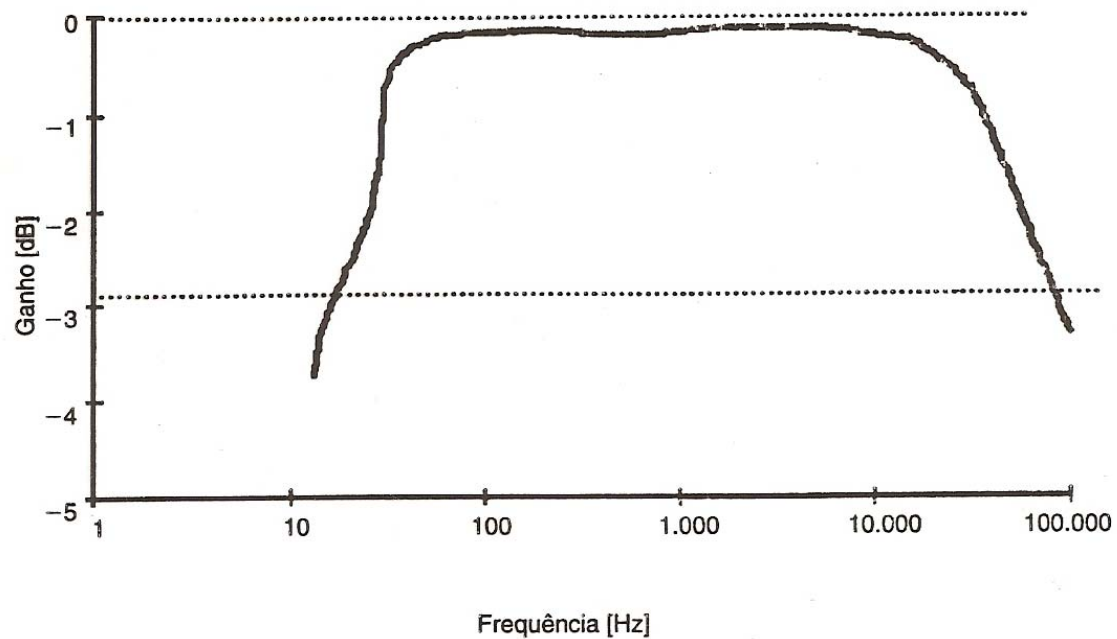
1.5.12 - Resposta de Freqüência

Qualquer sistema eletrônico que trabalha sinais elétricos tem suas limitações em freqüências $\Rightarrow$ sinais de determinadas freqüências são reproduzidos e de outras, não são.

Resposta de freqüência $\Rightarrow$ faixa do espectro que determinado sistema pode reproduzir.

Teoria de Bode $\Rightarrow$ faixa de passagem ou largura de faixa é o intervalo de freqüências em que, para uma dada freqüência, a potência do menor sinal de saída é maior ou igual à metade da potência do maior sinal de entrada.

Diagrama de Bode típico da resposta de frequência de um amplificador de áudio:



Cada ponto do diagrama é calculado por:

$$\text{dB} (f_j) = 10 \log [P_2 (f_j) / P_1 (f_j)]$$

para $j = 1, 2, 3, \dots n$

onde:

$\text{dB} (f_j)$	é o valor da ordenada do diagrama de Bode na frequência f_j (em decibéis)
$P_2 (f_j)$	é a potência do sinal de saída na freq. f_j
$P_1 (f_j)$	é a potência do sinal de entrada na freq. f_j
j	varia de 1 a n , sendo f_1 a menor frequência de interesse e f_n a maior frequência de interesse

1.5.13 - Espectro de Potência e Largura de Faixa

Para a medição de grandezas que variam com o tempo, é necessário que o instrumento utilizado seja capaz de acompanhar esta variação. A idéia da velocidade com que um sinal varia é dada pelo espectro de potência dentro de sua faixa de freqüências.

Largura de faixa $\Rightarrow$ “range” de variação da freqüência de um determinado sinal.

Espectro de potência do sinal $\Rightarrow$ importante para o projeto do sistema de medição.

Espectro de potência $\Rightarrow$ medida do grau de variação de um sinal qualquer $\Rightarrow$ apresenta o sinal como uma soma de diversas senóides de diferentes freqüências e amplitudes.

Cada uma dessas componentes do sinal mostra como ele se comporta naquela determinada frequência.

Decomposição do sinal em suas componentes fundamentais $\Rightarrow$ teorema de Fourier.

Teorema de Fourier $\Rightarrow$ qualquer sinal (desde que não apresente descontinuidades) pode ser decomposto em uma série de senóides cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência mínima de repetição da função e cujas magnitudes são determinadas de tal forma que, quando todas as senóides forem adicionadas ponto a ponto, a função original será reproduzida.

Esta série de senóides é chamada série de Fourier e o conjunto de coeficientes é conhecido como o espectro da função.

Um sinal representado como uma função do tempo pode ser decomposto e expresso como uma combinação de componentes harmônicas simples. Cada componente tem sua própria amplitude e frequência e serão combinadas em diferentes relações de fase com as outras componentes. Matematicamente:

$$f(t) = A_0 + \sum [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)]$$

onde

A_0	A_n	B_n	constantes que determinarão a amplitude, chamadas coeficientes harmônicos
n	inteiros de 1 a ∞ chamados ordens harmônicas		

Para $n = 1$ os correspondentes termos em seno e cosseno são ditos fundamentais. Para $n = 2, 3, 4$, etc. os termos são chamados de 2º, 3º, 4º harmônicos e assim por diante.

A equação anterior pode ser escrita de duas outras formas equivalentes:

$$f(t) = C_0 + \Sigma [C_n \cos (n\omega t - \phi_n)]$$

ou

$$f(t) = C_0 + \Sigma [C_n \sen (n\omega t - \phi'_n)]$$

onde os coeficientes harmônicos C_n são determinados por:

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$A_n = (1 / T) \int_0^T f(t) \cos (n\omega_0 t) dt$$

$$B_n = (1 / T) \int_0^T f(t) \sin (n\omega_0 t) dt$$

(T é o período do sinal se ele for periódico ou o Δt de interesse, se não for periódico)

As relações de fase ϕ_n e ϕ'_n são determinadas por

$$\operatorname{tg} \phi_n = (B_n / A_n) \quad \text{e} \quad \operatorname{tg} \phi'_n = (A_n / B_n)$$

$$\text{Para } n=0 \quad C_0 = A_0 = (1 / T) \int_0^T f(t) dt$$

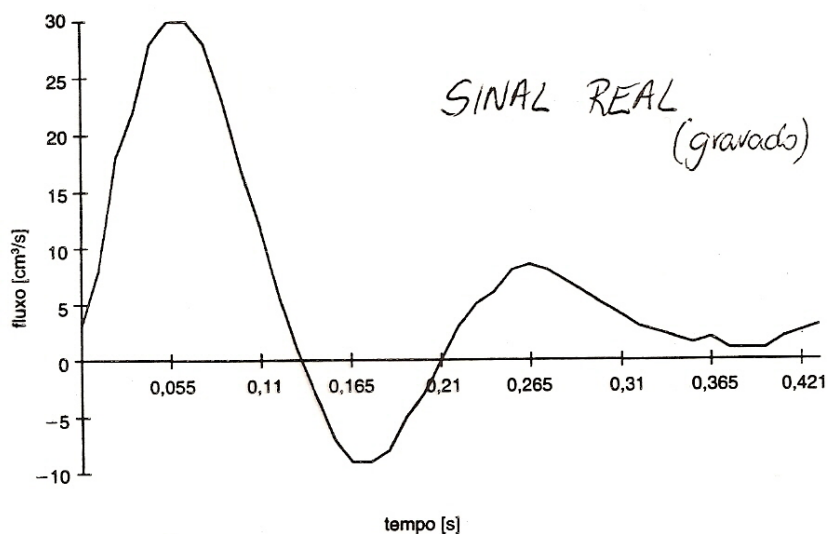
$$\phi_0 = 0$$

Os ângulos de fase ϕ_n e ϕ'_n proporcionam as necessárias relações

de tempo entre as várias componentes harmônicas.

Apesar de que as equações indicam que todos os harmônicos estejam presentes na definição do sinal ($n \rightarrow \infty$), na realidade se trabalha com um número limitado de harmônicos. Na verdade, todos os sistemas de medição têm limites superiores e inferiores de frequência, fora dos quais os demais harmônicos serão atenuados. Em outras palavras, nenhum sistema de medição pode trabalhar com uma faixa infinita de frequências. Assim se utilizam apenas as componentes de frequências significativas da série de Fourier, transformando a equação que representa o sinal numa aproximação.

Exemplo:

**DADOS**

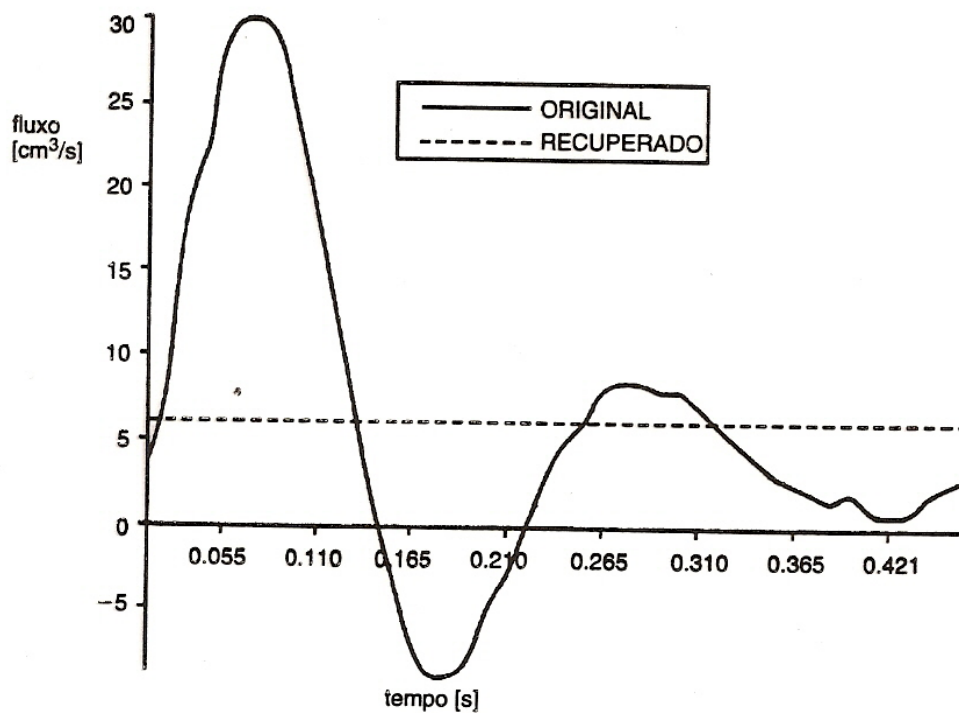
PERÍODO DO SINAL, $T=0.470$ s
 NÚMERO DE AMOSTRAS, $N=44$
 PERÍODO DE AMOSTRAGEM, $TS=0.011$ s
 FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM, $FS=93,617$ Hz
 FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL, $\omega_0=13.363$ Rad/s
 LARGURA DE BANDA DO SINAL, $FM=46.809$ Hz
 NÚMERO DE HARMÔNICOS, $N=22$

AMOSTRAS DO SINAL A SER ANALISADO

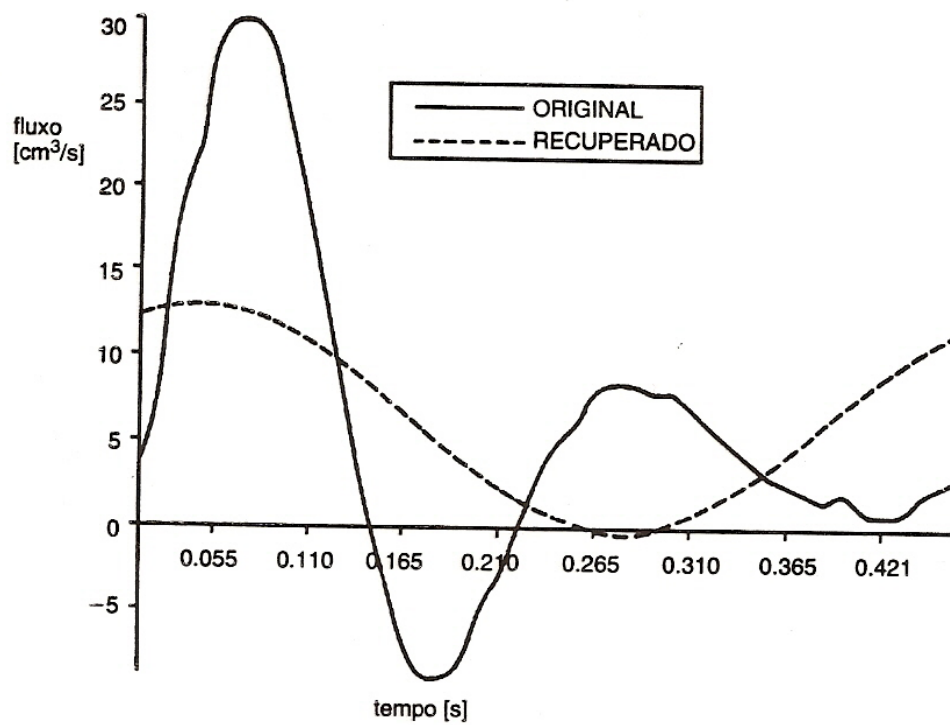
3.000	8.000	18.000	22.000	28.000	30.000
30.000	28.000	23.000	17.000	12.000	6.000
1.000	-3.000	-7.000	-9.000	-9.000	-8.000
-5.000	-3.000	0.000	3.000	5.000	6.000
8.000	8.500	8.500	8.000	8.000	7.000
6.000	5.000	4.000	3.000	2.500	2.000
1.500	2.000	1.000	1.000	1.000	2.000
2.500	3.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

COEFICIENTES DE FOURIER E ÂNGULOS DE FASE

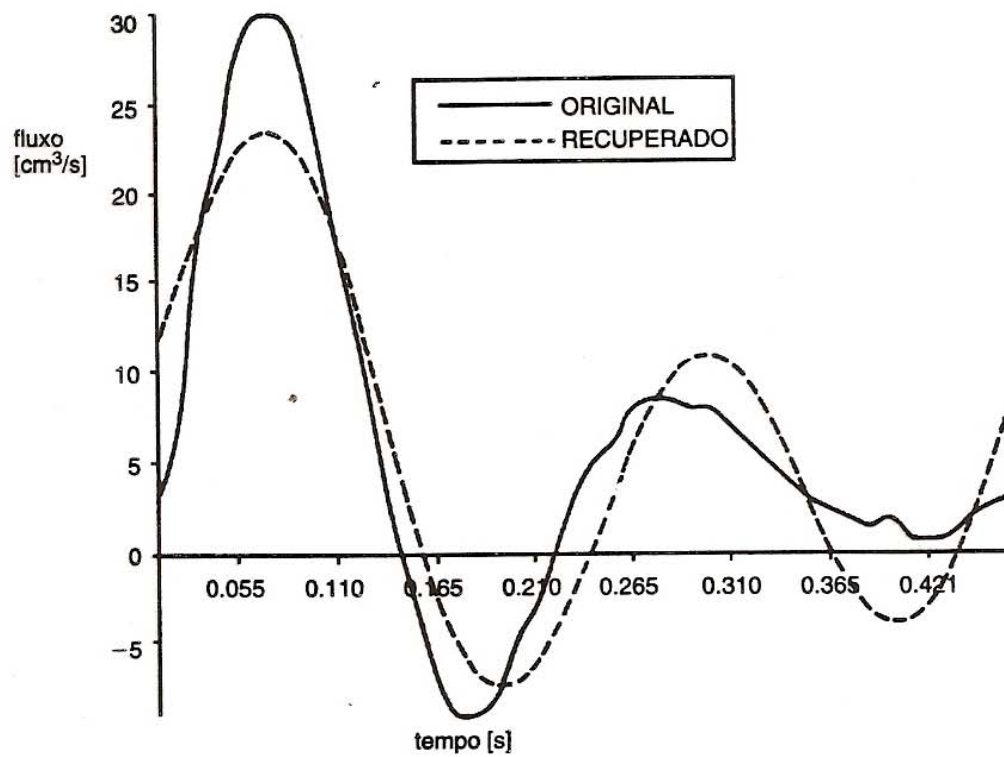
$C(0)=6.37500$
 $C(1)=6.514242$ $FI(1)=-0.455959$
 $C(2)=11.190532$ $FI(2)=-1.523133$
 $C(3)=5.064501$ $FI(3)=-2.859896$
 $C(4)=1.512434$ $FI(4)=-3.321939$
 $C(5)=0.965495$ $FI(5)=-3.231653$
 $C(6)=0.659440$ $FI(6)=-3.794864$
 $C(7)=0.307920$ $FI(7)=-3.968898$
 $C(8)=0.327416$ $FI(8)=-3.259158$
 $C(9)=0.352009$ $FI(9)=-3.332816$
 $C(10)=0.302450$ $FI(10)=-3.522480$
 $C(11)=0.223407$ $FI(11)=-3.041919$
 $C(12)=0.211775$ $FI(12)=-3.969940$
 $C(13)=0.106244$ $FI(13)=-2.966087$
 $C(14)=0.145899$ $FI(14)=-4.100455$
 $C(15)=0.235833$ $FI(15)=-3.337477$
 $C(16)=0.293113$ $FI(16)=-4.036494$
 $C(17)=0.146023$ $FI(17)=-4.880726$
 $C(18)=0.120828$ $FI(18)=-4.925220$
 $C(19)=0.170492$ $FI(19)=-5.116170$
 $C(20)=0.192576$ $FI(20)=-4.339440$
 $C(21)=0.099488$ $FI(21)=-4.721602$
 $C(22)=0.159091$ $FI(22)=-0.000012$



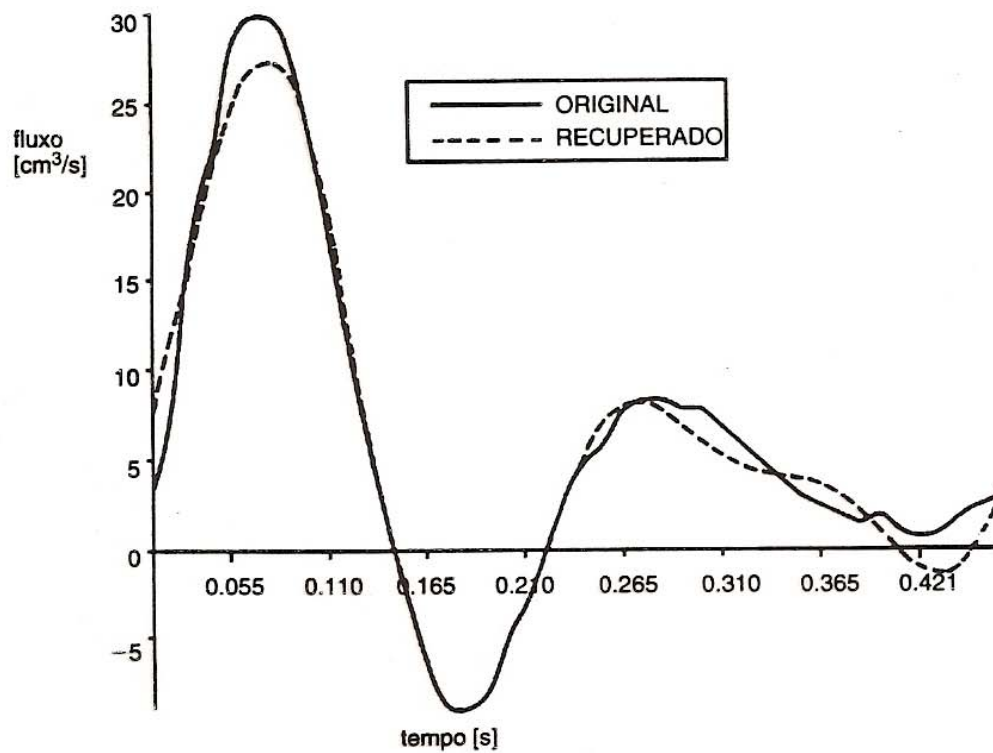
Sinal recuperado com apenas o termo constante (linhas pontilhadas), comparado com o sinal original (em linhas cheias).



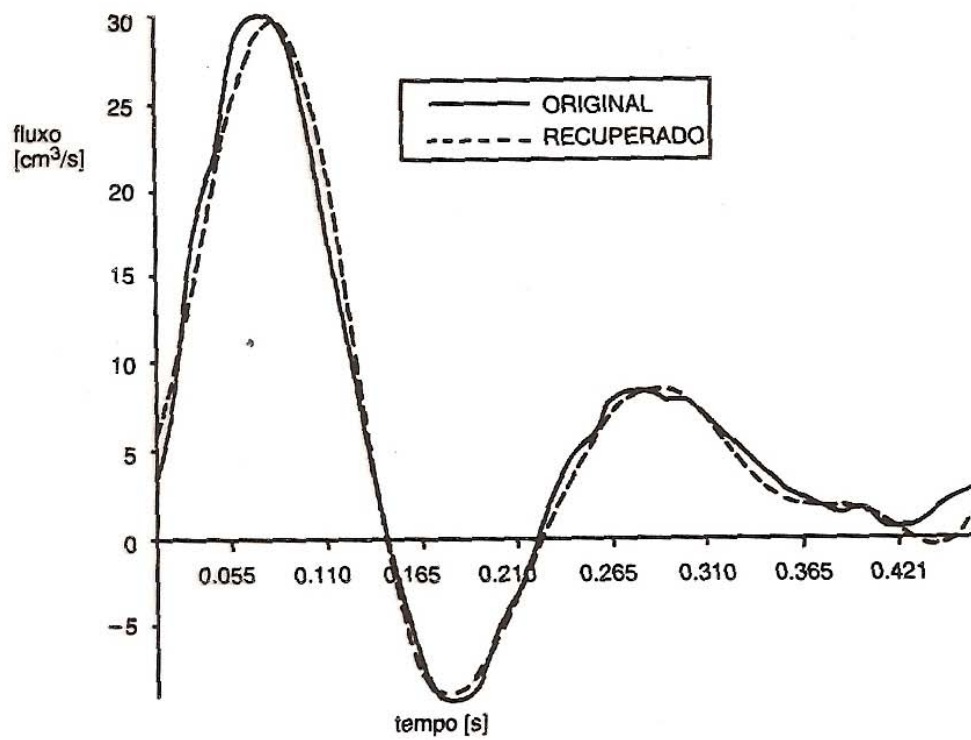
Sinal recuperado utilizando-se o primeiro harmônico e o termo constante.



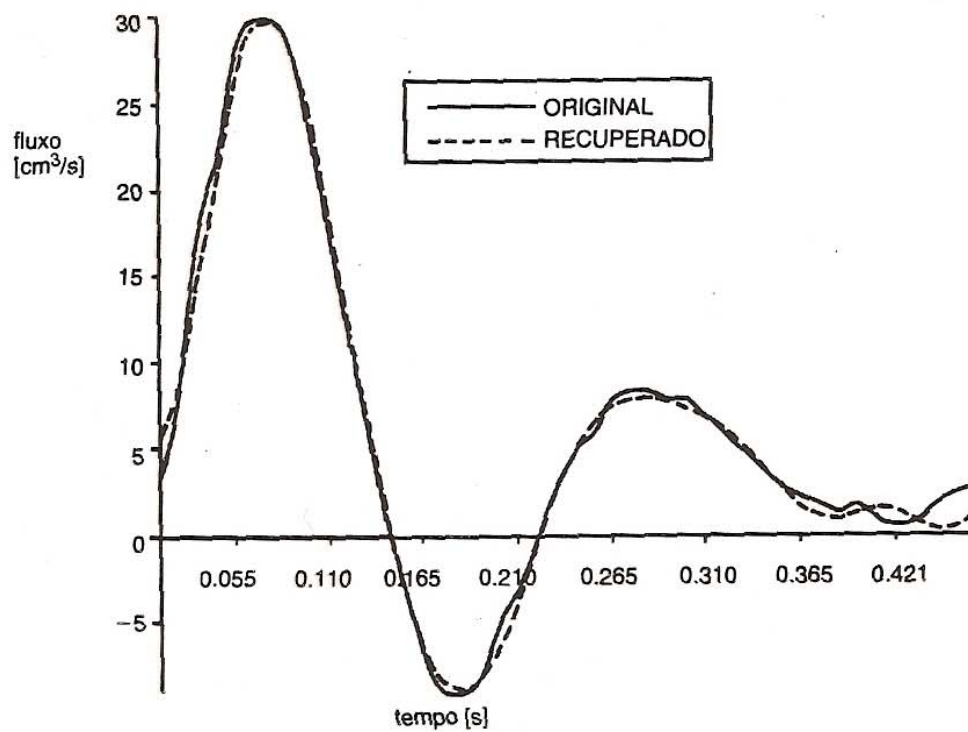
Sinal recuperado utilizando-se os dois primeiros harmônicos.



Sinal recuperado com três harmônicos.



Sinal recuperado com quatro harmônicos.



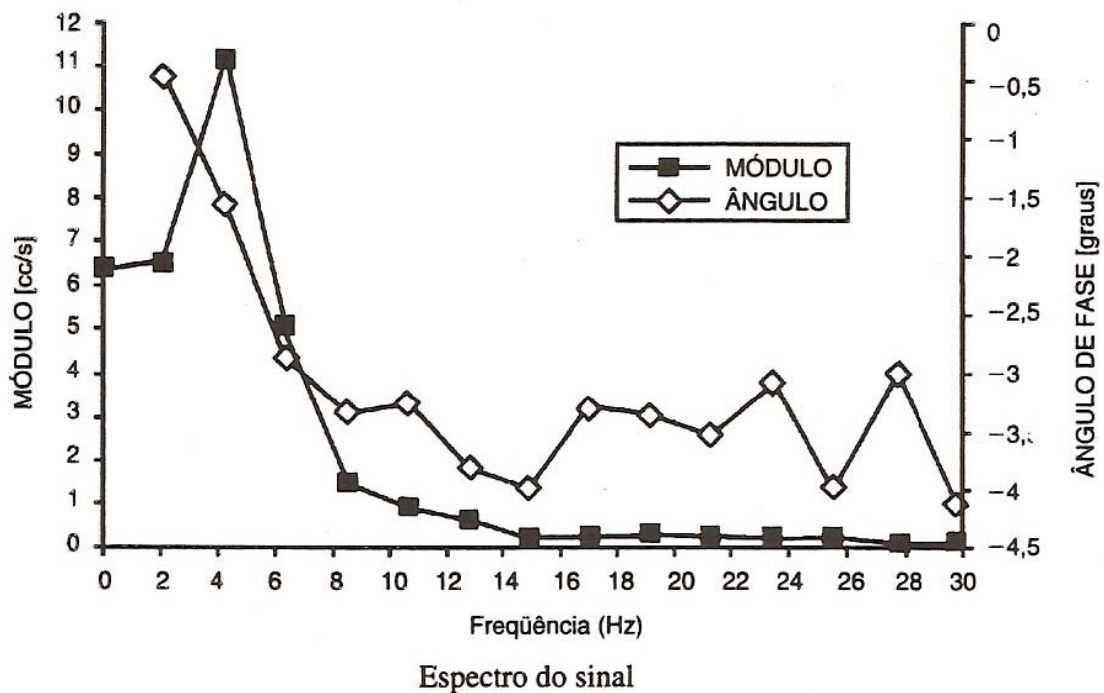
Sinal recuperado com cinco harmônicos.

Considera-se como a maior frequência significativa do sinal, aquela do harmônico de maior ordem considerado.

Um sistema adequado para reproduzir este sinal deverá ter uma banda passante ou largura de faixa ligeiramente maior que esta maior frequência significativa.

Gráfico com os coeficientes da série de Fourier e os ângulos de fase de cada componente da série, em função da frequência de cada harmônico $\Rightarrow$ Espectro do sinal.

Exemplo:



No gráfico do espectro do sinal, quando as amplitudes baixam significativamente a partir de determinado harmônico, sugerem valores desprezíveis que podem ser confundidos com o ruído presente no próprio sinal original e no sistema de aquisição de dados utilizado.

Algoritmo para determinação “manual” dos coeficientes da série de Fourier

1. Estabelecer o ciclo fundamental (ou intervalo de interesse) e atribuir os valores 0 e 2π (ou 0° e 360°) aos seus limites. A forma geral da equação desejada é

$$f(\theta) = A/2 + (A_1 \cos \theta + A_2 \cos 2\theta + A_3 \cos 3\theta + \dots) + (B_1 \sin \theta + B_2 \sin 2\theta + B_3 \sin 3\theta + \dots)$$

2. Dividir o ciclo fundamental em m intervalos iguais, espaçados de $\Delta\theta$, e determinar os valores das ordenadas correspondentes (no sinal registrado). Não incluir as ordenadas de ambas as extremidades do intervalo analisado, pois estaríamos duplicando um ponto. Como regra geral tem-se $m \geq 4n$ onde m é o número de intervalos por ciclo e n é a ordem do coeficiente do maior

harmônico significativo que se deseja obter.

3. Para determinar um dos coeficientes, multiplicar cada uma das m ordenadas determinadas no passo 2 pelo correspondente valor numérico da função trigonométrica desejada. O valor médio da soma de todos os produtos será a metade do coeficiente que está sendo calculado. Por exemplo, para determinar A_2 , multiplicar cada um dos valores de $f(\theta)$ determinados no passo 2 pelo correspondente valor de $\cos 2\theta$. Somar todos os produtos e dividir por $m/2$. Este resultado será o valor numérico de A_2 . Repetir este processo para cada valor de A_i e B_i necessários.

4. Determinar o valor de A , que é igual a duas vezes a média dos valores de $f(\theta)$.

Em resumo, deve-se fazer uma tabela:

θ	$P=f(\theta)$	$\sin\theta$	$f(\theta) * \sin\theta$	$\cos\theta$	$f(\theta) * \cos\theta$	$\sin 2\theta$	$f(\theta)* \sin 2\theta$	$\cos 2\theta$	$f(\theta)* \cos 2\theta$	...
0										
10										
20										
30										
...										
...										
...										
330										
340										
350										
Σ	①		②		③		④		⑤	

(36 pontos)

$$A = \textcircled{1}/18 \quad A_1 = \textcircled{3}/18 \quad A_2 = \textcircled{5}/18$$

$$B_1 = \textcircled{2}/18 \quad B_2 = \textcircled{4}/18 \quad \dots$$

Escrever a equação $f(\theta)$ e substituir

$$\theta = \omega t \text{ onde } \omega = 2\pi f = 2\pi / T$$

Calcular valores com a equação obtida e verificar contra os valores do gráfico experimental original.