# Teoria das Comunicações

Prof. André Noll Barreto

Prova 1 - 2010/02

Aluno:____________________________________________

Matrícula: __________________________________________

## Instruções

- A prova terá a duração de 2h30
- A prova pode ser feita a lápis ou caneta
- Não é permitida consulta a notas de aula, todas as fórmulas necessárias serão dadas no final da prova.
- Toda resposta deverá está contida nas folhas da prova. Folhas de rascunho serão fornecidas caso necessário, mas não devem ser entregues.
- Calculadores podem ser utilizadas, mas todas as contas e respostas devem ser justificadas

UnB

departamento de engenharia elétrica

# Teoria das Comunicações

Prof. André Noll Barreto

UnB

departamento de engenharia elétrica

## Questão 1 (4 pontos)

Um sinal periódico é descrito como

$$g_p(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t-nT_0)$$

com

$$g(t)=|t|\,\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_0}\right)$$

a) Calcule os três primeiros termos não nulos da série de Fourier trigonométrica compacta. (1 ponto)

b) Quais os termos equivalentes na série de Fourier exponencial? (0,5 ponto)

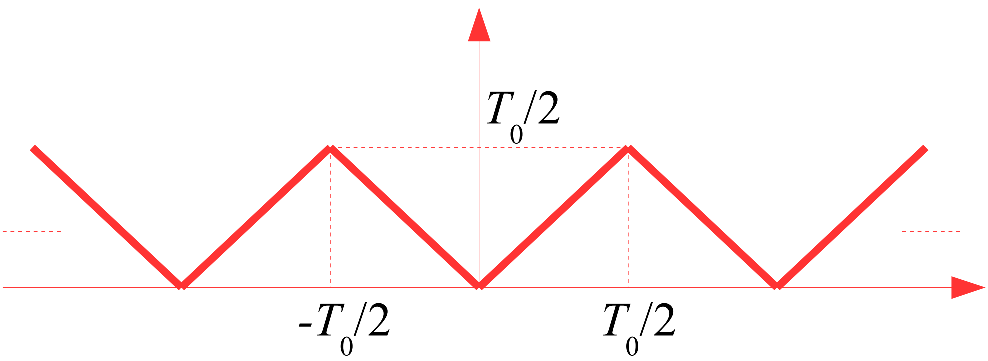
c) Qual a porcentagem da potência do sinal contida nestes termos? (1 ponto)

d) Considere agora que em vez da série trigonométrica, são usadas como funções base o conjunto de funções $\{1;x_{e,1};x_{o,1};x_{e,2};x_{o,2};x_{e,3};x_{o,3};\ldots\}$ , em que

$$x_{e,n}=\mathrm{sgn}(\cos(2\pi n f_0 t))$$
$$x_{o,n}=\mathrm{sgn}(\sin(2\pi n f_0 t)) \quad .$$

Refaça os itens (a) e (c) neste caso. (1,5 ponto)

a) O sinal é dado pelo seguinte gráfico




O sinal é par, portanto só precisamos calcular os termos referentes à série de cossenos.

$$a_0=\frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} g(t)\,dt=\frac{2}{T_0}\int_0^{T_0/2} t\,dt=\frac{2}{T_0}\left.\frac{t^2}{2}\right|_0^{T_0/2}=\frac{T_0}{4}$$

$$a_n=\frac{2}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} g(t)\cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right)dt=\frac{4}{T_0}\int_0^{T_0/2} t\cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right)dt$$

$$=\frac{4}{T_0}\frac{T_0^2}{4n^2\pi^2}\left[\cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right)+\frac{2\pi n t}{T_0}\sin\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right)\right]_0^{T_0/2}$$

$$=\frac{T_0}{n^2\pi^2}[\cos(\pi n)+\pi n\sin(\pi n)-1]=\frac{T_0}{n^2\pi^2}[\cos(\pi n)-1]$$

$$a_1=\frac{-2T_0}{\pi^2} \quad ; \quad a_2=0 \quad ; \quad a_3=\frac{-2T_0}{9\pi^2}$$

Portanto os 3 primeiros termos não nulos são:

$$g(t)\approx\frac{T_0}{4}-\frac{2T_0}{\pi^2}\cos\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right)-\frac{2T_0}{9\pi^2}\cos\left(\frac{6\pi t}{T_0}\right)$$
$$=\frac{T_0}{4}+\frac{2T_0}{\pi^2}\cos\left(\frac{2\pi t}{T_0}-\pi\right)+\frac{2T_0}{9\pi^2}\cos\left(\frac{6\pi t}{T_0}-\pi\right)$$

b) Para achar a série exponencial usamos o fato que $\cos x=\frac{e^{jx}+e^{-jx}}{2}$. Portanto

$$g(t)\approx\frac{T_0}{4}-\frac{T_0}{\pi^2}e^{j\frac{2\pi t}{T_0}}-\frac{T_0}{\pi^2}e^{-j\frac{2\pi t}{T_0}}-\frac{T_0}{9\pi^2}e^{j\frac{6\pi t}{T_0}}-\frac{T_0}{9\pi^2}e^{-j\frac{6\pi t}{T_0}}$$
$$=\frac{T_0}{4}+\frac{T_0}{\pi^2}e^{j\frac{2\pi t}{T_0}}e^{j\pi}+\frac{T_0}{\pi^2}e^{-j\frac{2\pi t}{T_0}}e^{-j\pi}+\frac{T_0}{9\pi^2}e^{j\frac{6\pi t}{T_0}}e^{j\pi}+\frac{T_0}{9\pi^2}e^{-j\frac{6\pi t}{T_0}}e^{-j\pi}$$

c) A potência do sinal é $P_g=\frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2}t^2\,dt=\frac{1}{T_0}\left.\frac{t^3}{3}\right|_{-T_0/2}^{T_0/2}=\frac{2}{T_0}\frac{T_0^3}{24}=\frac{T_0^2}{12}$

pelos 3 primeiros termos, a potência seria

$$P_{g,3}=a_0^2+\frac{a_1^2}{2}+\frac{a_3^2}{2}=\frac{T_0^2}{16}+\frac{4T_0^2}{2\pi^4}+\frac{4T_0^2}{2(81)\pi^4}=0{,}08328\,T_0^2=0{,}9994\,P_g$$

d) as funções base são ondas retangulares periódicas, com períodos iguais aos da série trigonométrica. Precisamos também apenas dos termos correspondentes aos sinais base pares.
O termo $a_0$ é o mesmo da série trigonométrica.
Como as funções $x_{o,n}$ são ímpares e g(t) é par, só precisamos calcular os termos correspondentes às funções $x_{e,n}$, assim como na série trigonométrica.
Todas as funções base tem a mesma energia em um período $T_0$, $E_n=T_0$. Os coeficientes da série são dados por

$$a_1=\frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2}g(t)\,x_{e,1}(t)\,dt=\frac{2}{T_0}\int_0^{T_0/4}t\,dt-\frac{2}{T_0}\int_{T_0/4}^{T_0/2}t\,dt=\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_0^{T_0/4}-\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_{T_0/4}^{T_0/2}$$
$$=2\frac{(2)}{T_0}\frac{T_0^2}{16(2)}-\frac{2}{T_0}\frac{T_0^2}{4(2)}=-\frac{T_0}{8}$$

$$a_2=\frac{2}{T_0}\int_0^{T_0/8}t\,dt-\frac{2}{T_0}\int_{T_0/8}^{3T_0/8}t\,dt+\frac{2}{T_0}\int_{3T_0/8}^{T_0/2}t\,dt$$
$$=\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_0^{T_0/8}-\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_{T_0/8}^{3T_0/8}+\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_{3T_0/8}^{T_0/2}$$
$$=\frac{2(2)}{T_0}\frac{T_0^2}{64(2)}-\frac{2(2)}{T_0}\frac{9T_0^2}{64(2)}+\frac{2}{T_0}\frac{T_0^2}{4(2)}=0$$

$$a_3=\frac{2}{T_0}\int_0^{T_0/12}t\,dt-\frac{2}{T_0}\int_{T_0/12}^{3T_0/12}t\,dt+\frac{2}{T_0}\int_{3T_0/12}^{5T_0/12}t\,dt-\frac{2}{T_0}\int_{5T_0/12}^{T_0/2}t\,dt$$
$$=\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_0^{T_0/12}-\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_{T_0/12}^{3T_0/12}+\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_{3T_0/12}^{5T_0/12}-\frac{2}{T_0}\left[\frac{t^2}{2}\right]_{5T_0/12}^{6T_0/12}$$
$$=\frac{2(2)}{T_0}\frac{T_0^2}{144(2)}-\frac{2(2)}{T_0}\frac{9T_0^2}{144(2)}+\frac{2(2)}{T_0}\frac{25T_0^2}{144(2)}-\frac{2}{T_0}\frac{36T_0^2}{144(2)}=-\frac{1}{72}$$

pelos 3 primeiros termos, e , a potência seria

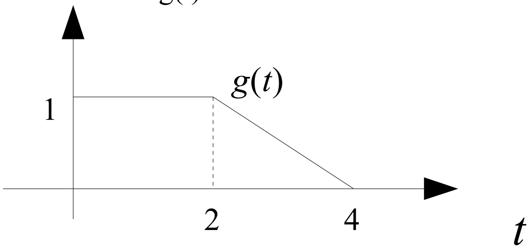
$$P_{g,3}=a_0^2+a_1^2+a_3^2=\frac{T_0^2}{16}+\frac{T_0^2}{64}+\frac{T_0^2}{(72)^2}=0{,}78318\,T_0^2=0{,}9398\,P_g$$

# Teoria das Comunicações

Prof. André Noll Barreto

## Questão 2 (2 pontos)

Dado o sinal g(t) abaixo




Calcule sua transformada de Fourier, **sem resolver a integral de Fourier**, usando apenas as propriedades na tabela no final da prova. ( 1 ponto )
Ache ~~e esboce~~ o espectro de amplitude e de fase. (0,5 ponto)
Qual sua densidade espectral de energia? (0,5 ponto)

a)
Existem várias maneiras de se obter a função *g*, em termos das funções rect e triang., e degrau, como por exemplo

$$g(t)=\Delta(t/4-1/2)+\Delta(t/4)\mathrm{rect}(t/2-1/2) \quad \text{ou}$$
$$g(t)=\Delta(t/4-1/2)\,u(t-2)+\mathrm{rect}(t/2-1/2) \quad \text{ou}$$
$$g(t)=(2\Delta(t/8)-\Delta(t/4))\,u(t) \quad \text{ou}$$
$$g(t)=\int_{-\infty}^{t}\left(\delta(x)-\frac{1}{2}\mathrm{rect}\left(\frac{x}{2}-\frac{3}{2}\right)\right)dx$$

Pela última fórmula, evitamos realizar uma convolução na frequência, e temos a transformada

$$G_1(f)=F\left\{\delta(t)-\frac{1}{2}\mathrm{rect}\left(\frac{x}{2}-\frac{3}{2}\right)\right\}=1-\mathrm{sinc}(2\pi f)e^{-j6\pi f}$$
$$G(f)=\frac{G_1(f)}{j2\pi f}+\frac{1}{2}G_1(0)\delta(f)=\frac{1-\mathrm{sinc}(2\pi f)e^{-j6\pi f}}{j2\pi f}$$

b)

$$G(f)=\frac{1-\mathrm{sinc}(2\pi f)\cos(6\pi f)+j\,\mathrm{sinc}(2\pi f)\sin(6\pi f)}{j2\pi f}$$
$$|G(f)|=\sqrt{\frac{1+\mathrm{sinc}^2(2\pi f)\cos^2(6\pi f)-2\,\mathrm{sinc}(2\pi f)\cos(6\pi f)+\mathrm{sinc}^2(2\pi f)\sin^2(6\pi f)}{4\pi^2 f^2}}$$
$$=\frac{\sqrt{1+\mathrm{sinc}^2(2\pi f)-2\,\mathrm{sinc}(2\pi f)\cos(6\pi f)}}{2\pi f}$$

$$\Theta_f=\tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{sinc}(2\pi f)\sin(6\pi f)}{1-\mathrm{sinc}(2\pi f)\cos(6\pi f)}\right)-\frac{\pi}{2}$$

c)

$$\Psi(f)=|G(f)|^2=\frac{1+\mathrm{sinc}^2(2\pi f)-2\,\mathrm{sinc}(2\pi f)\cos(6\pi f)}{4\pi^2 f^2}$$

UnB

departamento de engenharia elétrica

# Teoria das Comunicações

Prof. André Noll Barreto

UnB

departamento de engenharia elétrica

## Questão 3 (2 pontos)

O sinal

$$x(t)=\cos^2(200\pi t)+\sin(300\pi t)$$

é transmitido por um equipamento não linear, cuja resposta é dada por

$$y(t)=x(t)+0{,}001\,x^2(t)$$

Esboce o espectro de fase e amplitude na saída da não linearidade (1 ponto).

No receptor, o sinal passa por um filtro passa-baixa ideal, com frequência de corte igual à largura de banda do sinal *x*(*t*). Sabemos também que o receptor tem ruído térmico branco aditivo com densidade espectral de potência $N_0/2=5\times10^{-4}\,\mathrm{W/Hz}$ . Qual a razão (em dB) entre a potência do sinal desejado *x*(*t*) e a potência da soma de distorção com ruído na saída do filtro? ( 1 ponto)

a)

o sinal pode ser expandido como

$$x(t)=\frac{1}{2}+\frac{\cos(400\pi t)}{2}+\sin(300\pi t)$$

na saída da não linearidade temos

$$y(t)=\frac{1}{2}+\frac{\cos(400\pi t)}{2}+\sin(300\pi t)+\ldots$$

$$\ldots+\frac{1}{1000}\left[\frac{1}{4}+\frac{\cos^2(400\pi t)}{4}+\sin^2(300\pi t)+\frac{\cos(400\pi t)}{2}+\sin(300\pi t)+\cos(400\pi t)\sin(300\pi t)\right.$$

$$=0.500875-0.0005\sin(100\pi t)+1{,}001\sin(300\pi t)+0{,}5005\cos(400\pi t)+\ldots$$

$$\ldots-0{,}0005\cos(600\pi t)+0{,}0005\sin(700\pi t)+0{,}00025\cos(800\pi t)$$

O espectro de amplitude e fase deve apresentar os seguintes componentes com as seguintes amplitudes e fases

| **Frequência (Hz)** | **amplitude** | **fase** |
|---|---|---|
| -400 | $1{,}25 \times 10^{-4}$ | 0 |
| -350 | $2{,}5 \times 10^{-4}$ | $\pi/2$ |
| -300 | $2{,}5 \times 10^{-4}$ | 0 |
| -200 | 0,250025 | 0 |
| -150 | 0,500050 | $\pi/2$ |
| -50 | $2{,}5 \times 10^{-4}$ | $-\pi/2$ |
| 0 | 0,250044 | 0 |
| 50 | $2{,}5 \times 10^{-4}$ | $\pi/2$ |
| 150 | 0,500050 | $-\pi/2$ |
| 200 | 0,250025 | 0 |
| 300 | $2{,}5 \times 10^{-4}$ | 0 |
| 350 | $2{,}5 \times 10^{-4}$ | $-\pi/2$ |
| 400 | $1{,}25 \times 10^{-4}$ | 0 |

b) O filtro irá remover todos os componentes com frequência acima de 200 Hz. Sendo assim teremos o sinal

$$z(t)=0.500875-0.0005\sin(100\pi t)+1{,}001\sin(300\pi t)+0{,}5005\cos(400\pi t)$$

A potência do sinal desejado é

$$P_s=0{,}5^2+\frac{1^2}{2}+\frac{0{,}5^2}{2}=0{,}875$$

a interferência é o componente em 50 Hz, cuja potência é

$$P_I=\frac{0{,}0005^2}{2}=0{,}125\times10^{-6}$$

A potência do ruído branco é

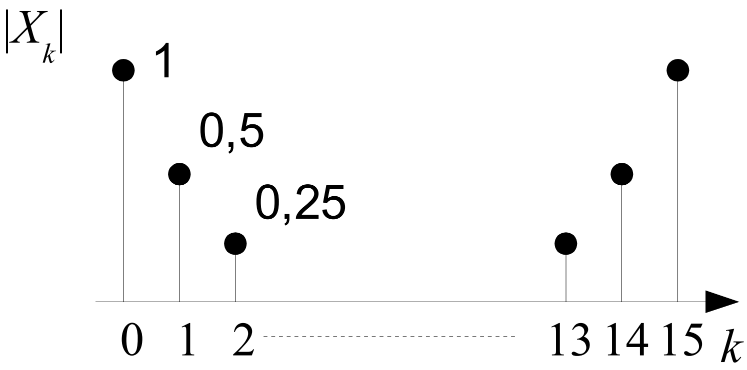
$$P_N=BN_0=200\left(5\times10^{-4}\right)$$

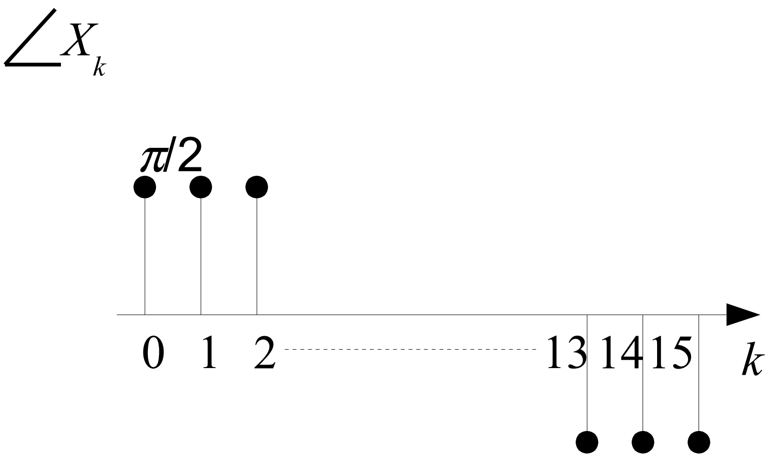
e a razão sinal ruído

$$RSR=\frac{P_S}{P_I+P_N}=8{,}75=9{,}4\,\mathrm{dB}$$

## Questão 4

A transformada de Fourier discreta (DFT) de um sinal amostrado com $N$=16 amostras e intervalo de amostragem $T_a$ = 1ms é representada nas figuras abaixo.




Qual a largura de banda aproximada deste sinal? (1,0 ponto)
Ache as 4 primeiras amostras do sinal. (1,0 ponto)

antes de mais nada, havia um erro no exercício, a primeira amostra na frequência deveria estar em 1, e não em 0. O problema pode ser resolvido assim mesmo, mas resultará em um sinal complexo.

a) o intervalo entre as amostras na frequência é dado por

$$f_a = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{NT_a} = \frac{1}{16\times 10^{-3}} = 62.5\,\mathrm{Hz}$$

como temos espectro apenas nas três primeiras frequências, a banda estimada do sinal é

$$B = 3 * 62{,}5\,\mathrm{Hz} = 187{,}5\,\mathrm{Hz}$$

b) é só aplicar a fórmula da transformada inversa

$$g(nT_a)=\frac{1}{NT_a}\sum_{n=0}^{N-1} G_k e^{j2\pi kn/N}=\frac{1}{16\times 10^{-3}}\sum_{n=0}^{15} G_k e^{j\pi kn/8}$$
$$=\frac{10^3}{16}\left(e^{j\pi/2}+\frac{1}{2}e^{j\pi/2}e^{j\pi n/8}+\frac{1}{4}e^{j\pi/2}e^{j\pi n/4}+\frac{1}{4}e^{-j\pi/2}e^{j13\pi n/8}+\frac{1}{2}e^{-j\pi/2}e^{j14\pi n/8}+e^{-j\pi/2}e^{j15\pi n/8}\right)$$

$$g(0)=\frac{10^3}{16}\left(j+\frac{j}{2}+\frac{j}{4}-\frac{j}{4}-\frac{j}{2}-j\right)=0$$

$$g(T_a)=\frac{10^3}{16}\left(j+\frac{j}{2}e^{j\pi/8}+\frac{j}{4}e^{j\pi/4}-\frac{j}{4}e^{j13\pi/4}-\frac{j}{2}e^{j7\pi/4}-je^{j15\pi/8}\right)$$

# Teoria das Comunicações

Prof. André Noll Barreto

## Fórmulas Úteis

Identidades Trigonométricas:

$$\sin(2x) = 2\sin x \cos x$$
$$\cos(2x) = \cos^2 x - \sin^2 x$$
$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1$$
$$\cos^2 x = \frac{1}{2}(1 + \cos 2x)$$
$$\sin^2 x = \frac{1}{2}(1 - \cos 2x)$$
$$\sin(x \pm y) = \sin x \cos y \pm \cos x \sin y$$
$$\cos(x \pm y) = \cos x \cos y \mp \sin x \sin y$$
$$\tan(x \pm y) = \frac{\tan x \pm \tan y}{1 \mp \tan x \tan y}$$
$$a\cos x + b\sin x = \sqrt{a^2 + b^2}\cos\left(x + \tan^{-1}(-b/a)\right)$$

Integrais:

$$\int x \sin ax \, dx = \frac{1}{a^2}(\sin ax - ax\cos ax)$$
$$\int x \cos ax \, dx = \frac{1}{a^2}(\cos ax + ax\sin ax)$$
$$\int x^2 \sin ax \, dx = \frac{1}{a^3}(2ax\sin ax + 2\cos ax - a^2x^2\cos ax)$$
$$\int x^2 \cos ax \, dx = \frac{1}{a^3}(2ax\cos ax - 2\sin ax + a^2x^2\sin ax)$$
$$\int x e^{ax} \, dx = \frac{e^{ax}}{a^2}(ax - 1)$$
$$\int x^2 e^{ax} = \frac{e^{ax}}{a^3}(a^2x^2 - 2ax + 2)$$
$$\int \frac{1}{x^2 + a^2} dx = \frac{1}{a}\tan^{-1}\frac{x}{a}$$
$$\int \frac{x}{x^2 + a^2} dx = \frac{1}{2}\ln(x^2 + a^2)$$
$$\int \frac{x}{a^4 + x^4} dx = \frac{1}{2a^2}\tan^{-1}\frac{x^2}{a^2}$$

# Teoria das Comunicações

Prof. André Noll Barreto

Série de Fourier Generalizada:

$$g(t)=\sum_{n=1}^{\infty} c_n x_n(t)$$

$$c_n=\frac{1}{E_n}\int_{T_0} g(t)\, x_n^* dt$$

Série de Fourier Trigonométrica:

$$g(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t)+\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi n f_0 t)=C_0+\sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\left(2\pi n f_0 t+\theta_n\right)$$

$$a_0=\frac{1}{T_0}\int_{T_0} g(t)dt\,;\quad a_n=\frac{2}{T_0}\int_{T_0} g(t)\cos(2\pi n f_0 t)\,;\quad b_n=\frac{2}{T_0}\int_{T_0} g(t)\sin(2\pi n f_0 t)$$

$$C_0=a_0\,;\quad C_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2}$$

Série de Fourier Exponencial:

$$g(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n e^{j2\pi n f_0 t}$$

$$D_n=\frac{1}{T_0}\int_{T_0} g(t)\, e^{-j2\pi n f_0 t} dt=\frac{C_n}{2} e^{j\theta_n}\,;\quad D_{-n}=\frac{C_n}{2} e^{-j\theta_n}$$

# Teoria das Comunicações

Prof. André Noll Barreto

Tabela de Transformadas de Fourier:

$$g(t)=\int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{j2\pi f t}dt \overset{F}{\Leftrightarrow} G(f)=\int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j2\pi f t}df$$

$$\delta(t) \overset{F}{\Leftrightarrow} 1$$

$$1 \overset{F}{\Leftrightarrow} \delta(f)$$

$$t^n e^{-at}u(t) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{n!}{(a+j2\pi f)^{n+1}}$$

$$e^{-a|t|} \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{2a}{a^2+4\pi^2 f^2}$$

$$e^{j2\pi f_0 t} \overset{F}{\Leftrightarrow} \delta(f-f_0)$$

$$\cos(2\pi f_0 t) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{1}{2}\left[\delta(f-f_0)+\delta(f+f_0)\right]$$

$$\sin(2\pi f_0 t) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{j}{2}\left[\delta(f-f_0)-\delta(f+f_0)\right]$$

$$u(t) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{1}{2}\delta(f)+\frac{1}{j2\pi f}$$

$$\mathrm{sgn}\ t \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{1}{j\pi f}$$

$$\mathrm{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \overset{F}{\Leftrightarrow} |\tau|\mathrm{sinc}(\pi f \tau)$$

$$\mathrm{sinc}(2\pi B t) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{1}{|2B|}\mathrm{rect}(f/2B)$$

$$\Delta\left(\frac{t}{\tau}\right) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{\tau}{2}\mathrm{sinc}^2\left(\frac{\pi f \tau}{2}\right)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{1}{T}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta\left(f-\frac{n}{T}\right)$$

$$k_1 g_1(t)+k_2 g_2(t) \overset{F}{\Leftrightarrow} k_1 G_1(f)+k_2 G_2(f)$$

$$G(t) \overset{F}{\Leftrightarrow} g(-f)$$

$$g(at) \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{1}{|a|}G\left(\frac{f}{a}\right)$$

$$g(t-t_0) \overset{F}{\Leftrightarrow} G(f)e^{-j2\pi f t_0}$$

$$g(t)e^{j2\pi f_0 t} \overset{F}{\Leftrightarrow} G(f-f_0)$$

$$g_1(t)*g_2(t) \overset{F}{\Leftrightarrow} G_1(f)G_2(f)$$

$$g_1(t)g_2(t) \overset{F}{\Leftrightarrow} G_1(f)*G_2(f)$$

$$\frac{d^n g(t)}{dt^n} \overset{F}{\Leftrightarrow} (j2\pi f)^n G(f)$$

$$\int_{-\infty}^{t} g(x)dx \overset{F}{\Leftrightarrow} \frac{G(f)}{j2\pi f}+\frac{1}{2}G(0)\delta(f)$$

Transformada de Fourier Discreta (DFT)

$$G_k=\sum_{n=0}^{N-1} g_n e^{-j2\pi kn/N} \qquad g_n=T_a g(nT_a)=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{j2\pi kn/N}$$

UnB

departamento de engenharia elétrica

**Teoria das Comunicações**

Prof. André Noll Barreto