Procesamiento de señales. Fundamentos

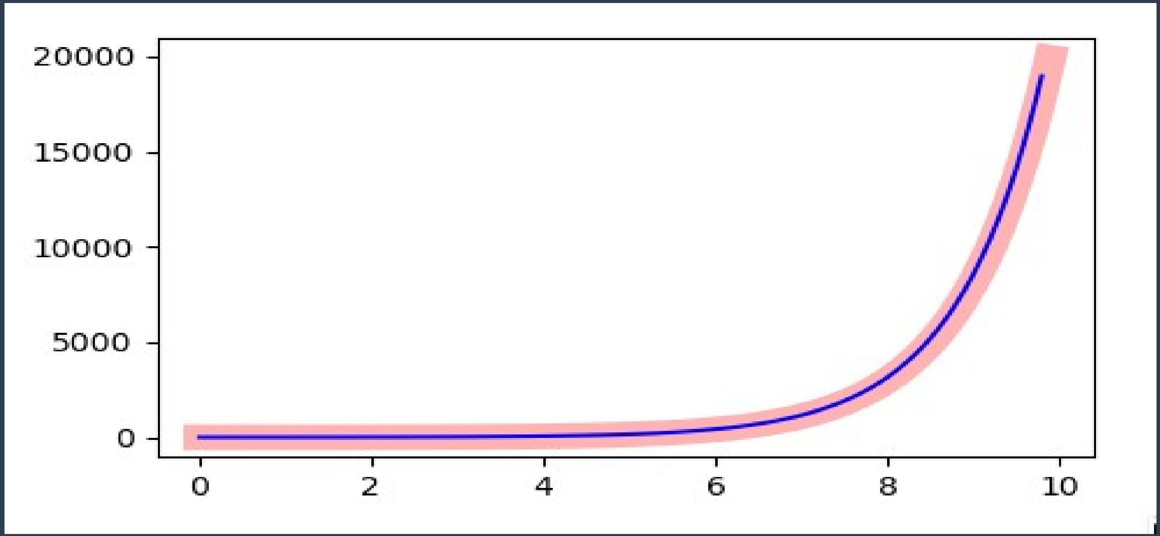
Clase 3 - Euler + Fourier + DFT

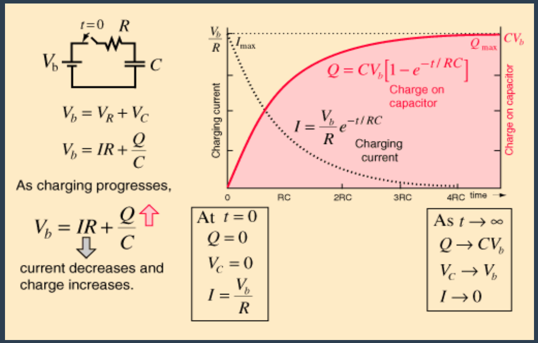
- El numero e
- Derivada de e^t y e^(jt)
- Circulo modulando una señal
- Maquina de Rei-Ruof
- DFT - Transformada discreta de Fourier
- Propiedades
- Spectral Leakage + Zero padding
- Energía y relación de Parseval
- DFT (FFT) en la CIAA

2.71828182845904509079559...

Numero e

- Que tiene de especial e?
- Porque un capacitor se carga de esa forma?
- Aplica en el calculo del interes continuo
- Ver código: derivadas.py





O en forma equivalente:

$$M = C\left(1 + \frac{r}{k}\right)^{t\cdot k}$$

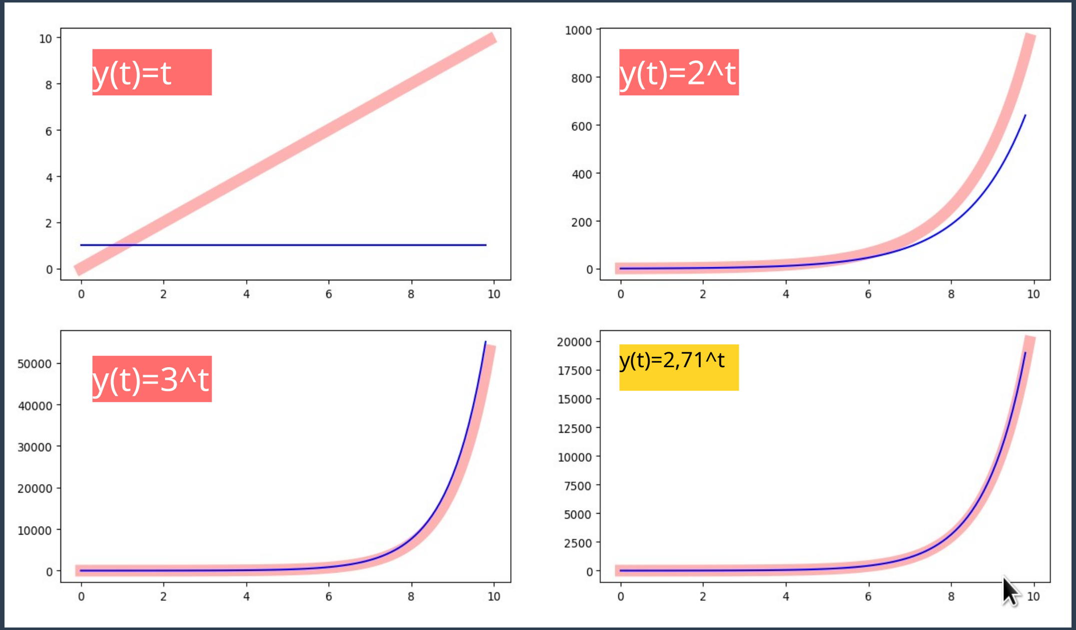
C = Capital inicial
M = Monto o valor futuro
r = Tasa de interés anual, expresada como número decimal
t = Tiempo, expresado en años
k = Número de capitalizaciones por año

Interés = Monto – Capital

Función derivada de e^t

- La única función en la cual la derivada es igual a si misma
- En la figuras generadas con el codigo el trazo azul es la derivada de la función
- Recordar la regla de la cadena o reemplazo de variables para derivar e^(kt)
- Ver codigo: derivadas.py

$$e = \lim_{n \to \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$



La derivada es igual a la funcion

$$f(t) = e^t \implies f'(t) = e^t$$
$$f(t) = e^{kt} \implies f'(t) = ke^{kt}$$

Función derivada de e^(j*t)

- Y que pasa con la derivada de la función compleja?

La derivada es igual a la funcion

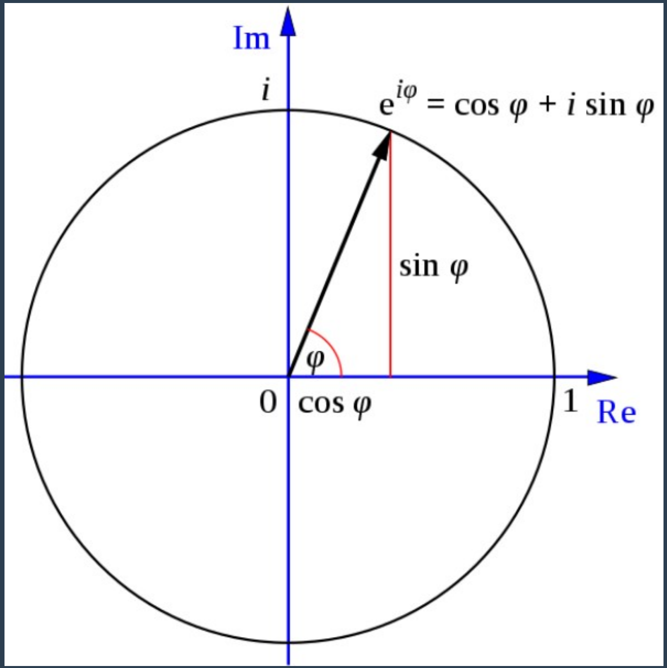
$$f(t) = e^{jt} \implies f'(t) = je^{jt}$$

$$e^{jt} = \cos(t) + j\sin(t)$$

$$e^{j\pi} = -1$$

$$e^{\frac{j\pi}{2}} = j$$

$$e^{\frac{j3\pi}{2}} = -j$$

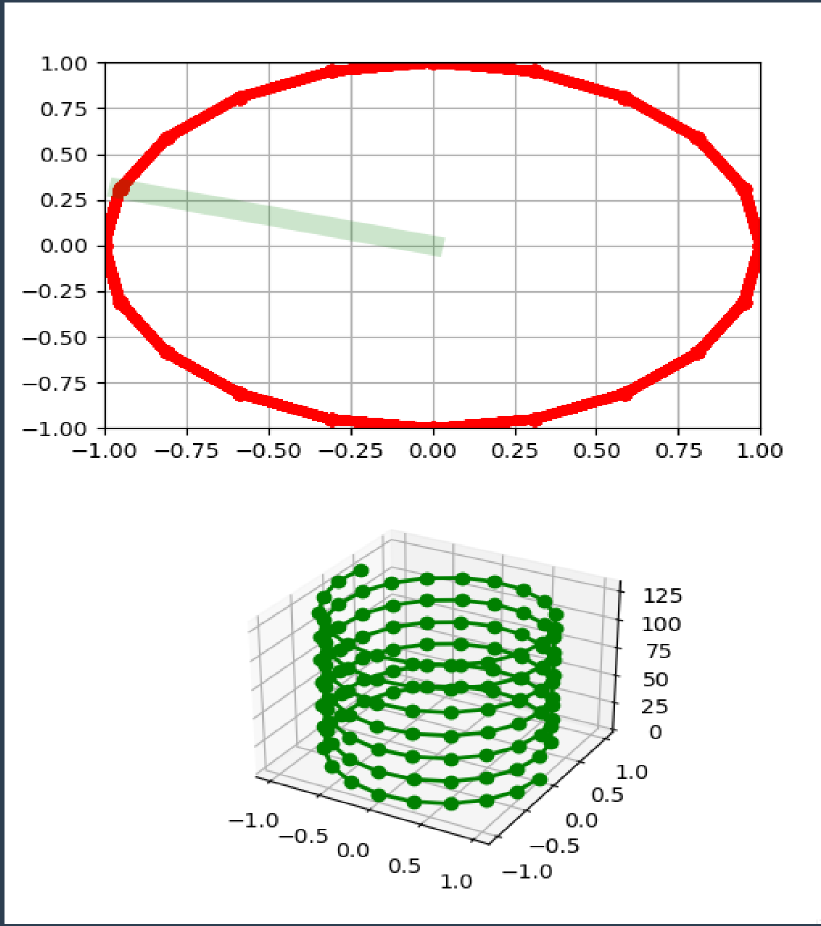


- Ver código: euler1.py

Simulando e^(j*t) con Python

- Fs=20
- N=20
- CircleFrec=1Hz
- Traza un circulo sampleado cada 1/Fs
- Ver código: euler1.py

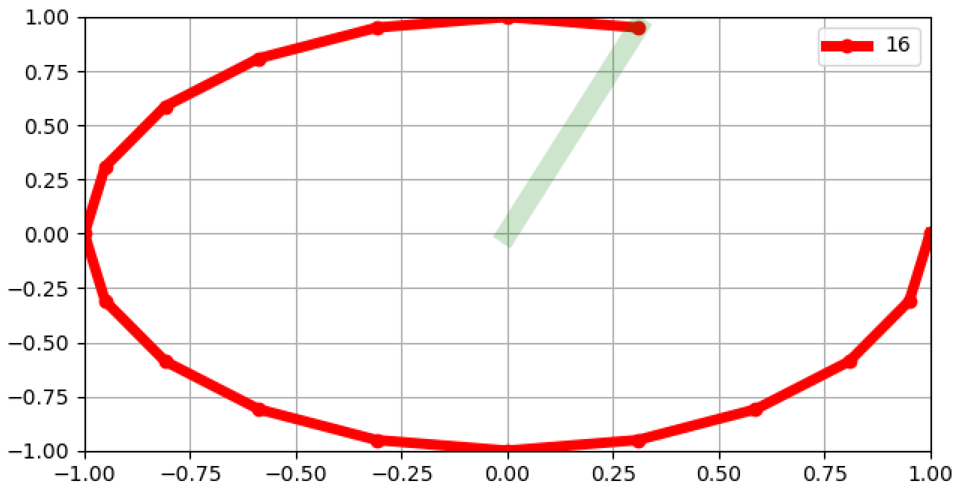
```python
def circle(f,n):
    return np.exp(-1j*2*np.pi*f*n*1/fs)
```

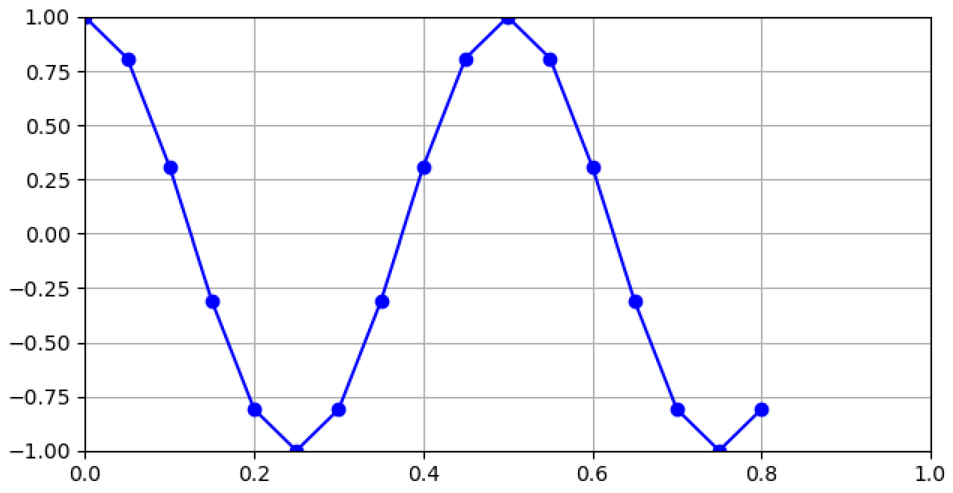


e^(j*t) y una senoidal con Python

- Fs=20 => ts=0.05
- N=20
- CircleFrec=1Hz
- Traza un circulo sampleado cada 1/Fs

- Fs=20 => ts=0.05
- N=20
- signalFrec=2Hz
- Traza una senoide sampleada a 1/Fs

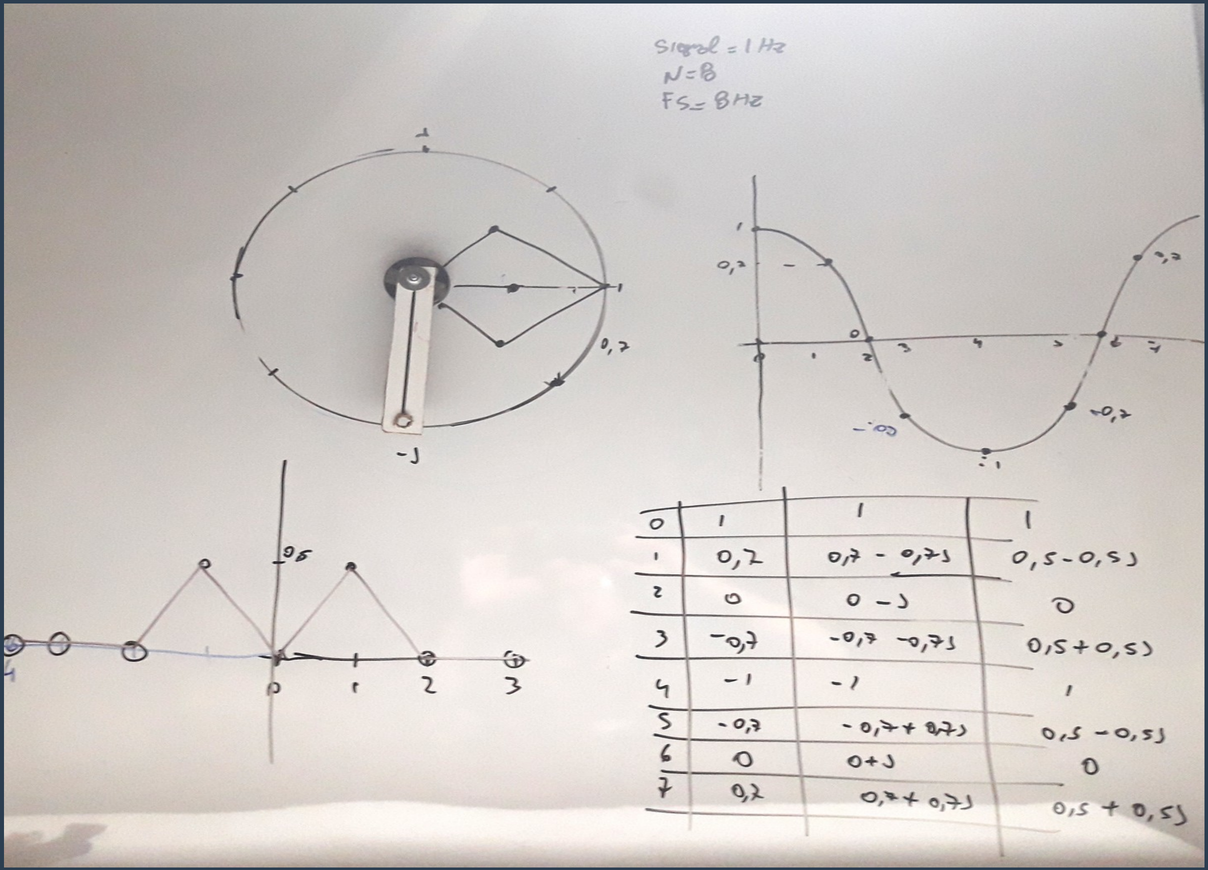




- Ver código: euler2.py

La maquina de Rei-Ruof

- Fs=8
- N=8
- Signal=1Hz
- Para cada frecuencia Fs/N*n se modula la señal con el vector que traza el circulo
- Luego se calcula el promedio y se lo asigna a la Fs/N*n

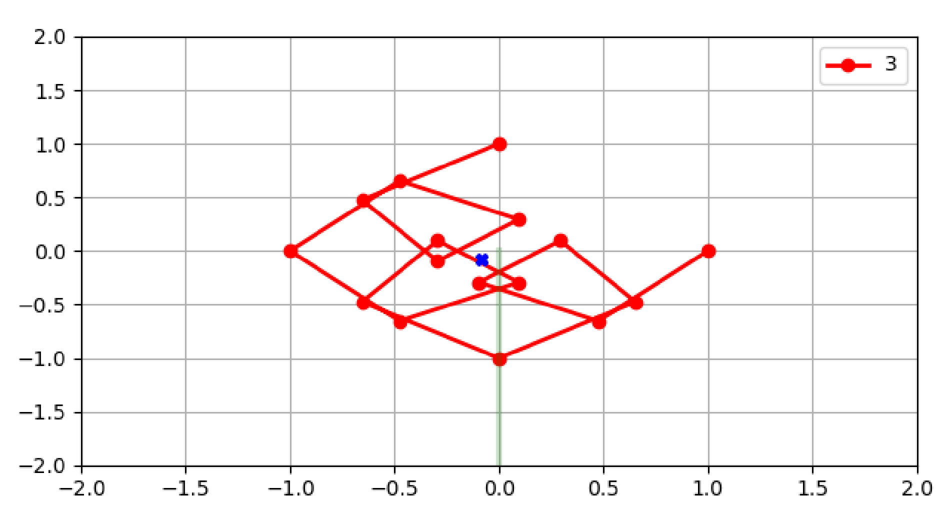


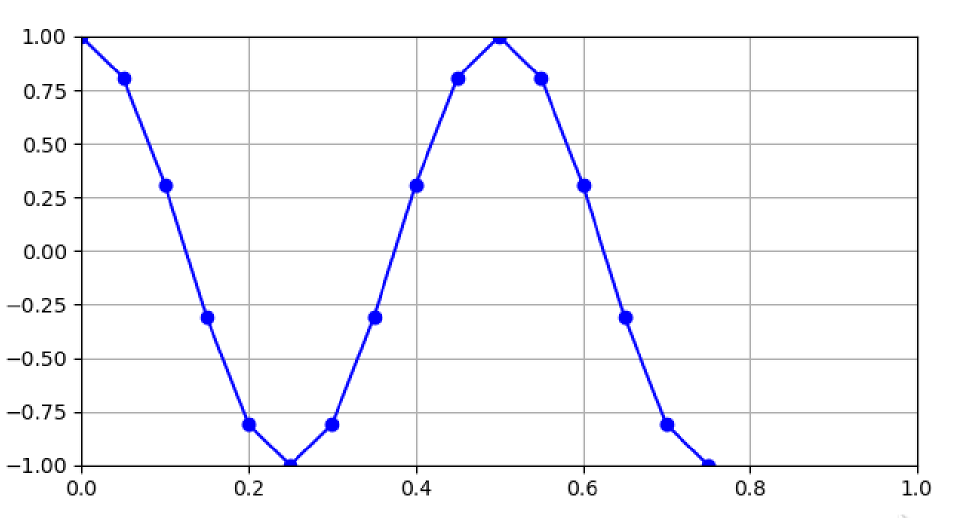
- Ver códigos: maquina_reiruof.py

La senoidal modulada con e^(j*t)

- Fs=20 => ts=0.05
- N=20
- CircleFrec=0 a (Fs-1)
- Traza un circulo modulado con la senoidal

- Fs=20 => ts=0.05
- N=20
- signalFrec=2Hz
- Traza una senoide sampleada a 1/Fs



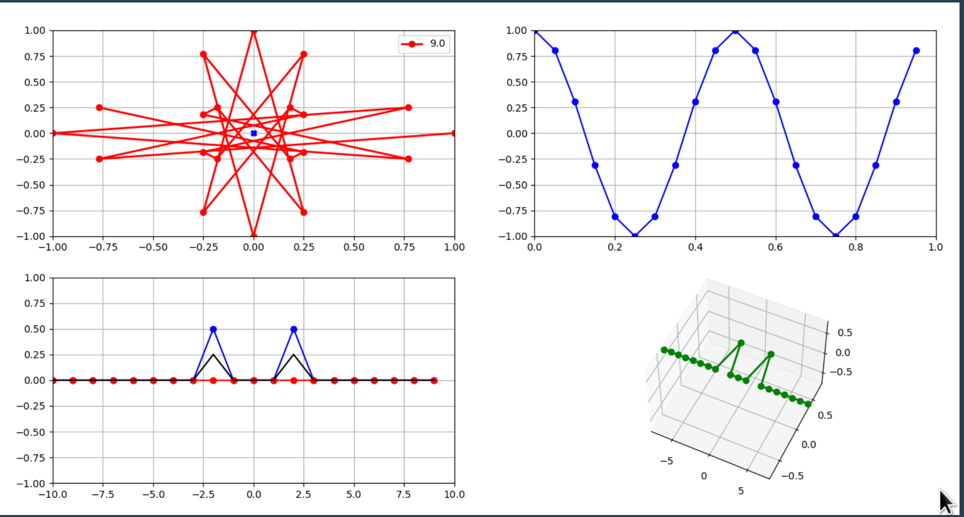


- Ver código: dft1.py

Centro de masas de la senoidal modulada

- Fs=20 => ts=0.05
- N=20
- CircleFrec = -Fs/2 a (Fs/2-Fs/N) cada fs/N
- Grafico el centro de masas para cada CircleFrec
- El centro de masas es un numero complejo!

- Fs=20 => ts=0.05
- N=20
- signalFrec=2Hz
- Traza una senoide sampleada a 1/Fs



- Ver códigos: dft2.py y dft3.py

Centro de masas == Transformada discreta de Fourier??

$$Cm(k) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n) * e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}}{N}$$

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}$$

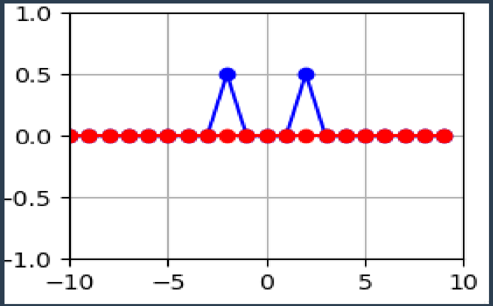
$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \left(\cos(2\pi kn/N) - j \sin(2\pi kn/N) \right)$$

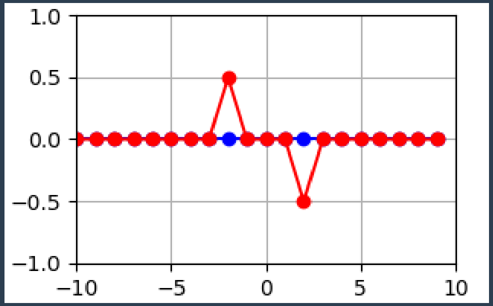
- Cm=Centro de masas en k
- X(k) = DFT en k
  - Forma polar con e^
  - Forma rectangular con sin y cos
- La diferencia es 1/n ??
- Y si normalizo de otra manera ?
- Se puede normalizar la DFT con:
  - DFT / N => IDFT / 1
  - DFT / 1 => IDFT / N (default en numpy)
  - DFT / $\sqrt{N}$ => IDFT / $\sqrt{N}$

Resumen de propiedades

- Fs=20 => ts=0.05
- N=20
- Resolución en tiempo = 1/fs
- Resolución en Frecuencia = fs/N
- Muestras en tiempo = N
- Puntos en frecuencia = N
- Los valores de la señal en frecuencia son números complejos
- Los valores de la señal en tiempo son números reales??

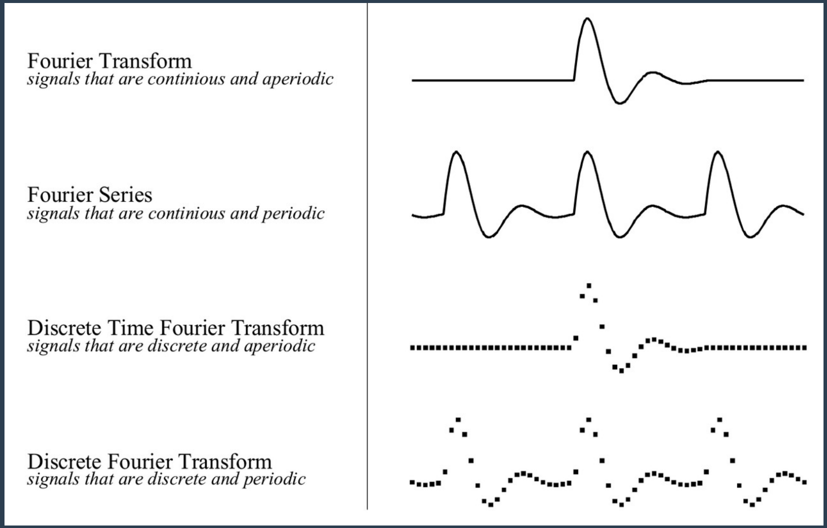
- DFT en n=0 representa la componente de continua
- Si la entrada es real la DFT es compleja conjugada (hermitica)
- Si la señal es par (cos) la DFT es real pura
- Si la señal es impar (sin) la DFT es imaginaria pura





Familia de transformadas

- Existe una relación entre las transformadas de Fourier en tiempo continuo y en tiempo discreto
- De las dos opciones en tiempo discreto la DTFT no es realizable dado que implican infinitos puntos.
- **Solo utilizaremos la DFT**
- En general el calculo de la DFT lo hacemos utilizando el algoritmo FFT.
- No estudiaremos la implementación de la FFT, solo lo utilizamos para calcular la DFT de manera eficiente



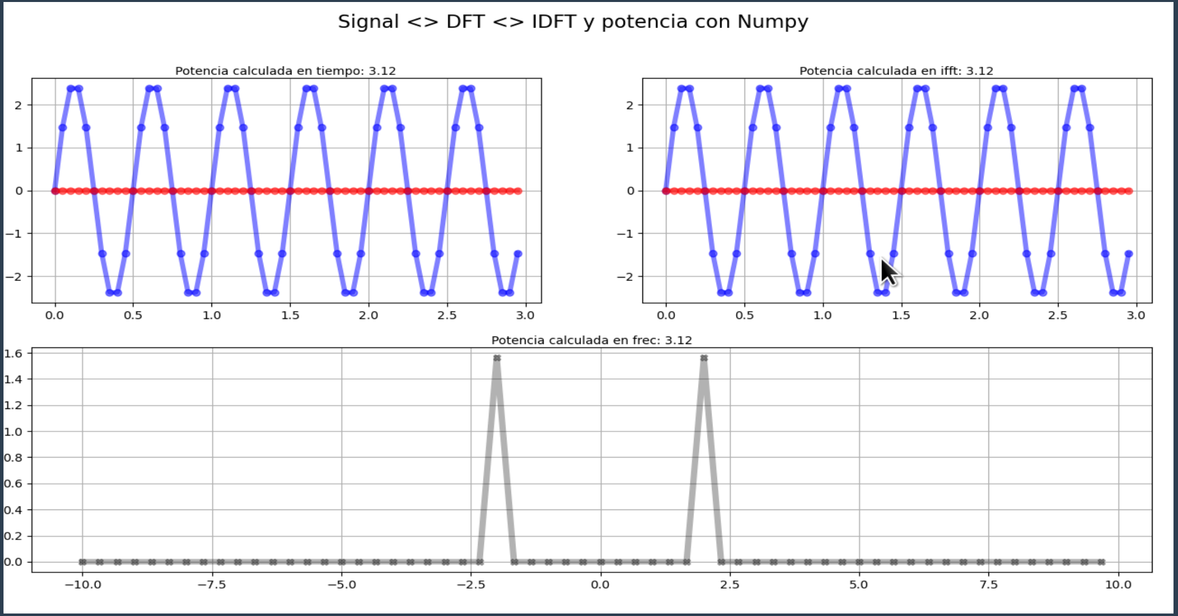
Time Duration		
Finite	Infinite	
Discrete FT (DFT) $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\omega_k n}$ $k = 0, 1, \ldots, N-1$	Discrete Time FT (DTFT) $X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n}$ $\omega \in [-\pi, +\pi)$	discr. time n
Fourier Series (FS) $X(k) = \frac{1}{P} \int_0^P x(t) e^{-j\omega_k t} dt$ $k = -\infty, \ldots, +\infty$	Fourier Transform (FT) $X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$ $\omega \in (-\infty, +\infty)$	cont. time t
discrete freq. k	continuous freq. ω	

Potencia espectral – Parseval

- Como en tiempo y en frecuencia se representa la misma, ambos deberán tener la misma energía => Relación de Parseval
- La sumatoria de los samples al cuadrado dividido el numero de samples es la definicion de potencia promedio
- El modulo cuadrado de la DFT representa la densidad de potencia espectral
- Permite determinar en donde se concentra la energia de la señal.

$$P_{average}(x) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} \| x[n] \|^2 = \sum_{n=0}^{N-1} \| \mathbf{F}[n] \|^2$$

$$P_{sin} = \frac{A^2}{2}$$
$$P_{sin} = \frac{2{,}5^2}{2}$$
$$P_{sin} = 3{,}125W$$
$$P = 1{,}56 + 1{,}56$$
$$P = 3{,}125W$$



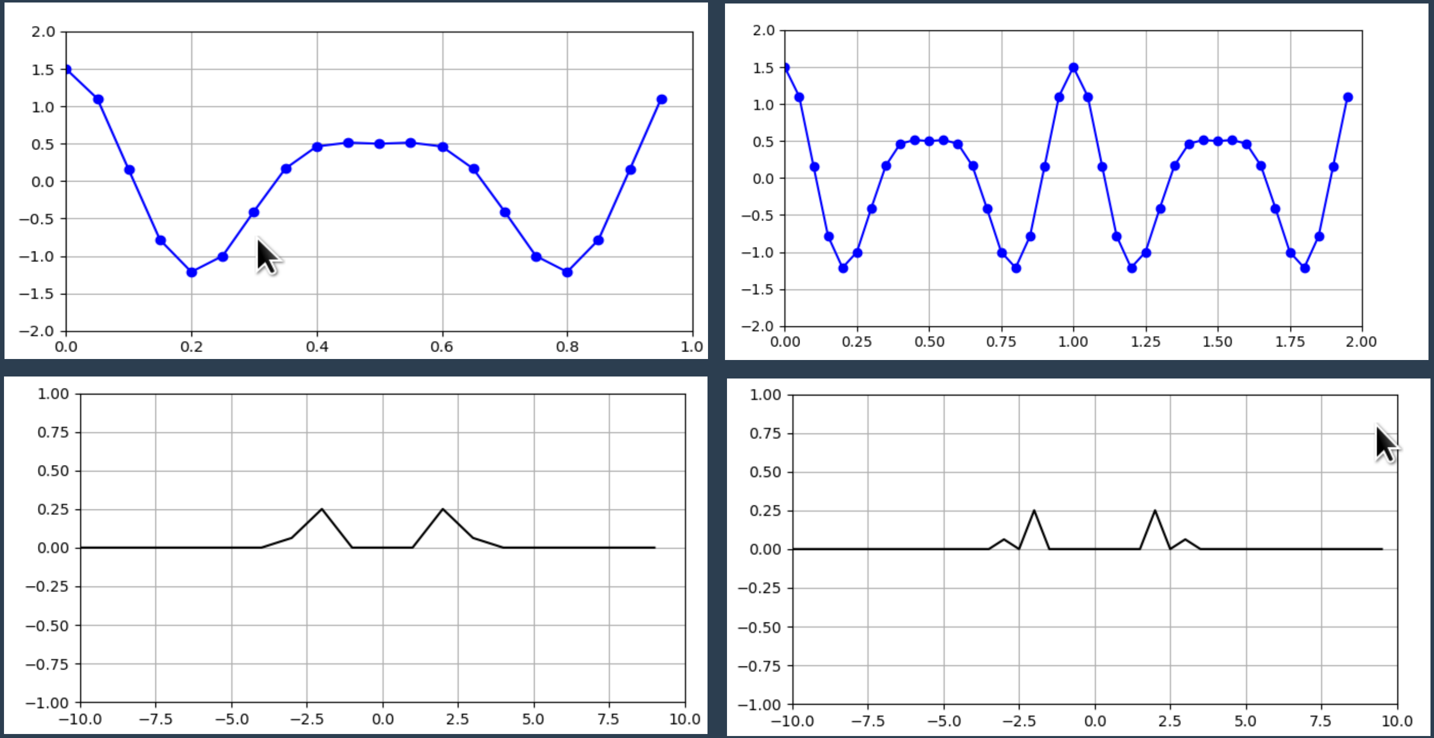
- Ver código: utils/dft_idft_numpy.py

Resolución espectral Fs/N

- Es una medida de cuanto se puede discriminar en frecuencia
- Resolución espectral = fs/N
- Para una determinada Fs, cuando mas grande N mejor resolución espectral
- Ej:
  - R deseada 5hz
  - Fs=1000 => N >= 200
  - tiempo de adquisición >= N/fs=0,2 segs
- Ej
  - R deseada 0,01Hz
  - Fs=1000 => N >= 100000
  - tiempo de adquisición >= N/fs= 100segs

Fs=20 0 N=20

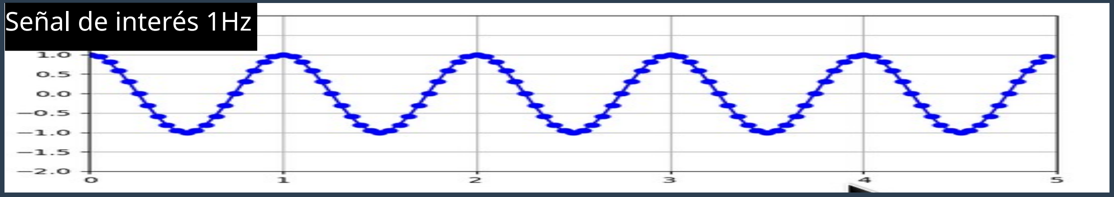
Fs=20 0 N=40

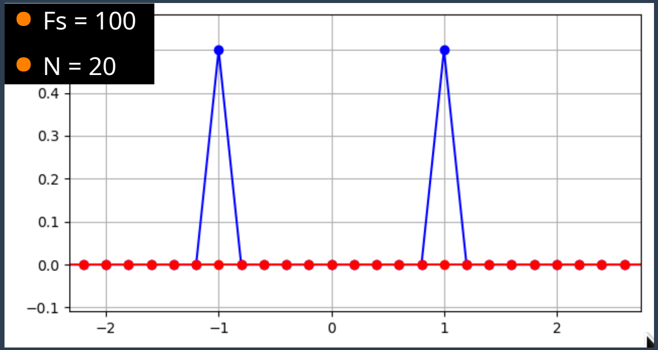


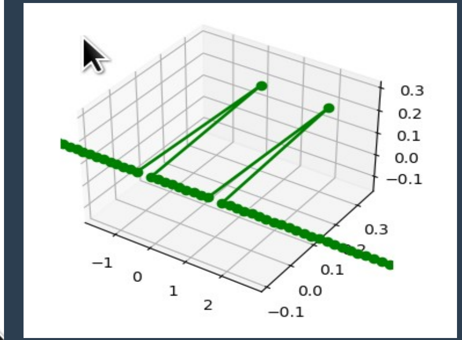
- Ver código: dft3.py

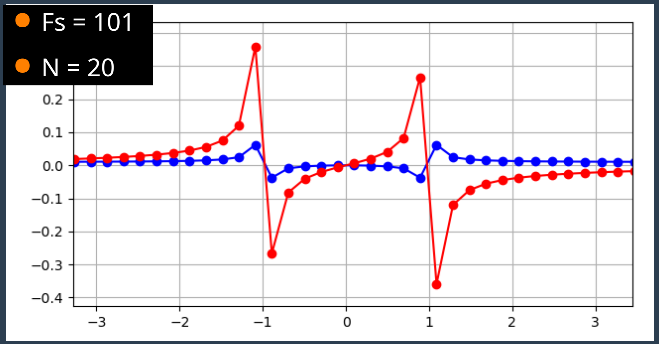
Fuga espectral – Spectral leakage

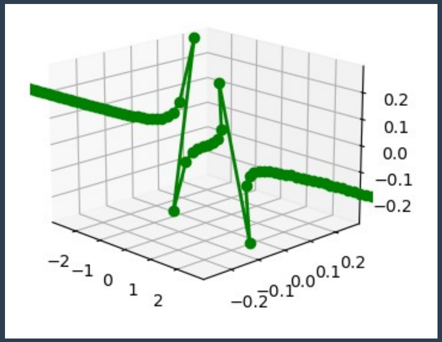
- Si la relación Fs/N (en el ejemplo fs/N=5) es múltiplo de la señal de interés la DFT resuelve bien
- En otro caso, aparece un efecto no deseado.
- Como mitigarlo??
- Se necesitan mas puntos en la DFT, pero la señal ya fue capturada.
- Se puede rellenar con ceros! : zero padding







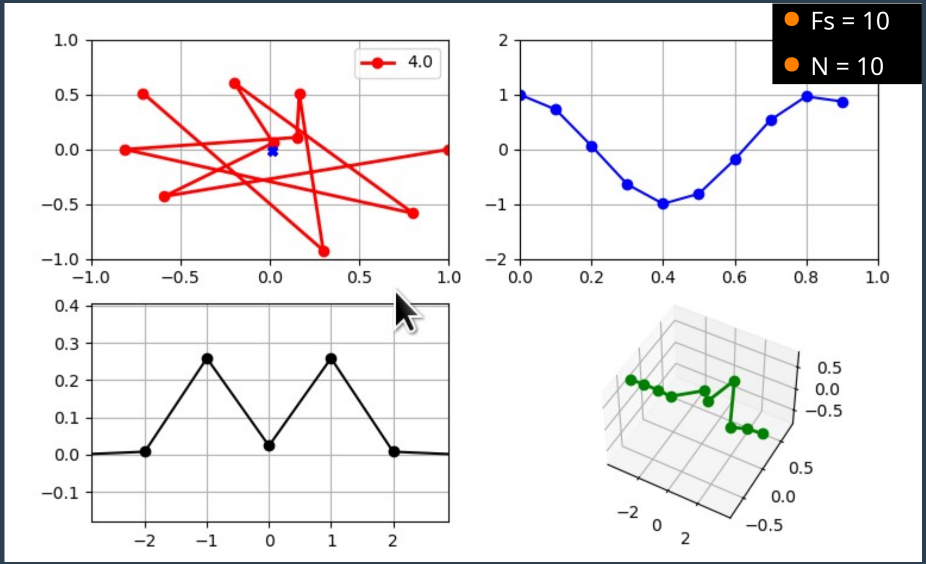




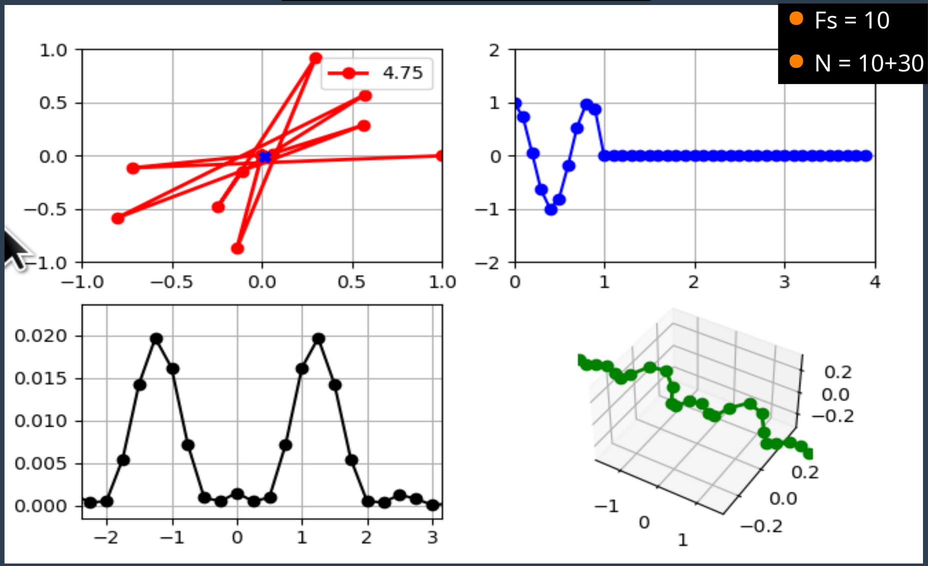
- Ver código: leakage.py

Fuga espectral – Zero padding

- La idea es tener mas frecuencias intermedias entre fs/N
- Para eso incrementamos N rellenando con ceros la señal original N+Z = N’
- Un efecto adverso es que la amplitud de la DFT se ve disminuida
- La nueva resolución espectral es fs/N’



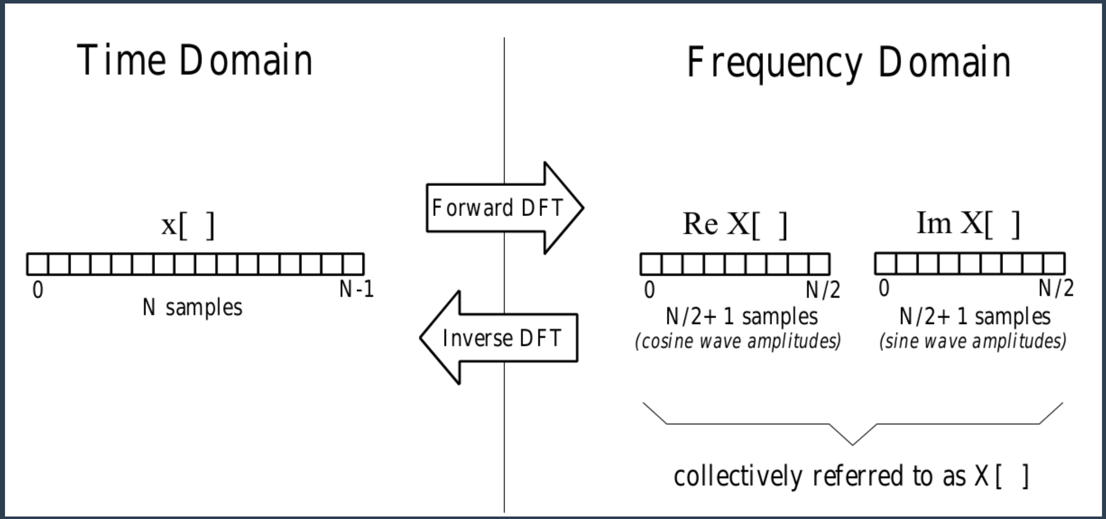
Señal de interés 1,2Hz

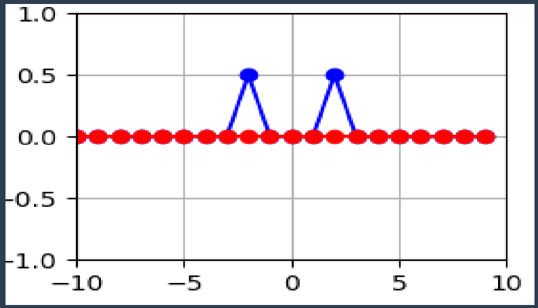


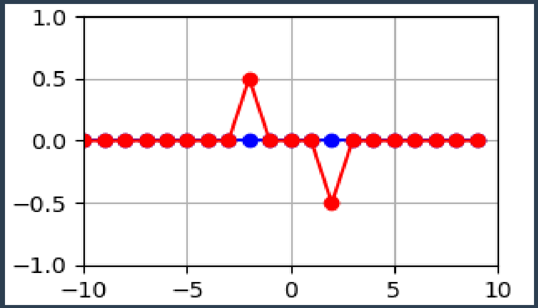
- Ver código: zero_padding.py

Simetria en DFT con entrada Real pura

- Si la señal de entrada es real pura, la DFT tiene simetría alrededor del n=0
- La simetria muestra siempre valores complejos conjugados => funcion hermitica
- En muchas aplicaciones solo basta con la mitad de los datos y cálculos.





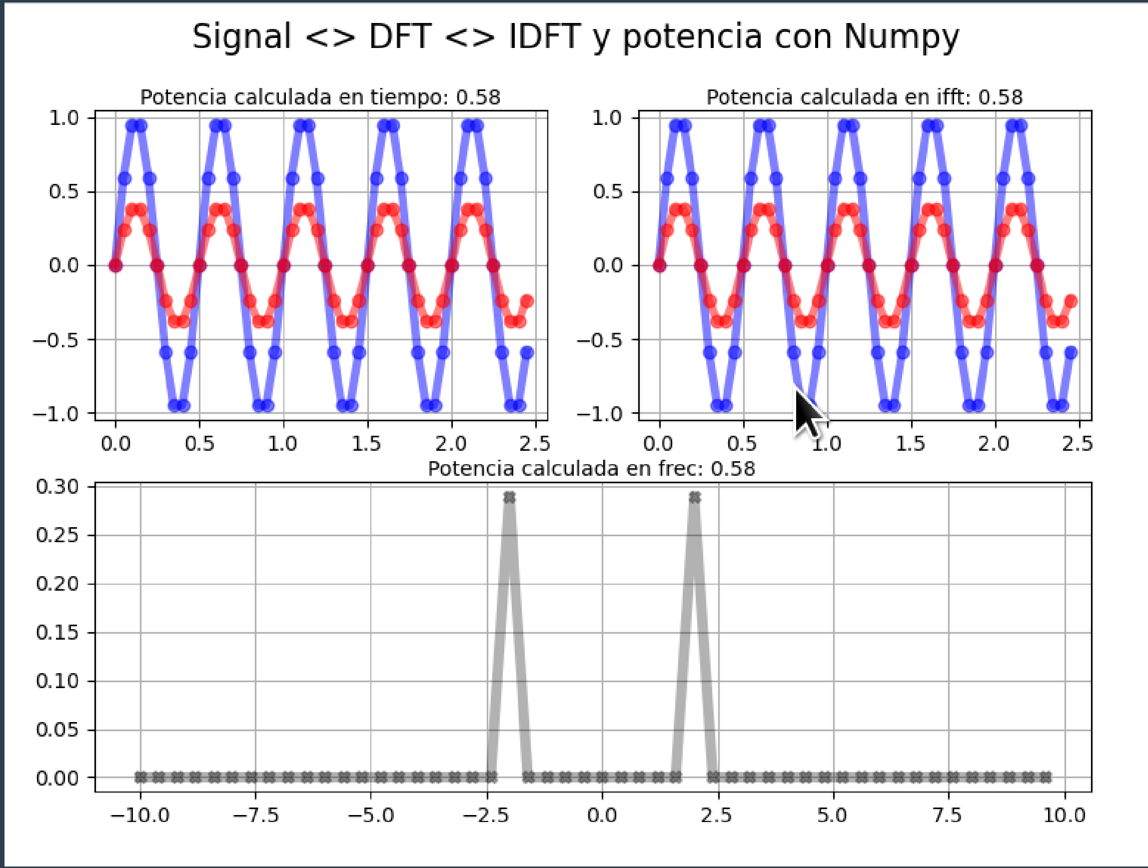


- Ver código: dft3.py

DFT con numpy

DFT con numpy

- Modulo np.fft
- Funcion np.fft.dft
- Evaluar np.fft.fftshift para centrar en cero
- Investigar el código para ver el calculo de potencia en tiempo y frecuencia.
- Tener en cuenta la normalizacion

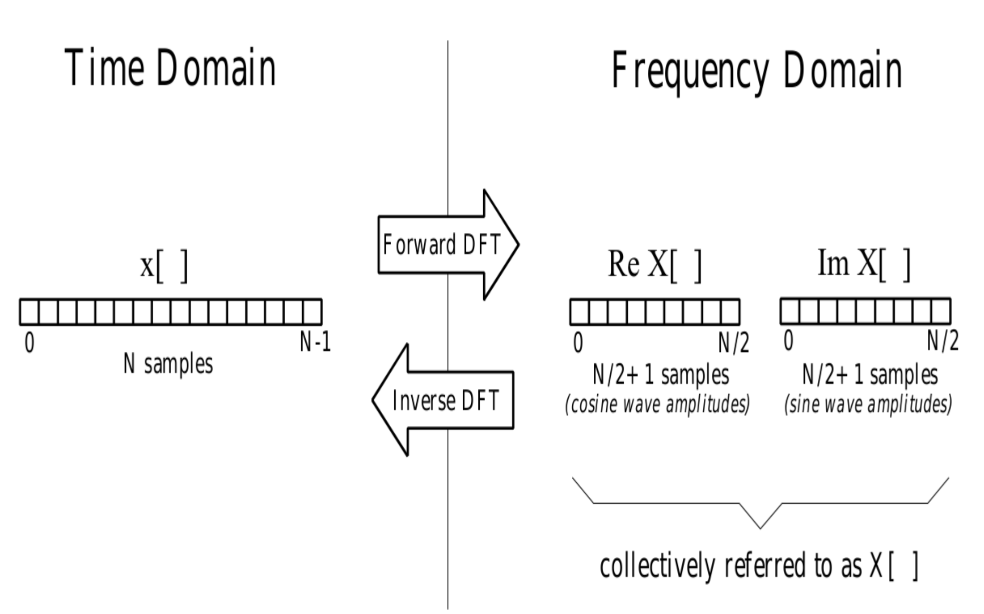


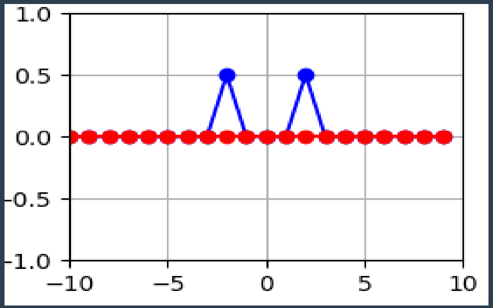
- Ver código: dft_idft_numpy.py

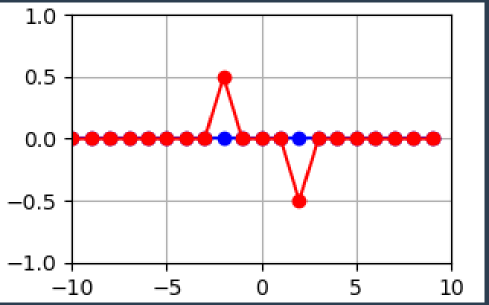
DFT con la CIAA

DFT Real con CMSIS-DSP

- Si la señal de entrada es reales, la DFT tiene simetría alrededor del n=0
- Se puede hacer y usar solo la mitad de los cálculos
- NOTA: La salida de la función de CMSIS intercala la parte real y la imaginaria





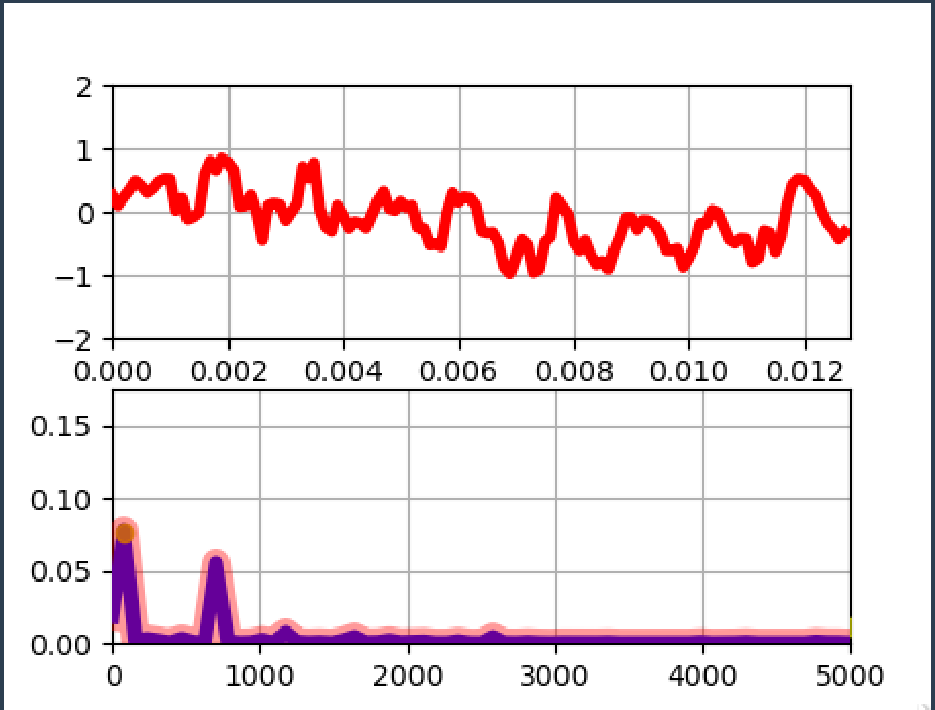


X = { real[0], imag[0], real[1], imag[1], real[2], imag[2] ... real[(N/2)-1], imag[(N/2)-1 }

- Ver carpeta clase3/psf1

DFT con CMSIS-DSP en Q1.15

- En los ejemplos se utiliza Q1.15
- Leer la documentación!
  - https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/group__RealFFT.html#ga053450cc600a55410ba5b5605e96245d
- Investigar otras opciones con float.
- Hay que inicializar la estructura antes de usar
- La fft MODIFICA los datos de entrada!!!
- Siempre verificar el tipo de datos de salida.
- Tener en cuenta los escalados.

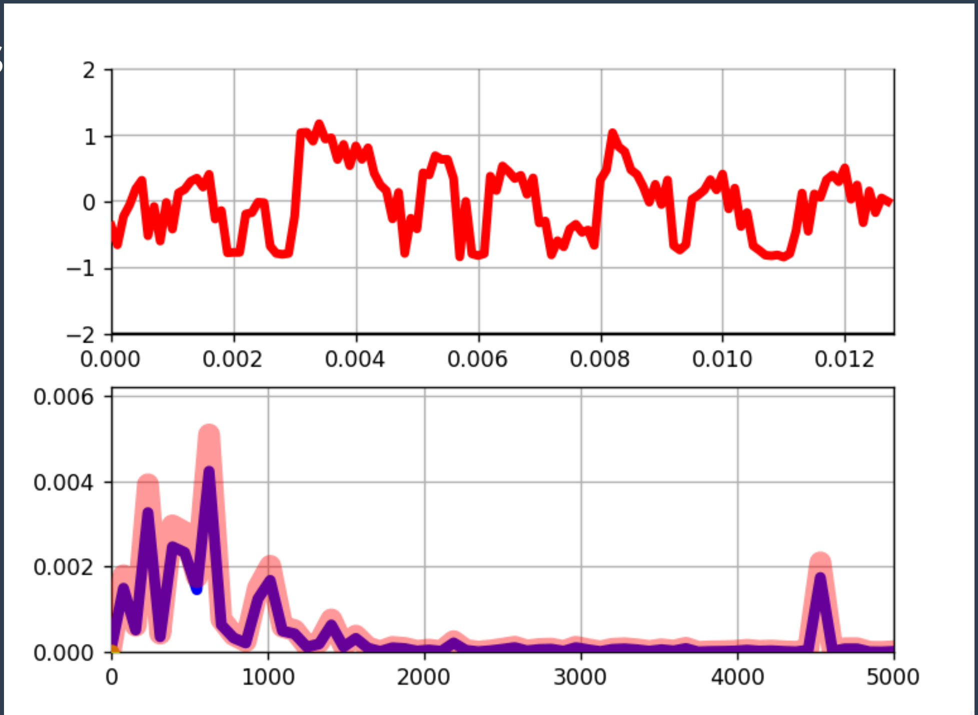



```
arm_rfft_init_q15        ( &S ,header.N ,0 ,1          );
arm_rfft_q15             ( &S ,fftIn ,fftOut           );
arm_cmplx_mag_squared_q15 ( fftOut ,fftMag ,header.N/2+1 );
```

- Ver carpeta clase3/psf1

DFT con CMSIS-DSP en float32

- CMSIS-DSP tambien cuanta con opciones para calcular la FFT en float32
- Hay que inicializar la estructura antes de usar
- La fft MODIFICA los datos de entrada!!!
- Siempre verificar el tipo de datos de salida.
- Tener en cuenta los escalados.




```
arm_rfft_init_f32 ( &S ,&cS   ,header.N ,0 ,1 );
arm_rfft_f32      ( &S ,fftIn ,fftOut      );
```

- Ver carpeta clase3/psf2

TP1

TP1

- Link al TP1
- https://forms.gle/g5QNTBFqi3WskGUC9
- Entrega el 25/7 23:59
- Entrega fuera de termino implica una penalizacion de 0.9
- Se puede completar parcialmente, y cuando el TP esta listo, se indica en la ultima pregunta del test para que sea corregido
- Las consultas del TP se pueden realizar directamente en el mismo formulario en la ultima seccion