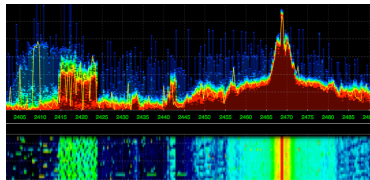


# Tema 07: Análisis espectral de señales: Transformada de Fourier

## Análisis de señales



Marco Teran

Escuela de Ciencias exactas e Ingeniería  
Universidad Sergio Arboleda

2019I

# OUTLINE

- 1 De la Serie de Fourier de tiempo continuo a la transformada de Fourier
- 2 De la Serie de Fourier de tiempo discreto a la transformada de Fourier
- 3 Par de la transformada de Fourier, FT
  - Espectro de Fourier
- 4 Propiedades de la transformada de Fourier
- 5 Ejemplos y ejercicios
- 6 Tarea

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

- Si una señal  $x(t)$  de tiempo continuo es periódica con periodo  $T$  se puede representar de forma analítica mediante la **serie de Fourier**
- Representar mediante la composición de una **suma** de funciones *armónicamente relacionadas*

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j\omega_k t}$$

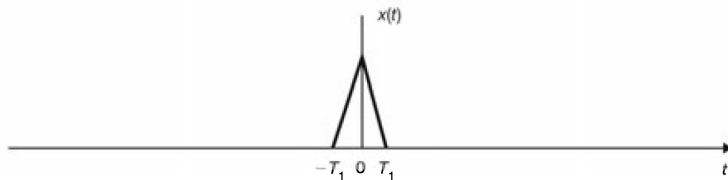
Donde,

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} x(t) e^{-j\omega_k t} dt$$

¿Pero que ocurre cuando la señal de análisis no es periódica?

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

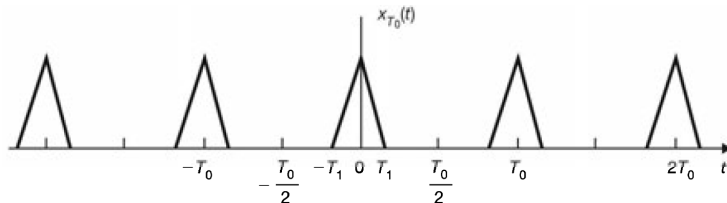
En este caso tenemos a  $x(t)$  una señal no periódica de duración finita, es decir  $x(t) = 0$  para  $|t| > T_1$ , tal cual como se puede observar en la siguiente gráfica:



**Figura 1:** Señal continua de duración finita

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

- Definimos la secuencia  $x_{T_0}(t)$  — representación periódica de  $x(t)$
- Se obtiene mediante la periodización, es decir repetición
- $T_0$  el periodo fundamental de la señal.



**Figura 2:** Señal continua periódica obtenida de la periodización de  $x(t)$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

La secuencia  $x_{T_0}(t)$  puede ser representada mediante la serie de Fourier

$$x_{T_0}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j\omega_0 k t} \quad (1)$$

donde,

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

con coeficientes de la serie de Fourier

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{\langle T_0 \rangle} x_{T_0}(t) e^{-jk\omega_k t} dt = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x_{T_0}(t) e^{-jk\omega_k t} dt \quad (2)$$

Podemos afirmar que

$$x_{T_0}(t) = x(t), \text{ para } |t| \leq T_1 \quad (3)$$

y  $x(t) = 0$  fuera de los límites de  $[-T_1, T_1]$ .

Podemos describir la ecuación 2 de la siguiente forma:

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{-T_1}^{T_1} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (4)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Definamos de acuerdo la ecuación 4 una nueva función de una variable independiente  $\omega$  de la siguiente manera:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$



# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Reescribamos la ecuación 4 implementando la nueva función definida por la ecuación 5, donde para este caso  $\omega = k\omega_0$ :

$$c_k = \frac{1}{T_0} X(k\omega_0) \quad (6)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Podemos representar el periodo  $T_0$  de la siguiente forma:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (7)$$

$$x_{T_0}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\omega_0}{2\pi} X(k\omega_0) e^{j\omega_0 kt} \quad (8)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Si  $T_0 \rightarrow \infty$  entonces

$$\lim_{T_0 \rightarrow \infty} x_{T_0}(t) = x(t) \quad (9)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Podemos representar el periodo  $T_0$  de la siguiente forma: Podemos afirmar que

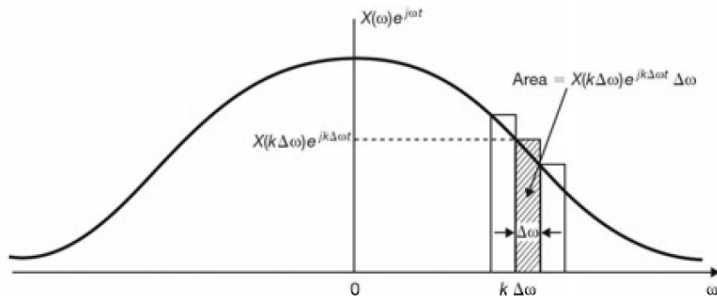
$$\text{si } T_0 \rightarrow \infty \text{ entonces } \omega_0 = \frac{2\pi}{N_0} \rightarrow 0 \text{ entonces } \omega_0 \rightarrow \Delta\omega$$

Reemplacemos el inverso del periodo (ecuación 7) en la ecuación de síntesis de la serie de Fourier (ecuación 1)

$$x(t) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} x_{T_0}(t) = \lim_{\omega_0 \rightarrow 0} \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \underbrace{X(k\omega_0)e^{jk\omega_0 t}}_{\text{altura}} \underbrace{\omega_0}_{\text{ancho}}. \quad (10)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{rectangulo}}$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER



**Figura 3:** Interpretación de la ecuación analítica de Fourier como suma de integral

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Por tanto la ecuación 10 se transforma en una integral,

$$x(t) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} x_{T_0}(t) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\Delta\omega) e^{jk\Delta\omega t} \Delta\omega \quad (11)$$

área bajo la función,

$$X(\omega) e^{j\omega t}$$

entonces,

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

- Si una señal  $x[n]$  de tiempo discreto es periódica con periodo  $N$  se puede representar de forma analítica mediante la **serie de Fourier**
- Representar mediante la composición de una **suma** de funciones *armónicamente relacionadas*

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

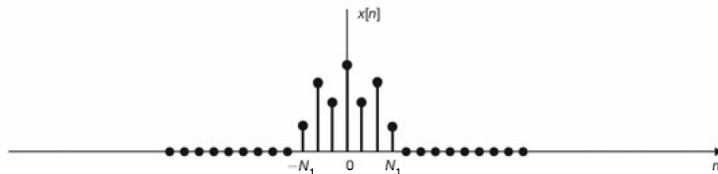
Donde,

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

¿Pero que ocurre cuando la señal de análisis no es periódica?

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

En este caso tenemos a  $x[n]$  una secuencia no periódica de duración finita, es decir  $x[n] = 0$  para  $|n| > N_1$ , tal cual como se puede observar en la siguiente gráfica:

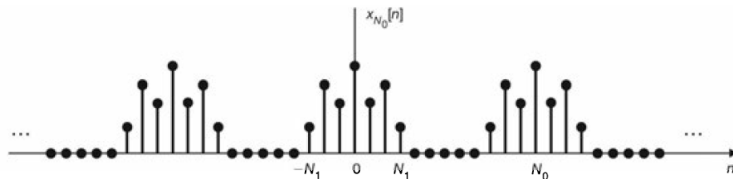


**Figura 4:** Señal discreta de duración finita



# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

- Definimos la secuencia  $x_{N_0}[n]$  — representación periódica de  $x[n]$
- Se obtiene mediante la periodización, es decir repetición
- $N_0$  el periodo fundamental de la señal.



**Figura 5:** Señal discreta periódica obtenida de la periodización de  $x[n]$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

La secuencia  $x_{N_0}[n]$  puede ser representada mediante la serie de Fourier

$$x_{N_0}[n] = \sum_{k=\langle N_0 \rangle} c_k e^{jk\Omega_0 n}. \quad (12)$$

donde,

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0}$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

con coeficientes de la serie de Fourier

$$c_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=\langle N_0 \rangle} x_{N_0}[n] e^{-jk\Omega_0 n}. \quad (13)$$

Podemos afirmar que

$$x_{N_0} = x[n], \text{ para } |n| \leq N_1 \quad (14)$$

y  $x[n] = 0$  fuera de los límites de  $[-N_1, N_1]$ .

Podemos describir la ecuación 13 de la siguiente forma:

$$c_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=-N_1}^{N_1} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} = \frac{1}{N_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} \quad (15)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Definamos de acuerdo la ecuación 15 una nueva función de una variable independiente  $\Omega$  de la siguiente manera:

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (16)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Reescribamos la ecuación 15 implementando la nueva función definida por la ecuación 16, donde para este caso  $\Omega = k\Omega_0$ :

$$c_k = \frac{1}{N_0} X(k\Omega_0) \quad (17)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Podemos representar el periodo  $N_0$  de la siguiente forma:

$$\frac{1}{N_0} = \frac{\Omega_0}{2\pi} \quad (18)$$

Reemplacemos el inverso del periodo (ecuación 18) en la ecuación de síntesis de la serie de Fourier (ecuación 12)

$$x_{N_0}[n] = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=\langle N_0 \rangle} \underbrace{X(k\Omega_0)e^{jk\Omega_0 n}}_{\text{altura}} \underbrace{\Omega_0}_{\text{ancho}}. \quad (19)$$

*rectangulo*

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Si  $N_0 \rightarrow \infty$  entonces

$$\lim_{N_0 \rightarrow \infty} x_{N_0}[n] = x[n] \quad (20)$$

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

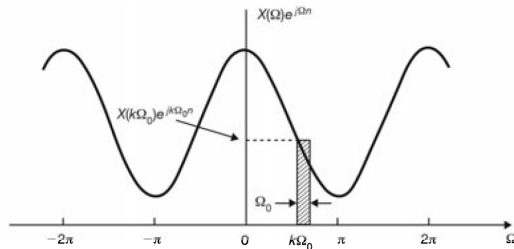
Reemplacemos el inverso del periodo (ecuación 18) en la ecuación de síntesis de la serie de Fourier (ecuación 12)

$$x[n] = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} x_{N_0}[n] = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=\langle N_0 \rangle} \underbrace{X(k\Omega_0)e^{jk\Omega_0 n}}_{\text{altura}} \underbrace{\Omega_0}_{\text{ancho}} . \quad (21)$$

*rectangulo*



# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER



**Figura 6:** Interpretación de la ecuación analítica de Fourier como suma de integral

$X(\Omega)$  es periódica con periodo  $2\pi$ . La secuencia  $e^{j\Omega n}$  también lo es. Por tanto el producto  $X(\Omega)e^{j\Omega n}$  es periódico con periodo  $N = 2\pi$ .

# DE LA SERIE DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Podemos afirmar que

$$\text{si } N_0 \rightarrow \infty \text{ entonces } \Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0} \rightarrow 0. \quad (22)$$

Por tanto la ecuación 19 se transforma en una integral, donde la suma  $\sum_{k=\langle N_0 \rangle}$  se realiza sobre

$N_0$ —intervalos de ancho cada uno  $\Omega_0 = \frac{2\pi}{N_0}$ , para un intervalo total de ancho  $2\pi$ .

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\Omega) e^{j\Omega n} d\omega \quad (23)$$

# PAR DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO, CTFT

Se entiende como al par de la transformada de Fourier de tiempo continuo la siguiente relación

$$x(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\omega) \quad (24)$$

Donde la transformada de Fourier de tiempo continuo se expresa mediante

$$X(\omega) = \mathfrak{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (25)$$

y la transformada inversa de Fourier de tiempo continuo se obtiene

$$x(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (26)$$

# PAR DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO, DTFT

Se entiende como al par de la transformada de Fourier de tiempo discreto la siguiente relación

$$x[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\Omega) \quad (27)$$

Donde la transformada de Fourier de tiempo discreto se expresa mediante

$$X(\Omega) = \mathfrak{F}\{x[n]\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (28)$$

y la transformada inversa de Fourier de tiempo discreto se obtiene

$$x[n] = \mathfrak{F}^{-1}\{X(\Omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\Omega)e^{j\Omega n} d\Omega \quad (29)$$

Recordemos que la DTFT  $X(\Omega)$  es periódica con periodo  $2\pi$ , es decir

$$X(\Omega) = X(\Omega + k2\pi) \quad (30)$$

# ESPECTRO DE FOURIER

## Espectro de Fourier

A  $X(\omega)/X(\Omega)$  se le conoce también como la representación en la frecuencia o el espectro de  $x(t)/x[n]$ .

### Tiempo continuo:

La transformada de Fourier de la secuencia  $x(t)$  es de carácter complejo.

### Forma polar

$$X(\omega) = |X(\omega)|e^{j\Phi(\omega)} \quad (31)$$

donde  $|X(\omega)|$  — espectro de magnitud;  $\Phi(\omega)$  — espectro de fase.

Si  $x(t) \in \Re$  entonces el espectro de magnitud es **par** y el espectro de fase **impar**.

### Tiempo discreto:

La transformada de Fourier de la secuencia  $x[n]$  es de carácter complejo.

### Forma polar:

$$X(\Omega) = |X(\Omega)|e^{j\Phi(\Omega)} \quad (32)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: LINEALIDAD

Tiempo continuo:

$$\alpha x(t) + \beta y(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \alpha X(\omega) + \beta Y(\omega) \quad (33)$$

Tiempo discreto:

$$\alpha x[n] + \beta y[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} \alpha X(\Omega) + \beta Y(\Omega) \quad (34)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: PERIODICIDAD DEL ESPECTRO DE UNA SEÑAL DISCRETA

$$X(\Omega + k2\pi) = X(\Omega) \quad (35)$$

$\Omega$  se da en radianes y es continua de  $-\pi \leq \Omega \leq \pi$  o también  $0 \leq \Omega \leq 2\pi$ .

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: CORRIMIENTOS DE FRECUENCIA Y TIEMPO

Tiempo continuo:

$$x(t - t_0) \xrightarrow{\mathcal{F}} e^{-j\omega t_0} X(\omega) \quad (36)$$

$$x(t)e^{j\omega_0 t} \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\omega - \omega_0) \quad (37)$$

A la ecuación 37 se le conoce como *modulación compleja*.

Tiempo discreto:

$$x[n - N] \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\Omega)e^{-j\Omega N} \quad (38)$$

$$x[n]e^{j\Omega_0 n} \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\Omega - \Omega_0) \quad (39)$$

A la ecuación 39 se le conoce como *modulación compleja*.



# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: CONJUGACIÓN

Tiempo continuo:

$$x^*(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} X^*(-\omega) \quad (40)$$

Tiempo discreto:

$$x^*[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} X^*(-\Omega) \quad (41)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: INVERSIÓN EN EL TIEMPO

Tiempo continuo:

$$x(-t) \xrightarrow{\mathcal{F}} X(-\omega) \quad (42)$$

Tiempo discreto:

$$x[-n] \xrightarrow{\mathcal{F}} X(-\Omega) \quad (43)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: ESCALAMIENTO EN EL TIEMPO

Tiempo continuo:

Para una versión escalada en el tiempo de  $x_s(t) = x(at)$ :

$$x(at) \xrightarrow{\mathcal{F}} \frac{1}{|a|} X\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad (44)$$

si  $a > 1$  la señal se comprime en el tiempo.

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: PARIDAD DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

**Tiempo continuo:**

Para  $x(t) \in \Re$

$$x(t) = x_{even}(t) + x_{odd}(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\omega) = A(\omega) + jB(\omega) \quad (45)$$

donde,

$$x_{even}(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \operatorname{Re}\{X(\omega)\} = A(\omega) \quad (46)$$

$$x_{odd}(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} j\operatorname{Im}\{X(\omega)\} = jB(\omega) \quad (47)$$

**Tiempo discreto:**

Para  $x[n] \in \Re$

$$x[n] = x_{even}[n] + x_{odd}[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\Omega) = A(\Omega) + jB(\Omega) \quad (48)$$

donde,

$$x_{even}[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} \operatorname{Re}\{X(\Omega)\} = A(\Omega) \quad (49)$$

$$x_{odd}[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} j\operatorname{Im}\{X(\Omega)\} = jB(\Omega) \quad (50)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: TEOREMA DE PARSEVAL

Tiempo continuo:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega \quad (51)$$

Tiempo discreto:

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} |X(\Omega)|^2 d\Omega \quad (52)$$

$$P_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |x[n]|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} S_x(\Omega) d\Omega \quad (53)$$

donde  $S_x(\Omega)$  se conoce como densidad espectral de potencia y se calcula

$$S_x(\Omega) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{|X_N(\Omega)|^2}{2N+1}. \quad (54)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: DIFERENCIACIÓN Y DIFERENCIA

Tiempo continuo:

**Diferenciación:**

$$\frac{dx(t)}{dt} \xrightarrow{\mathcal{F}} j\omega X(\omega) \quad (56)$$

Tiempo discreto:

**Diferencia:**

$$\underbrace{x[n] - x[n-1]}_{\text{secuencia de primera diferencia}} \xrightarrow{\mathcal{F}} (1 - e^{-j\Omega})X(\Omega) \quad (57)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: DIFERENCIACIÓN EN LA FRECUENCIA

Tiempo continuo:

$$-jtx(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \frac{dX(\omega)}{d\omega} \quad (58)$$

Tiempo discreto:

$$nx[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} j \frac{dX(\Omega)}{d\Omega} \quad (59)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: INTEGRACIÓN Y ACUMULACIÓN

Tiempo continuo:

**Integración**

$$\int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \xrightarrow{\mathcal{F}} \pi X(0) \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} X(\omega) \quad (60)$$

Tiempo discreto:

**Acumulación**

$$\sum_{k=-\infty}^n x[k] \xrightarrow{\mathcal{F}} \pi X(0) \delta(\Omega) + \frac{1}{1 - e^{-j\Omega}} X(\Omega) \quad (61)$$



# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: INTEGRAL DE CONVOLUCIÓN

Integral de convolución en el dominio del tiempo es multiplicación en el dominio de la frecuencia.

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (62)$$

Dominio de la frecuencia es el producto de ambas señales:

$$\underbrace{Y(\omega)}_{\text{espectro de salida } y(t)} = \underbrace{X(\omega)}_{\text{espectro de entrada } x(t)} \underbrace{H(\omega)}_{\text{respuesta en frecuencia del sistema}} \quad (63)$$

Se cumple que

$$|Y(\omega)| = |X(\omega)| |H(\omega)| \quad (64)$$

$$\angle Y(\omega) = \angle X(\omega) + \angle H(\omega) \quad (65)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: SUMA DE CONVOLUCIÓN

Suma de convolución en el dominio del tiempo es multiplicación en el dominio de la frecuencia.

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k] \quad (66)$$

en el dominio de la frecuencia se puede realizar mediante el calculo del producto de ambos argumentos de la suma de convolución

$$Y(\Omega) = X(\Omega)H(\Omega) \quad (67)$$

Se cumple que

$$|Y(\Omega)| = |X(\Omega)||H(\Omega)| \quad (68)$$

$$\angle Y(\Omega) = \angle X(\Omega) + \angle H(\Omega) \quad (69)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: MULTIPLICACIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Tiempo continuo:

$$x(t)y(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \frac{1}{2\pi} X(\omega) \circledast Y(\omega) \quad (70)$$

Tiempo discreto:

$$x[n]y[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} \frac{1}{2\pi} X(\Omega) \circledast Y(\Omega) \quad (71)$$

donde  $\circledast$  — implica **convolución circular**, que se calcula de la forma

$$X(\Omega) \circledast Y(\Omega) = \int_{2\pi} X(\Theta) Y(\Omega - \Theta) d\Theta \quad (72)$$

# PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER: DUALIDAD

Tiempo continuo:

si

$$x(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\omega) \quad (73)$$

entonces,

$$X(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} 2\pi x(-\omega) \quad (74)$$

Tiempo discreto:

si

$$x[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\Omega) \quad (75)$$

entonces,

$$X[n] \xrightarrow{\mathcal{F}} 2\pi x(-\Omega) \quad (76)$$

# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO: EJEMPLO

## Ejemplo

Encuentre la DTFT de la siguiente señal:

$$x[n] = \begin{cases} A, & \text{para } -M \leq n \leq M; \\ 0, & \text{para otros casos.} \end{cases}$$

# TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO: EJEMPLO

## Ejemplo

Encuentre la iCTFT de la siguiente señal:

$$X(\omega) = \cos(\omega) \left\{ u\left(\omega + \frac{\pi}{2}\right) - u\left(\omega - \frac{\pi}{2}\right) \right\}$$

# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO CONTINUO: EJEMPLO

## Ejemplo

Encuentre la CTFT de la siguiente señal:

$$s(t) = |3t| \{u(t+2) - u(t-2)\}$$

# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO: EJEMPLO

## Ejemplo

Encuentre la DTFT de la siguiente señal:

$$x[n] = r^n u[n], \text{ donde } |r| < 1.$$



# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO: EJEMPLO

## Ejemplo

Encuentre la iDTFT del siguiente pulso rectangular  $X(\Omega)$ :

$$X(\Omega) = \begin{cases} 1, & \text{para } |\Omega| \leq W; \\ 0, & \text{para } W < |\Omega| < \pi. \end{cases}$$

# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO: EJERCICIO

## Ejercicio

Encuentre la DTFT de la siguiente señal:

$$x[n] = \begin{cases} 1, & \text{para } |n| \leq N_1; \\ 0, & \text{para } |n| > N_1. \end{cases}$$

# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO: EJERCICIO

## Ejercicio

Encuentre la DTFT de la siguientes señales:

(a)  $x[n] = a^{|n|}$ , para  $-1 < a < 1$ .

(b)  $s[n] = \sin\left(\frac{\pi n}{4} (u[n] - u[n-5])\right)$

(c)  $x[n] = -a^n u[-n-1]$ , donde  $a \in \mathbb{R}$ .

# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO: EJERCICIO

## Ejercicio

Encuentre la iDTFT de la siguientes señales:

(a)

$$X(\Omega) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq |\Omega| \leq \Omega_0; \\ 1, & \text{para } \Omega_0 < |\Omega| < \pi. \end{cases}$$

(b)  $P(\Omega) = \cos^2(\Omega)$

# TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO: EJERCICIO

## Ejercicio

Encuentre la iDTFT de la siguientes señales:

(a)

$$X(\Omega) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq |\Omega| \leq \Omega_0; \\ 1, & \text{para } \Omega_0 < |\Omega| < \pi. \end{cases}$$

(b)  $P(\Omega) = \cos^2(\Omega)$

# TAREA

## Ejercicio

Determine y dibuje la densidad espectral de potencia  $S_x(\Omega)$  de la siguiente señal  $x[n]$ :

$$x[n] = a^n u[n]$$