

1 - 3	4	5	Total

Nome: _____ Cartão: _____

Regras Gerais:

- Não é permitido o uso de calculadoras, telefones ou qualquer outro recurso computacional ou de comunicação.
- Trabalhe individualmente e sem uso de material de consulta além do fornecido.
- Devolva o caderno de questões preenchido ao final da prova.

Regras para as questões abertas:

- Seja sucinto, completo e claro.
- Justifique todo procedimento usado.
- Indique identidades matemáticas usadas, em especial, itens da tabela.
- Use notação matemática consistente.

Propriedades das transformadas de Fourier: considere a notação $F(w) = \mathcal{F}\{f(t)\}$.

1. Linearidade	$\mathcal{F}\{\alpha f(t) + \beta g(t)\} = \alpha \mathcal{F}\{f(t)\} + \beta \mathcal{F}\{g(t)\}$
2. Transformada da derivada	Se $\lim_{t \rightarrow \pm\infty} f(t) = 0$, então $\mathcal{F}\{f'(t)\} = iw \mathcal{F}\{f(t)\}$ Se $\lim_{t \rightarrow \pm\infty} f(t) = \lim_{t \rightarrow \pm\infty} f'(t) = 0$, então $\mathcal{F}\{f''(t)\} = -w^2 \mathcal{F}\{f(t)\}$
3. Deslocamento no eixo w	$\mathcal{F}\{e^{at} f(t)\} = F(w + ia)$
4. Deslocamento no eixo t	$\mathcal{F}\{f(t - a)\} = e^{-iaw} F(w)$
5. Transformada da integral	Se $F(0) = 0$, então $\mathcal{F}\left\{\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau\right\} = \frac{F(w)}{iw}$
6. Teorema da modulação	$\mathcal{F}\{f(t) \cos(w_0 t)\} = \frac{1}{2} F(w - w_0) + \frac{1}{2} F(w + w_0)$
7. Teorema da Convolução	$\mathcal{F}\{(f * g)(t)\} = F(w)G(w)$, onde $(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau$ $(F * G)(w) = 2\pi \mathcal{F}\{f(t)g(t)\}$
8. Conjugação	$\overline{F(w)} = F(-w)$
9. Inversão temporal	$\mathcal{F}\{f(-t)\} = F(-w)$
10. Simetria ou dualidade	$f(-w) = \frac{1}{2\pi} \mathcal{F}\{F(t)\}$
11. Mudança de escala	$\mathcal{F}\{f(at)\} = \frac{1}{ a } F\left(\frac{w}{a}\right)$, $a \neq 0$
12. Teorema da Parseval	$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) ^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) ^2 dw$
13. Teorema da Parseval para Série de Fourier	$\frac{1}{T} \int_0^T f(t) ^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n ^2$

Séries e transformadas de Fourier:

	Forma trigonométrica	Forma exponencial
Série de Fourier	$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(w_n t) + b_n \sin(w_n t)]$ <p>onde $w_n = \frac{2\pi n}{T}$, T é o período de $f(t)$</p> $a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt,$ $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(w_n t) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(w_n t) dt,$ $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(w_n t) dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(w_n t) dt$	$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{i w_n t},$ <p>onde $C_n = \frac{a_n - i b_n}{2}$</p>
Transformada de Fourier	$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (A(w) \cos(wt) + B(w) \sin(wt)) dw, \text{ para } f(t) \text{ real,}$ <p>onde $A(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(wt) dt$ e $B(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin(wt) dt$</p>	$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{i w t} dw,$ <p>onde $F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i w t} dt$</p>

Integrais definidas

1. $\int_0^\infty e^{-ax} \cos(mx) dx = \frac{a}{a^2 + m^2} \quad (a > 0)$	2. $\int_0^\infty e^{-ax} \sin(mx) dx = \frac{m}{a^2 + m^2} \quad (a > 0)$
3. $\int_0^\infty \frac{\cos(mx)}{a^2 + x^2} dx = \frac{\pi}{2a} e^{- m a} \quad (a > 0)$	4. $\int_0^\infty \frac{x \sin(mx)}{a^2 + x^2} dx = \begin{cases} \frac{\pi}{2} e^{- m a}, & m > 0 \\ 0, & m = 0 \\ -\frac{\pi}{2} e^{- m a}, & m < 0 \end{cases}$
5. $\int_0^\infty \frac{\sin(mx) \cos(nx)}{x} dx = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & n < m \\ \frac{\pi}{4}, & n = m, \\ 0, & n > m \end{cases} \quad (m > 0, n > 0)$	6. $\int_0^\infty \frac{\sin(mx)}{x} dx = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & m > 0 \\ 0, & m = 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & m < 0 \end{cases}$
7. $\int_0^\infty e^{-r^2 x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2r} \quad (r > 0)$	8. $\int_0^\infty e^{-a^2 x^2} \cos(mx) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} e^{-\frac{m^2}{4a^2}} \quad (a > 0)$
9. $\int_0^\infty x e^{-ax} \sin(mx) dx = \frac{2am}{(a^2 + m^2)^2} \quad (a > 0)$	10. $\int_0^\infty e^{-ax} \sin(mx) \cos(nx) dx = \frac{m(a^2 + m^2 - n^2)}{(a^2 + (m - n)^2)(a^2 + (m + n)^2)} \quad (a > 0)$
11. $\int_0^\infty x e^{-ax} \cos(mx) dx = \frac{a^2 - m^2}{(a^2 + m^2)^2} \quad (a > 0)$	12. $\int_0^\infty \frac{\cos(mx)}{x^4 + 4a^4} dx = \frac{\pi}{8a^3} e^{-ma} (\sin(ma) + \cos(ma))$
13. $\int_0^\infty \frac{\sin^2(mx)}{x^2} dx = m \frac{\pi}{2}$	14. $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$
15. $\int_0^\infty \frac{\sin^2(ax) \sin(mx)}{x} dx = \begin{cases} \frac{\pi}{4}, & (0 < m < 2a) \\ \frac{\pi}{8}, & (0 < 2a = m) \\ 0, & (0 < 2a < m) \end{cases}$	16. $\int_0^\infty \frac{\sin(mx) \sin(nx)}{x^2} dx = \begin{cases} \frac{\pi m}{2}, & (0 < m \leq n) \\ \frac{\pi n}{2}, & (0 < n \leq m) \end{cases}$
17. $\int_0^\infty x^2 e^{-ax} \sin(mx) dx = \frac{2m(3a^2 - m^2)}{(a^2 + m^2)^3} \quad (a > 0)$	18. $\int_0^\infty x^2 e^{-ax} \cos(mx) dx = \frac{2a(a^2 - 3m^2)}{(a^2 + m^2)^3} \quad (a > 0)$
19. $\int_0^\infty \frac{\cos(mx)}{(a^2 + x^2)^2} dx = \frac{\pi}{4a^3} (1 + ma) e^{-ma} \quad (a > 0, m \geq 0)$	20. $\int_0^\infty \frac{x \sin(mx)}{(a^2 + x^2)^2} dx = \frac{\pi m}{4a} e^{-ma} \quad (a > 0, m > 0)$
21. $\int_0^\infty \frac{x^2 \cos(mx)}{(a^2 + x^2)^2} dx = \frac{\pi}{4a} (1 - ma) e^{-ma} \quad (a > 0, m \geq 0)$	22. $\int_0^\infty x e^{-a^2 x^2} \sin(mx) dx = \frac{m\sqrt{\pi}}{4a^3} e^{-\frac{m^2}{4a^2}} \quad (a > 0)$

Frequências das notas musicais em hertz:

Nota \ Escala	2	3	4	5	6	7
Dó	65,41	130,8	261,6	523,3	1047	2093
Dó #	69,30	138,6	277,2	554,4	1109	2217
Ré	73,42	146,8	293,7	587,3	1175	2349
Ré #	77,78	155,6	311,1	622,3	1245	2489
Mi	82,41	164,8	329,6	659,3	1319	2637
Fá	87,31	174,6	349,2	698,5	1397	2794
Fá #	92,50	185,0	370,0	740,0	1480	2960
Sol	98,00	196,0	392,0	784,0	1568	3136
Sol #	103,8	207,7	415,3	830,6	1661	3322
Lá	110,0	220,0	440,0	880,0	1760	3520
Lá #	116,5	233,1	466,2	932,3	1865	3729
Si	123,5	246,9	493,9	987,8	1976	3951

Identidades Trigonômétricas:

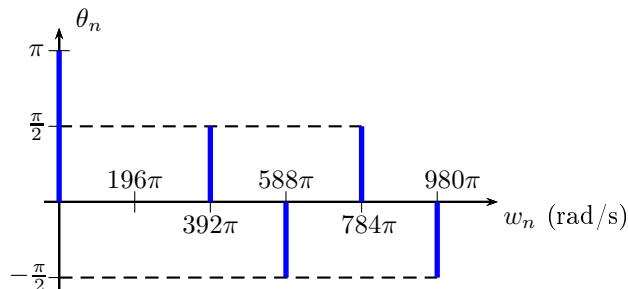
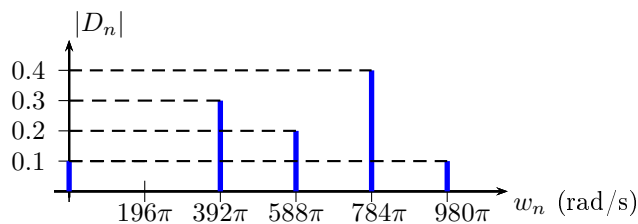
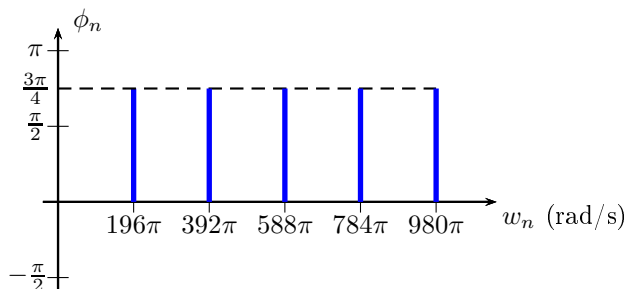
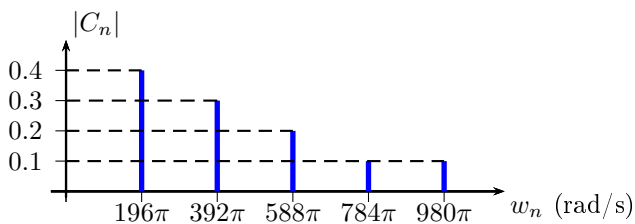
$\cos(x) \cos(y) = \frac{\cos(x+y) + \cos(x-y)}{2}$
$\sin(x) \sin(y) = \frac{\cos(x-y) - \cos(x+y)}{2}$
$\sin(x) \cos(y) = \frac{\sin(x+y) + \sin(x-y)}{2}$

Integrais:

$\int x e^{\lambda x} dx = \frac{e^{\lambda x}}{\lambda^2} (\lambda x - 1) + C$
$\int x^2 e^{\lambda x} dx = e^{\lambda x} \left(\frac{x^2}{\lambda} - \frac{2x}{\lambda^2} + \frac{2}{\lambda^3} \right) + C$
$\int x^n e^{\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda} x^n e^{\lambda x} - \frac{n}{\lambda} \int x^{n-1} e^{\lambda x} dx + C$
$\int x \cos(\lambda x) dx = \frac{\cos(\lambda x) + \lambda x \sin(\lambda x)}{\lambda^2} + C$
$\int x \sin(\lambda x) dx = \frac{\sin(\lambda x) - \lambda x \cos(\lambda x)}{\lambda^2} + C$
$\int x^2 \cos(\lambda x) dx = \frac{2\lambda x \cos(\lambda x) + (\lambda^2 x^2 - 2) \sin(\lambda x)}{\lambda^3} + C$
$\int x^2 \sin(\lambda x) dx = \frac{2\lambda x \sin(\lambda x) + (2 - \lambda^2 x^2) \cos(\lambda x)}{\lambda^3} + C$

• **Questão 1** (0.5 ponto por item) Sejam $f(t)$ e $g(t)$ duas funções periódicas cujas séries de Fourier são dadas por $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{i w_n t}$ e

$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n e^{i w_n t}$ onde w_1 é a fundamental. Seguem abaixo os diagramas de espectro de amplitudes e fase da duas séries de Fourier:



Quais são as notas musicais que representam os sinais $f(t)$ e $g(t)$, respectivamente?

- (x) Sol da escala 2 e Sol da escala 2
- () Sol da escala 3 e Sol da escala 2
- () Sol da escala 3 e Sol da escala 3
- () Sol da escala 4 e Sol da escala 3
- () Sol da escala 5 e Sol da escala 4

A(s) nota(s) representada(s) pelo sinal $f(3t) + g(2t)$ soam um:

- (x) Uma única nota - Sol da escala 2
- () Uma única nota - Sol da escala 3
- () Uma única nota - Ré da escala 4
- () Duas notas - Sol da escala 2 e Ré da escala 3.
- () Duas notas - Sol da escala 3 e Ré da escala 4.

Escrevendo $f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(w_n t) + b_n \sin(w_n t)$, temos:

- () $a_1 = \frac{2}{5}$ e $b_1 = 0$
- () $a_1 = \frac{\sqrt{2}}{5}$ e $b_1 = -\frac{\sqrt{2}}{5}$
- () $a_1 = -\frac{\sqrt{2}}{5}$ e $b_1 = \frac{\sqrt{2}}{5}$
- () $a_1 = \frac{2\sqrt{2}}{5}$ e $b_1 = -\frac{2\sqrt{2}}{5}$
- (x) $a_1 = -\frac{2\sqrt{2}}{5}$ e $b_1 = -\frac{2\sqrt{2}}{5}$

Período e coeficientes da série exponencial de $g(t)$ (T e D_n):

- (x) $T = \frac{1}{98}$, $D_1 = 0$ e $D_2 = \frac{3i}{10}$.
- () $T = \frac{1}{98}$, $D_1 = 0$ e $D_2 = -\frac{2i}{10}$.
- () $T = \frac{1}{98}$, $D_1 = \frac{3i}{10}$ e $D_2 = -\frac{2i}{10}$.
- () $T = \frac{1}{196\pi}$, $D_1 = 0$ e $D_2 = \frac{3i}{10}$.
- () $T = \frac{1}{196\pi}$, $D_1 = \frac{3i}{10}$ e $D_2 = -\frac{2i}{10}$.

Potência média do sinal $f(t)$ dada por $\frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt$

- () 0,11.
- () 0,31.
- (x) 0,62.
- () 1,1.
- () 2,2.

O valor médio do sinal $g(t)$ dado por $\frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt$

- () -0,2
- (x) -0,1
- () -0,05
- () 0,1
- () 0,2

• **Questão 2** (0.5 ponto por item) Sejam os números complexos $Z_1 = \frac{(1+i)^2}{i^{99}}$ e $Z_2 = \left(e^{i\pi/4} + e^{-i\pi/4}\right)^{10}$. Assinale as alternativas que indicam Z_1 e Z_2 :

☐ $Z_1 = 0$

☐ $Z_1 = 2$

☒ $Z_1 = -2$

☐ $Z_1 = 2i$

☐ $Z_1 = -2i$

☐ N.D.A.

☐ $Z_2 = -16i$

☐ $Z_2 = 16$

☐ $Z_2 = 32i$

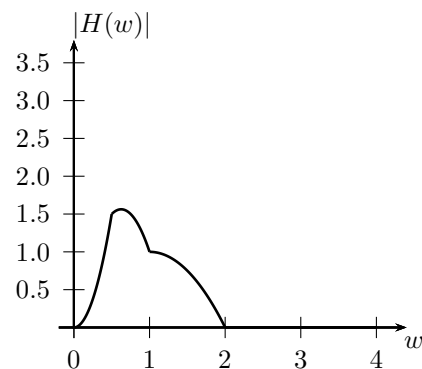
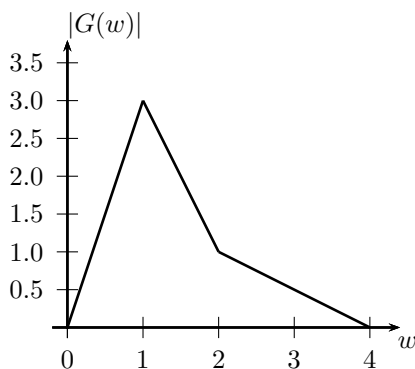
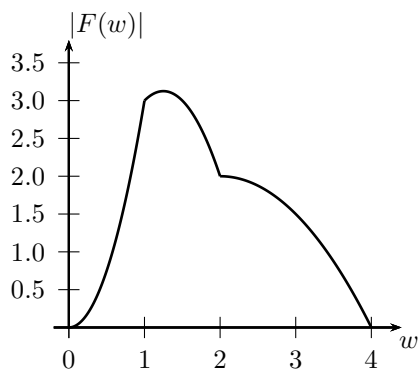
☒ $Z_2 = 32$

☐ N.D.A.

$$Z_1 = \frac{1+2i-1}{-i} = \frac{2i}{-i} = -2$$

$$Z_2 = (2 \cos(\pi/4))^{10} = 2^5 = 32.$$

• **Questão 3** (0.5 ponto por item) Considere três funções $f(t)$, $g(t)$ e $h(t)$ e suas respectivas transformadas de Fourier $F(w)$, $G(w)$ e $H(w)$. Abaixo estão apresentados os diagramas de espectro de magnitudes das três funções.



Assinale em cada coluna o item que é compatível com os gráficos.

☐ $h(t) = f(2t)$

☐ $h(t) = 2f\left(\frac{t}{2}\right)$

☐ $f(t) = 2h(2t)$

☒ $f(t) = 4h(2t)$

☐ $f(t) = 4h\left(\frac{t}{2}\right)$

☐ $h(t) = f'(t)$

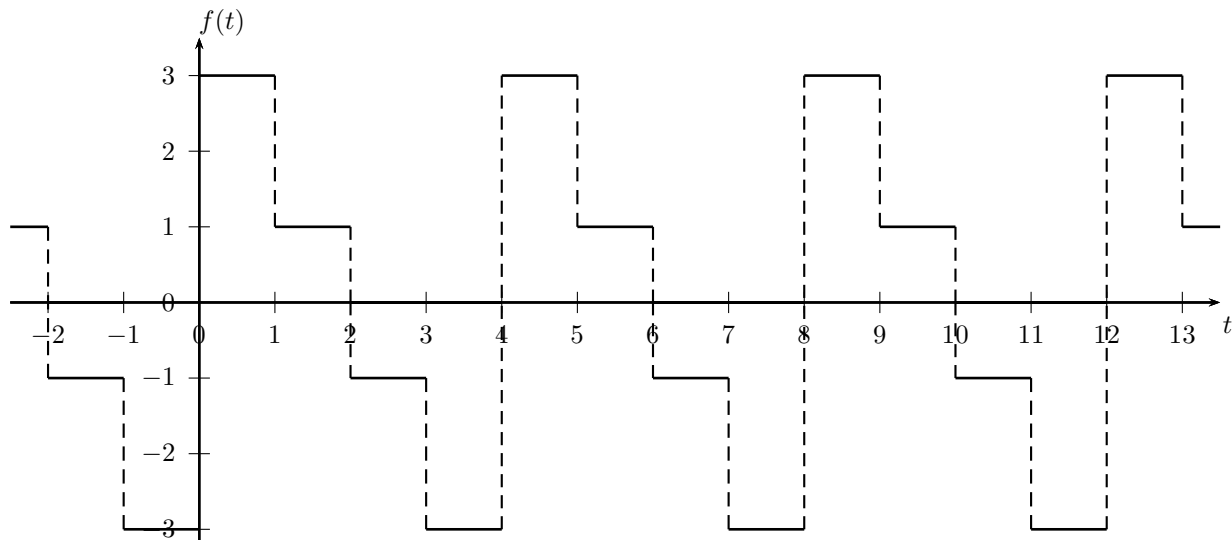
☐ $h(t) = g'(t)$

☐ $h(t) = g'(2t)$

☒ $f(t) = g'(t)$

☒ $f(t) = g'(t)$

• **Questão 4** (3.0 pontos) Considere a função periódica $f(t)$ dada no gráfico abaixo.



Considere a Série de Fourier da função $f(t)$ dada por

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(w_n t) + b_n \sin(w_n t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{i w_n t}.$$

- (0.5 ponto) Calcule o período fundamental e a frequência fundamental, w_1 e indique se a função é par, ímpar ou nenhum dos dois.
- (0.5 ponto) Calcule a potência média \bar{P}_f
- (1.0 ponto) Calcule os coeficientes a_n e b_n .
- (1.0 ponto) Calcule a potência média da série truncada de $f(t)$ dada por: $f_4(t) = \sum_{n=-4}^4 C_n e^{i w_n t}$.

Vemos do gráfico que o período fundamental é $T_f = 4$, logo a frequência fundamental é $f_f = \frac{1}{4}$ ou $w_f = \frac{\pi}{2}$. A função é ímpar. A potência média é mais facilmente obtida da definição:

$$\begin{aligned} \bar{P}_f &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2} \int_0^2 |f(t)|^2 dt \\ &= \frac{1}{2} [3^2 + 1^2] = \frac{10}{2} = 5. \end{aligned}$$

Aqui se usou que $|f(t)|$ é uma função par.

Como $f(t)$ é ímpar, temos que $a_n = 0$ para todo n .

Para calcular b_n para $n \geq 1$, vemos que:

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{T} \int_{-2}^2 f(t) \sin(w_n t) dt \\ &= \int_0^2 f(t) \sin(w_n t) dt \\ &= \int_0^1 \sin(w_n t) dt + \int_1^2 \sin(w_n t) dt \\ &= \frac{1}{w_n} \left[-3 \cos(w_n) \Big|_0^1 - \cos(w_n) \Big|_1^2 \right] \end{aligned}$$

Como $w_n = \frac{2\pi n}{4} = \frac{\pi n}{2}$, temos:

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{\pi n} \left[-3 \cos\left(\frac{n\pi t}{2}\right) \Big|_0^1 - \cos\left(\frac{n\pi t}{2}\right) \Big|_1^2 \right] \\ &= \frac{2}{\pi n} \left[-3 \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) + 3 - \cos(n\pi) + \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \\ &= \frac{2}{\pi n} \left[3 - (-1)^n - 2 \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \end{aligned}$$

Portanto:

$$b_1 = \frac{8}{\pi}, \quad b_2 = \frac{4}{\pi}, \quad b_3 = \frac{8}{3\pi}, \quad b_4 = 0.$$

Para calcular a potência média de $f_4(t)$, usamos:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{f_4} &= \sum_{n=-4}^n |C_n|^2 = |C_0|^2 + 2 [|C_1|^2 + |C_2|^2 + |C_3|^2 + |C_4|^2] \\ &= 2 \left[\left(\frac{4}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{4}{3\pi}\right)^2 \right] \\ &= \frac{2}{\pi^2} \left[16 + 4 + \frac{16}{9} \right] = \frac{392}{9\pi^2} \end{aligned}$$

- **Questão 5** (2.0 pontos) Considere a função $f(t)$ dada abaixo.

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \frac{6}{9 + t^2}$$

- a) (1.0 ponto) Calcule, a partir da definição, a transformada de Fourier da função $f(t)$.
b) (0.5 ponto) Usando as técnicas estudadas, calcule a transformada de Fourier de $g(t) = f'(t)$ e a escreva na forma $G(w) = |G(w)|e^{i\phi(w)}$.
c) (0.5 ponto) Calcule a energia total da função.

Solução:

$$\begin{aligned} F(w) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-iwt} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) [\cos(wt) - i \sin(wt)] dt \\ &= 2 \int_0^{\infty} f(t) \cos(wt) dt \\ &= \frac{12}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\cos(wt)}{9 + t^2} dt \end{aligned}$$

Da tabela de integrais, vemos que:

$$\int_0^{\infty} \frac{\cos(mx)}{a^2 + x^2} dx = \frac{\pi}{2a} e^{-|m|a}, \quad a > 0.$$

Substituímos $x \leftarrow t$, $a \leftarrow 3$ e $m \leftarrow w$, temos:

$$F(w) = 2e^{-3|w|}.$$

A energia pode ser calculada via Teorema de Parseval:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(w)|^2 dw \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} 4e^{-6|w|} dw \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-6w} dw \\ &= \frac{2}{3\pi} \end{aligned}$$

Agora temos:

$$G(w) = iwF(w).$$

Logo:

$$G(w) = |G(w)|e^{i\phi(w)}.$$

com:

$$|G(w)| = |w|e^{-3|w|}.$$

e

$$\phi(w) = \begin{cases} -\pi/2, & w < 0, \\ \pi/2, & w > 0. \end{cases}$$