

# Processamento Digital de Sinais e Aplicações em Acústica

## Tutorial 06 - Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT) e Transformada Discreta de Fourier (DFT)

[https://github.com/fchirono/Aulas\\_PDS\\_Acustica](https://github.com/fchirono/Aulas_PDS_Acustica)

## Objetivos do Tutorial

Ao final desta sessão, você será capaz de:

- aplicar a Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT) a um sinal de tempo discreto finito,
- compreender as implicações do teorema da amostragem na DTFT,
- aplicar a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT) a uma sequência,
- comparar espectros calculados usando a DTFT e a DFT, e
- atribuir uma frequência correspondente a cada amostra da DFT.

## Sumário

|          |                                                                                                 |          |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT)</b>                                         | <b>1</b> |
| 1.1      | Revisão . . . . .                                                                               | 1        |
| 1.2      | DTFT de Sinais Não-Periódicos . . . . .                                                         | 2        |
| <b>2</b> | <b>Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT)</b> | <b>3</b> |
| 2.1      | Revisão . . . . .                                                                               | 3        |
| 2.2      | Tarefas . . . . .                                                                               | 3        |
| <b>3</b> | <b>DTFT vs. DFT</b>                                                                             | <b>4</b> |
| 3.1      | Revisão . . . . .                                                                               | 4        |
| 3.2      | Resolução de Frequência Limitada . . . . .                                                      | 5        |

## 1 Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT)

### 1.1 Revisão

A Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT) é definida da seguinte forma:

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-jn\Omega}, \quad \Omega = 2\pi \frac{f}{f_s} \in [-\pi, \pi]. \quad (1)$$

Note que  $X(\Omega)$  é uma função periódica, com período  $2\pi$ .

## 1.2 DTFT de Sinais Não-Periódicos

Leia os arquivos A1.wav e A2.wav usando o módulo `scipy.io.wavfile`. Para incluir este módulo, use o comando:

```
from scipy.io import wavfile
```

A função `wavfile.read` pode ser usada para ler um arquivo .WAV de 16 bits por amostra no ambiente de trabalho da seguinte forma:

```
# le a frequencia de amostragem e valores das amostras do arquivo .WAV
fs_wav, sinal_int16 = wavfile.read("Exemplo.wav")

# confirma o tipo de dados obtidos do arquivo wav
sinal_int16.dtype

# normalizacao dos dados de audio de int16 para ponto flutuante
N_bits = 16
sinal_float = sinal_int16/(2.** (N_bits - 1))-1)
```

### Tarefas

1. Mostre analiticamente que a DTFT é periódica, com período  $2\pi$ . **DICA:** Calcule  $X(\Omega + 2\pi)$  usando a equação (1).
2. Ouça ambos os sinais A1 e A2 usando seu reprodutor de mídia local. Eles têm a mesma frequência fundamental?
3. Escreva uma função `DTFT(x, Omega)` que implemente a equação (1). O vetor de entrada `Omega` da função contém as frequências angulares normalizadas em radianos/amostra a ser usadas na análise. Note que, embora a DTFT teoricamente tenha uma resolução de frequência infinita, em uma implementação computacional só podemos especificar uma quantidade limitada de frequências discretas.
4. Crie um vetor `Omega` contendo 4096 pontos igualmente espaçados no intervalo  $[-\pi, \pi]$  definindo um conjunto de frequências angulares normalizadas em radianos/amostra, e use a função recém-implementada para calcular os espectros de Fourier de ambos os arquivos .wav. Plote o valor absoluto de ambos os resultados em cores diferentes.
5. Qual é a resolução de frequência resultante em Hz da análise de Fourier realizada no item anterior?
6. Que aspectos visíveis nos dois espectros de amplitude podem confirmar a sua observação na Tarefa 2?
7. Defina um novo vetor `f` (baseado em `Omega`) que contenha as frequências correspondentes em Hertz. Plote o espectro de amplitude de A1.wav e use `f` para o eixo “x”.
8. Agora redefina `Omega` para 4096 frequências angulares normalizadas uniformemente espaçadas no intervalo  $[-3\pi, 3\pi]$ , calcule e plote a (magnitude da) DTFT para esta nova faixa de frequências normalizadas. Quais efeitos podem ser observados nos novos espectros de amplitude, e por que isso ocorre?

## 2 Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT)

### 2.1 Revisão

Dada uma sequência  $x[n]$  de comprimento  $N$ , a DFT de  $x[n]$  pode ser definida da forma

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_N^{kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

onde, por definição,

$$W_N = e^{-\frac{j2\pi}{N}}. \quad (3)$$

A Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT) é definida como

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot W_N^{-kn}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4)$$

A DFT e a IDFT também podem ser definidas como transformações lineares que operam sobre sequências  $\mathbf{x}_N$  e  $\mathbf{X}_N$ , respectivamente. Seja  $\mathbf{x}_N = [x[0], \dots, x[N-1]]^T$  e  $\mathbf{X}_N = [X[0], \dots, X[N-1]]^T$  o vetor de amostras do sinal no tempo e o vetor de amostras na frequência, respectivamente. Seja a matriz  $\mathbf{W}_N$ , com elementos  $W_N^{kn}$ , definida como

$$\mathbf{W}_N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & W_N & W_N^2 & \cdots & W_N^{N-1} \\ \vdots & W_N^2 & W_N^4 & \cdots & W_N^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_N^{N-1} & W_N^{2(N-1)} & \cdots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Usando as definições acima, a DFT pode ser expressa em forma matricial como

$$\mathbf{X}_N = \mathbf{W}_N \cdot \mathbf{x}_N. \quad (6)$$

O mesmo se aplica à IDFT, ou seja,

$$\mathbf{x}_N = \frac{1}{N} \mathbf{W}_N^* \cdot \mathbf{X}_N, \quad (7)$$

onde  $\mathbf{W}_N^*$  é o conjugado complexo da matriz  $\mathbf{W}_N$ .

### 2.2 Tarefas

- Mostre analiticamente que a DFT é periódica, com período  $N$ . **DICA:** Avalie  $X[k+N]$  usando a equação (2).  
Mostre analiticamente que a DFT assume que  $x[n]$  é periódico, com período  $N$ . **DICA:** Avalie  $x[n+N]$  usando a equação (4).
- Escreva uma função DFT( $\mathbf{x}$ ,  $N_{\text{DFT}}$ ) que implemente a equação (6), onde  $\mathbf{x}$  é a sequência de dados e  $N_{\text{DFT}}$  é o número de pontos sobre os quais a DFT é calculada.

Note que se o comprimento de  $\mathbf{x}$  for menor que  $N_{\text{DFT}}$ , é prática comum preencher o sinal com zeros no final do vetor (*zero-padding*); similarmente, se o comprimento de  $\mathbf{x}$  for maior que  $N_{\text{DFT}}$ , as amostras excedentes devem ser ignoradas.

3. Gere uma sequência aleatória  $x$  de comprimento  $L \leq 20$  com a função `numpy.random.randn`. Calcule a DFT de  $x$  para os casos:
  - (a)  $N_{DFT} = L$
  - (b)  $N_{DFT} > L$
  - (c)  $N_{DFT} < L$
4. Para os três casos acima, plote a magnitude e a fase da DFT calculada no ponto 2 usando a função `matplotlib.pyplot.stem`. Qual é o efeito da escolha de  $N_{DFT}$ ?
5. Verifique o valor da fase em  $\Omega = 0$  rad/amostra e  $\Omega = \pi$  rad/amostra para a DFT calculada com  $N_{DFT} = L$ .
6. Calcule a DFT da sequência  $x$  usando a função `numpy.fft.fft` (leia a documentação do módulo `numpy.fft` para mais informações). Escolha  $N_{dft} = L$  e plote a magnitude e a fase. Como eles se comparam aos gráficos gerados na Tarefa 4?
7. Implemente uma função em Python para a IDFT definida na Equação (7).
8. Usando a função IDFT implementada na tarefa anterior, calcule a IDFT do sinal  $X$  para os três casos da Tarefa 3 e plote os resultados. Como os sinais resultantes se comparam ao sinal original no domínio do tempo?

## 3 DTFT vs. DFT

### 3.1 Revisão

De acordo com a definição da DFT, as amostras da DFT

$$\mathbf{X} = [X[0], \dots, X[N - 1]]$$

correspondem à frequências discretas da seguinte forma:

$$X[k] = X\left(k \frac{f_s}{N}\right),$$

onde  $k = [0 \dots N - 1]$ . A resolução em frequência é dada por  $df = f_s/N$ , e a DFT estará centrada na frequência de Nyquist  $f_s/2$ .

No entanto, devido à sua simetria, o vetor da DFT é frequentemente rearranjado para ser consistente com o resultado da Transformada de Fourier - isto é, iniciando nas frequências *negativas*, centrado na frequência 0, e exibindo simetria conjugada complexa. Para fazer isso corretamente, é importante distinguir entre dois casos:

- $N$  par:  
Quando  $N$  é um número par, a  $(\frac{N}{2})$ -ésima amostra ( $k = N/2$ ) corresponderá **exatamente** à frequência de Nyquist.
- $N$  ímpar:  
Quando  $N$  é um número ímpar, a frequência de Nyquist corresponde ao ponto entre as amostras  $(N - 1)/2$  e  $(N + 1)/2$ , e nenhuma amostra da DFT corresponderá exatamente à frequência de Nyquist.

O vetor de frequência correto para cada caso é definido da seguinte forma:

- N par:

$$\mathbf{X} = \left[ X \left[ -\frac{N}{2} \right], X \left[ -\frac{N}{2} + 1 \right], \dots, X[-1], X[0], X[1], \dots, X \left[ \frac{N}{2} - 1 \right] \right]$$

Note que neste caso, a amostra correspondente à frequência de Nyquist é o **primeiro** elemento do vetor, o que é consistente com o resultado da função `numpy.fft.fftshift`.

- N ímpar:

$$\mathbf{X} = \left[ X \left[ -\frac{(N-1)}{2} \right], X \left[ -\frac{(N-1)}{2} + 1 \right], \dots, X[-1], X[0], X[1], \dots, X \left[ \frac{(N-1)}{2} \right] \right]$$

Note que neste caso, a frequência de Nyquist não estará contida no resultado da DFT.

**É IMPORTANTE** que você compreenda bem as duas definições acima, pois **esta é uma causa frequente de erros e confusão!**

## 3.2 Resolução de Frequência Limitada

### Tarefas

1. Pegue um trecho do arquivo de áudio “A1.wav” da amostra 5100 até 6400 e salve-o em um vetor separado d.
2. Usando a função que você criou, calcule a DTFT usando o vetor de frequência angular normalizada Omega criado na Tarefa 1.3 e plote o espectro de amplitude sobre o vetor de frequência correspondente **em Hz** na ordenada.
3. Calcule a DFT de d com comprimento correspondente ao comprimento de d. Rearranje o vetor de saída para que você obtenha um vetor com simetria conjugada complexa, e então gere um segundo vetor com a frequência correspondente em Hz para cada amostra da DFT (verifique a subseção anterior!).
4. Plote o espectro de amplitude obtido através da DFT sobre o gráfico da DTFT existente, usando o comando `plt.stem` e use uma cor diferente.
5. O que pode ser observado na figura resultante?