

4 Resultados Numéricos

Neste capítulo, os resultados apresentados nos capítulos 2 e 3 são aplicados a situações particulares de interesse envolvendo a passagem, por uma não linearidade típica, de sinais OFDM com modulação QAM e três tipos de pulsos: retangular, Nyquist e pulso metade cosseno.

Em cada uma dessas situações foram determinadas as funções autocorrelação e as densidades espectrais de potência da envoltória complexa do sinal produzido na saída da não linearidade.

As curvas correspondentes às conversões AM/AM e AM/PM associadas à não linearidade considerada nos exemplos numéricos são apresentadas nas figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Nestas figuras estão também ilustradas as aproximações correspondentes à série polinomial em (2-98), considerando-se os quatro primeiros termos da série ($N = 3$). Os coeficientes complexos utilizados na representação em série polinomial são apresentados em (4-1)

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_1 = 1.3777548 - j 0.0108593 \\ \gamma_2 = -0.2257113 + j 0.0875749 \\ \gamma_3 = 0.0180834 - j 0.0171466 \\ \gamma_4 = -0.0004257 + j 0.0010350 \end{array} \right. \quad (4-1)$$

Os casos analisados incluem situações envolvendo a passagem, pelo dispositivo não-linear, de 1, 2 e 3 sinais OFDM, que são consideradas nas seções 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

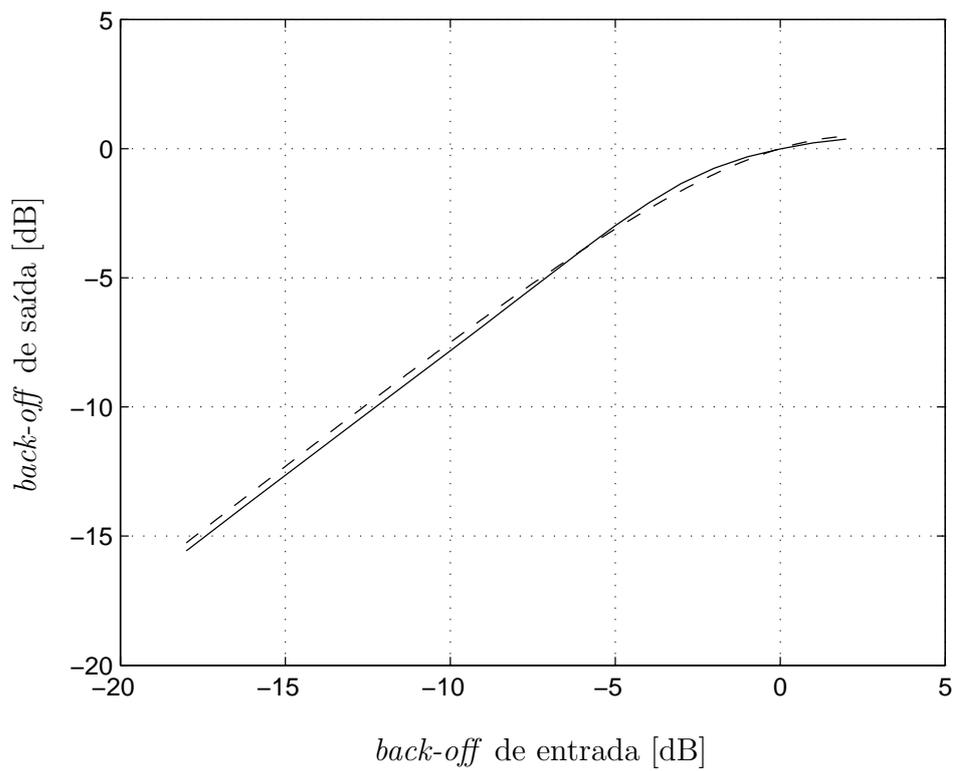


Figura 4.1: Conversão AM/AM: curva do fabricante (linha contínua) e aproximação polinomial com $N = 3$ (linha tracejada).

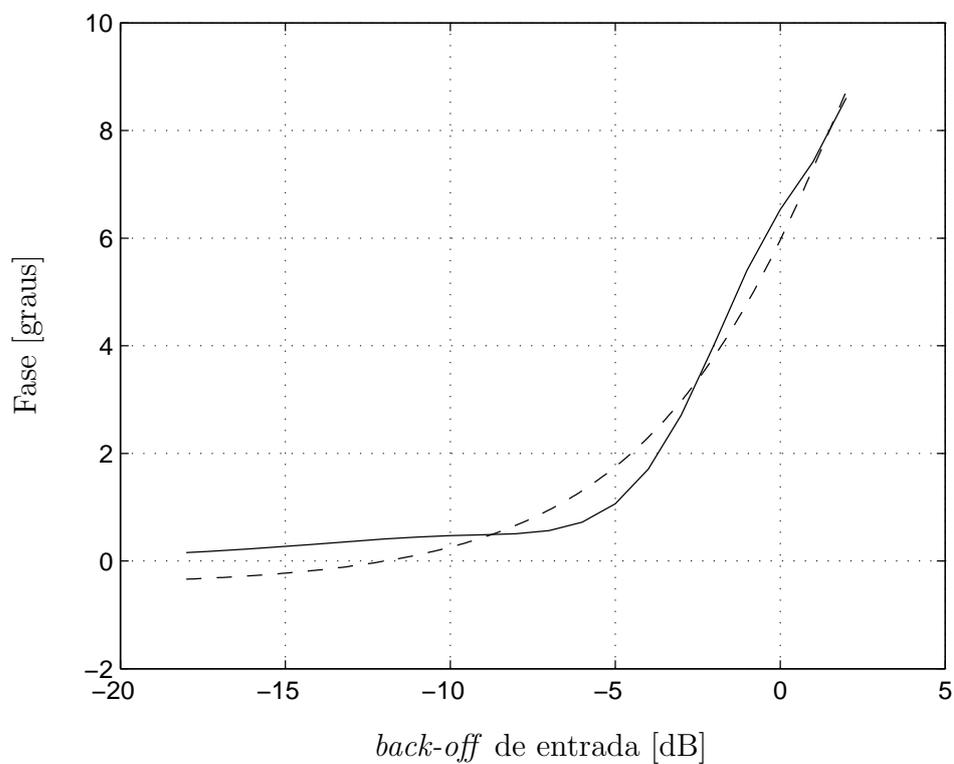


Figura 4.2: Conversão AM/PM: curva do fabricante (linha contínua) e aproximação polinomial com $N = 3$ (linha tracejada).

4.1 Pulsos

Nos resultados numéricos apresentados neste capítulo, foram analisadas situações específicas que consideraram diferentes tipos de pulso formatador para o sinal OFDM. Foram considerados o pulso retangular, o pulso de Nyquist e o pulso metade cosseno.

A definição destes pulsos é apresentada nas seções a seguir. As expressões apresentadas estão normalizadas para pulsos $p(t)$ de energia unitária, ou seja,

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(t)^2 dt = 1 \quad (4-2)$$

4.1.1 Pulso Retangular

O pulso retangular de energia unitária, é definido por

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T}}, & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (4-3)$$

Este pulso encontra-se ilustrado na Figura 4.3

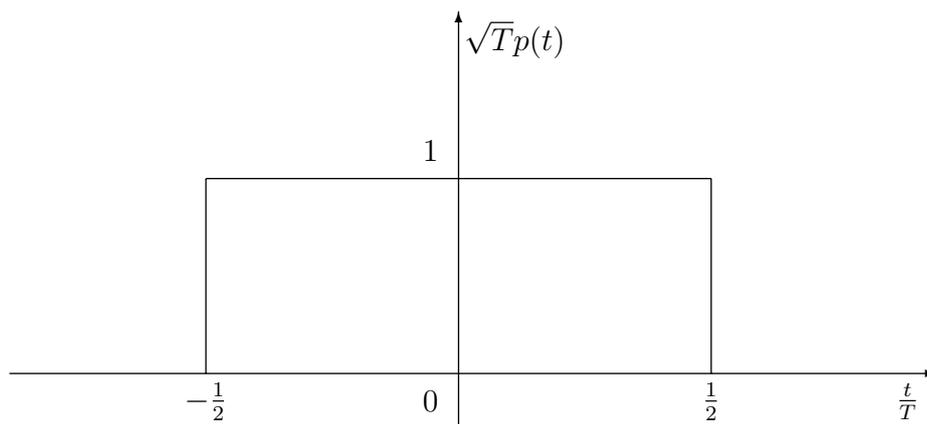


Figura 4.3: Pulso retangular normalizado

A transformada de Fourier do pulso em (4-3) é dada por

$$P(f) = \sqrt{T} \operatorname{sinc}(fT) \quad (4-4)$$

O módulo ao quadrado da transformada de Fourier deste pulso é ilustrado na Figura 4.4

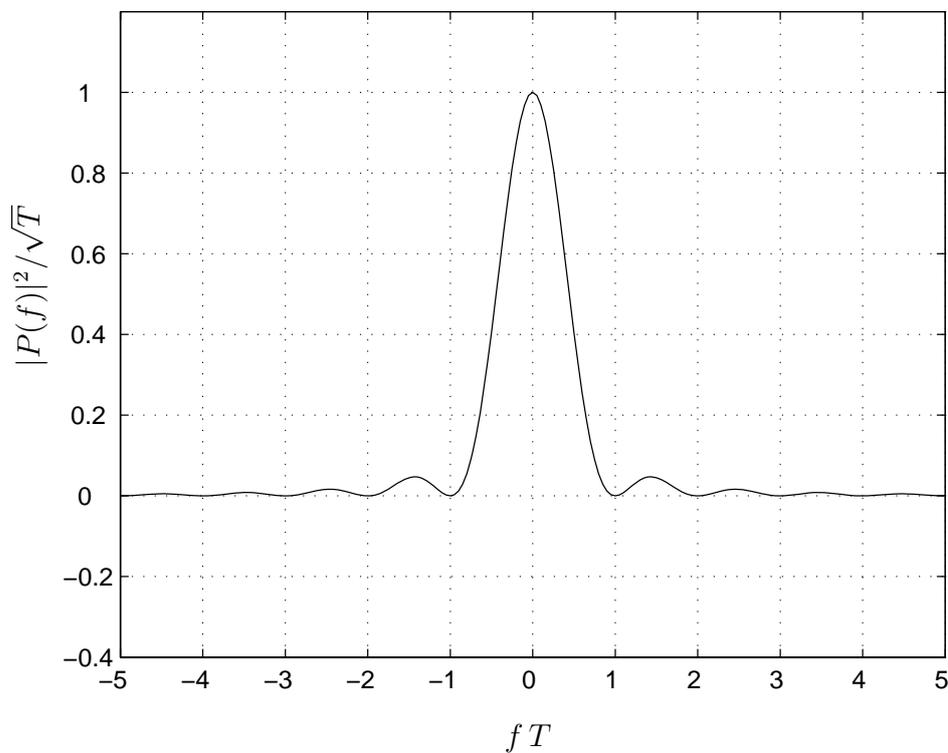


Figura 4.4: Módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso retangular

A função autocorrelação da envoltória complexa de $\tilde{m}_k(t)$, dada por (2-46), e a convolução de $p(\tau)$ com $p(-\tau)$ para o pulso retangular e 64 portadoras ($N = 64$) são ilustradas na Figura 4.5. A função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{m}(t)$ de um sinal OFDM, dada por (2-65), é ilustrada na Figura 4.6, para o caso de pulso formatador retangular e 64 portadoras ($N = 64$).

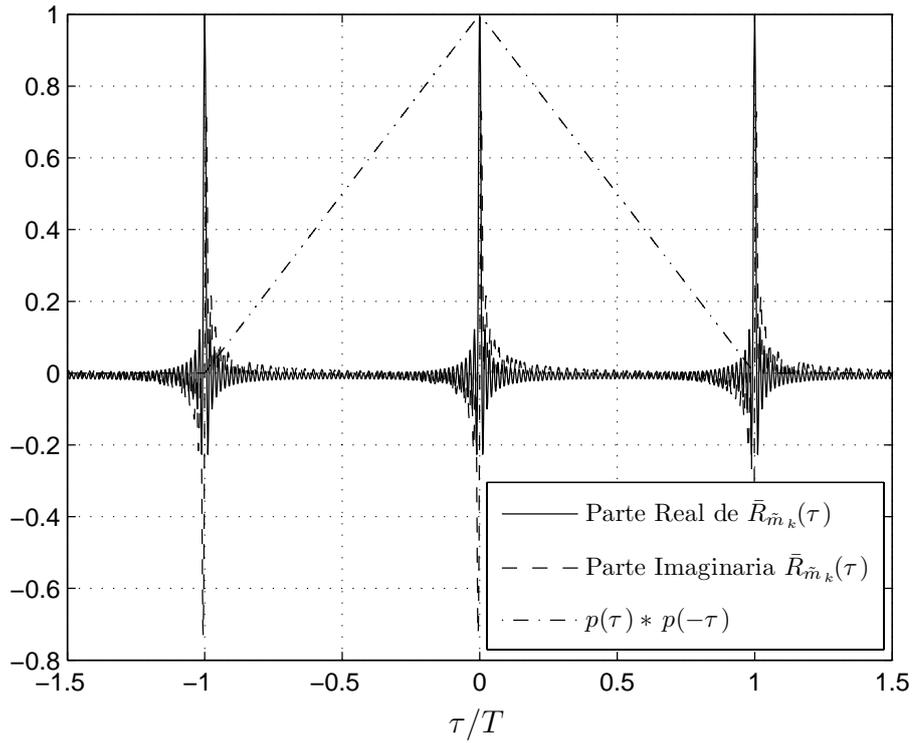


Figura 4.5: Função Autocorrelação de $\tilde{m}_k(t)$ e $p(\tau) * p(-\tau)$, para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras.

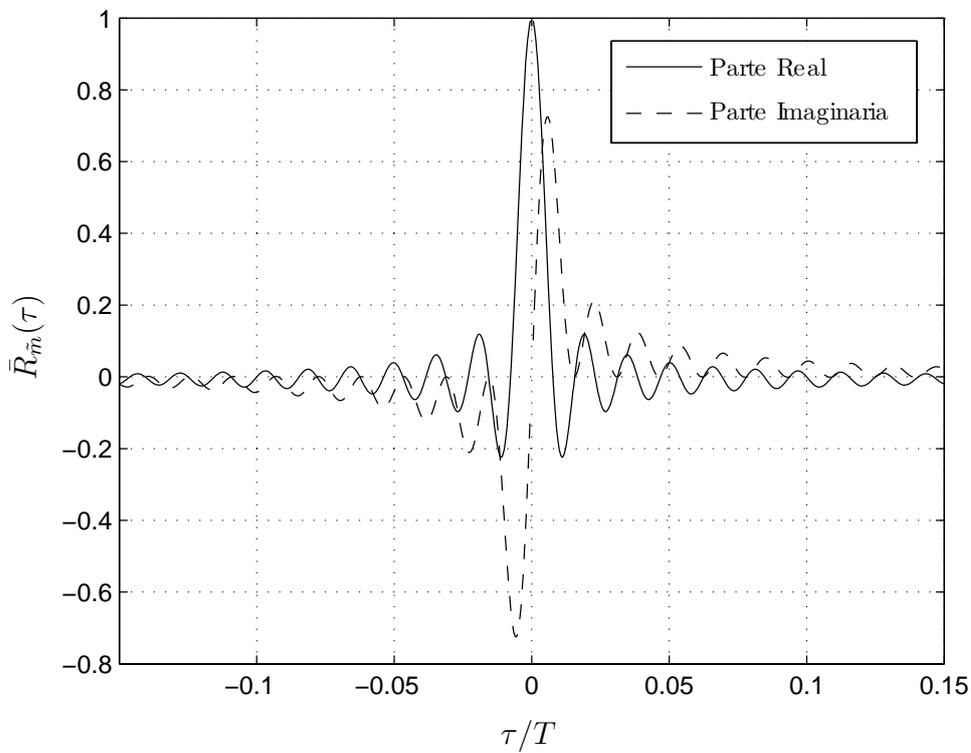


Figura 4.6: Função Autocorrelação de $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras

A densidade espectral de potência do sinal OFDM, dada por (2-94) é apresentada na Figura 4.7

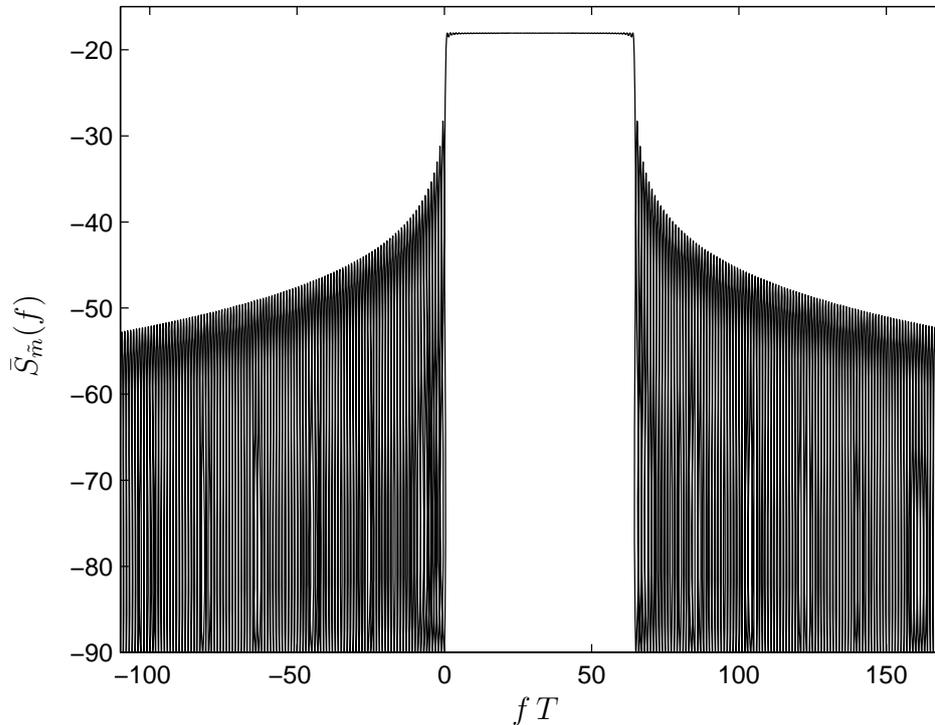


Figura 4.7: Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$ para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras.

4.1.2 Pulso Nyquist

O pulso de Nyquist de energia unitária, é definido por [14],

$$p(t) = \frac{2}{\sqrt{T(4-\alpha)}} \operatorname{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos(\alpha\pi t/T)}{1-(2\alpha t/T)^2} \quad (4-5)$$

onde o parâmetro α ($0 \leq \alpha \leq 1$) é chamado de fator de *roll-off*. Note que, quando $\alpha = 0$, $p(t)$ se reduz a uma função *sinc*. Este pulso encontra-se ilustrado na Figura 4.3 para $\alpha = 0, \frac{1}{2}$ e 1

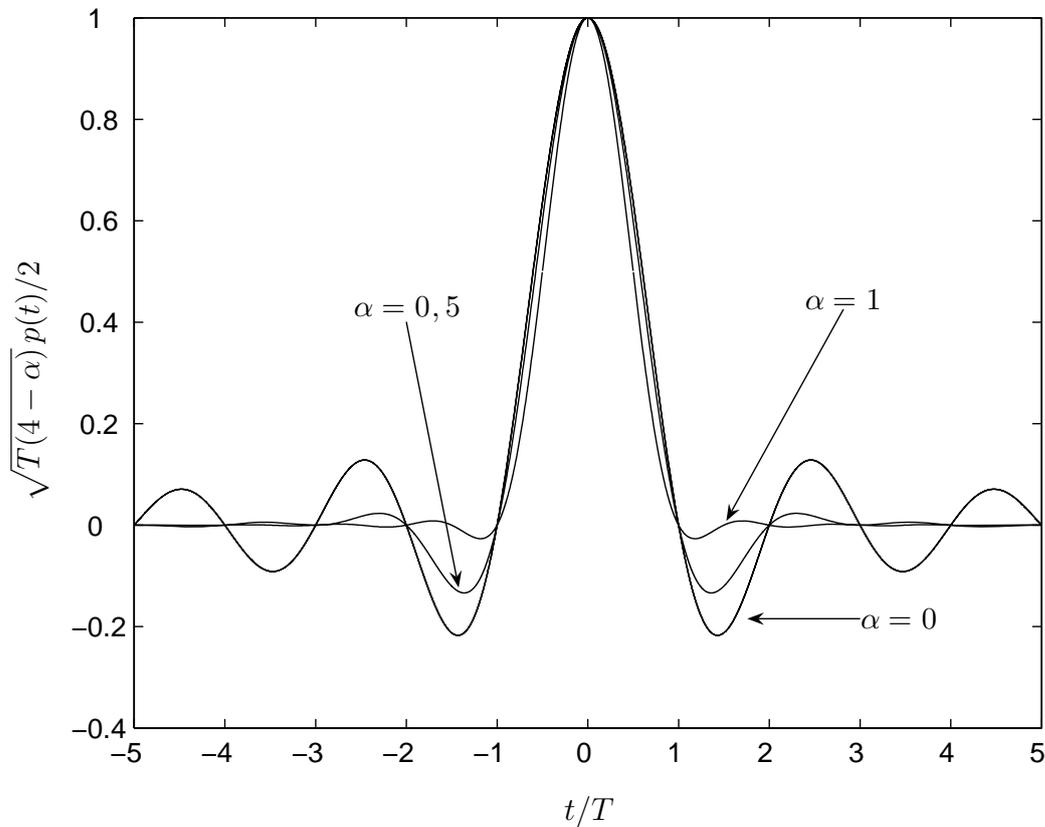


Figura 4.8: Pulso Nyquist normalizado

A transformada de Fourier do pulso em (4-5) é dada por

$$P(f) = \begin{cases} \frac{\sqrt{T(4-\alpha)}}{2}, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T}; \\ \frac{\sqrt{T(4-\alpha)}}{4} \left[1 - \text{sen} \left(\frac{\pi T}{\alpha} \left(f - \frac{1}{2T} \right) \right) \right], & \frac{1-\alpha}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T}; \\ 0, & |f| \geq \frac{1+\alpha}{2T}. \end{cases} \quad (4-6)$$

Note que $P(f)$ é limitado em frequência, sendo diferente de zero apenas para frequências tais que $|f| \leq \frac{1+\alpha}{2T}$. Observe que a faixa de frequências do pulso excede o valor $\frac{1}{T}$ para $\alpha \geq 0$.

A Figura 4.9 ilustra o módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso Nyquist.

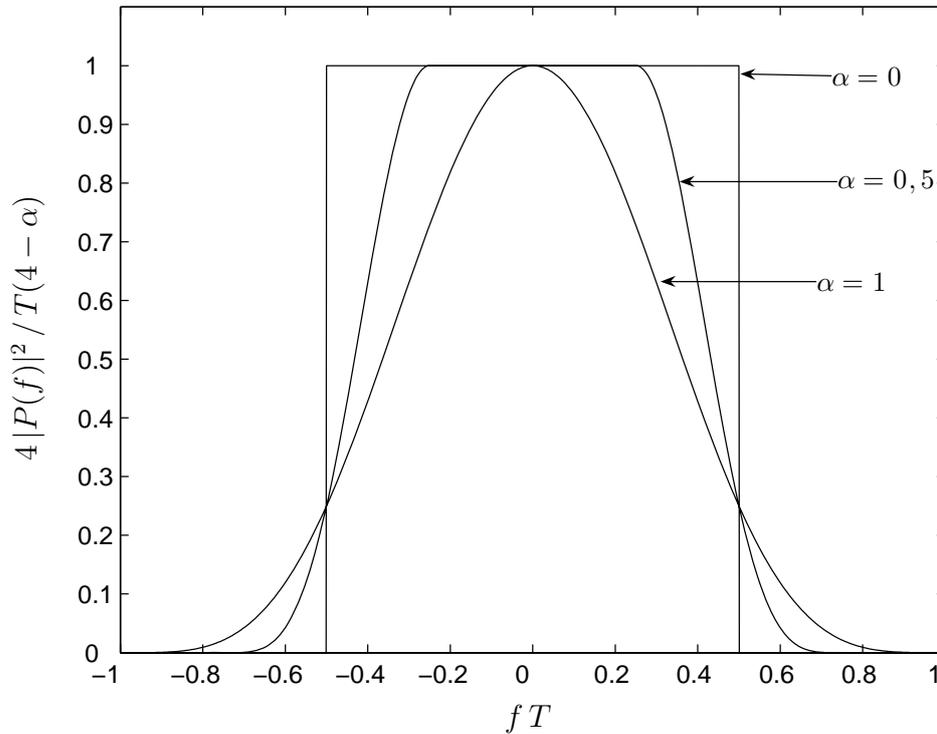


Figura 4.9: Módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso Nyquist

A função autocorrelação da envoltória complexa de $\tilde{m}_k(t)$, dada por (2-46), e a convolução de $p(\tau) * p(-\tau)$ com o pulso de Nyquist e 64 portadoras com fator de *roll-off* 0,4 ($\alpha = 0,4$) são ilustrados na Figura 4.10. A função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{m}(t)$ de um sinal OFDM, dada por (2-65), é ilustrada na Figura 4.11, para o caso de pulso formatador Nyquist com fator de *roll-off* 0,4 ($\alpha = 0,4$) e 64 portadoras.

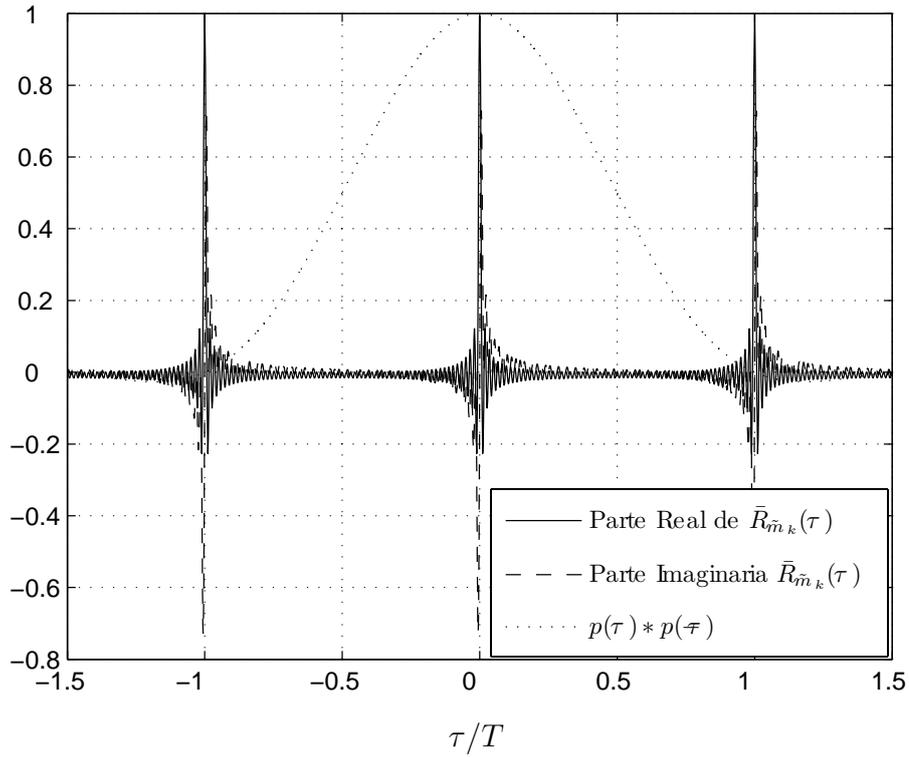


Figura 4.10: Função Autocorrelação de $\tilde{m}_k(t)$ e $p(\tau)*p(-\tau)$, para sinais OFDM com pulso Nyquist, ($\alpha = 0,4$) e 64 portadoras.

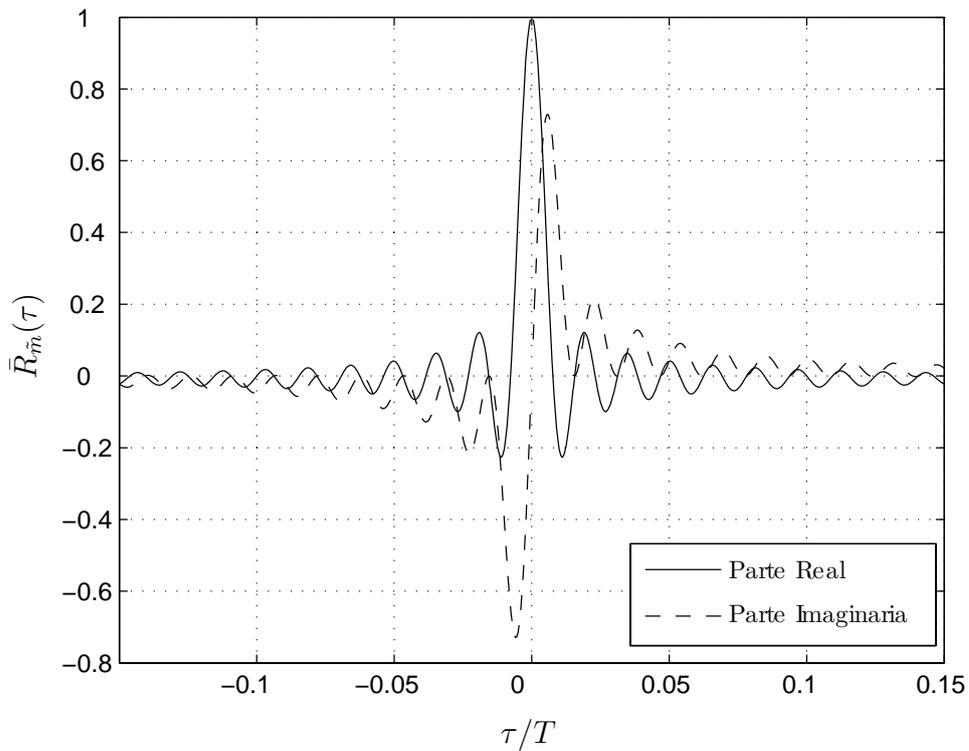


Figura 4.11: Função Autocorrelação de $\tilde{m}(t)$ para sinais OFDM com pulso Nyquist, ($\alpha = 0,4$) e 64 portadoras.

A densidade espectral de potência do sinal OFDM é apresentada na Figura 4.12

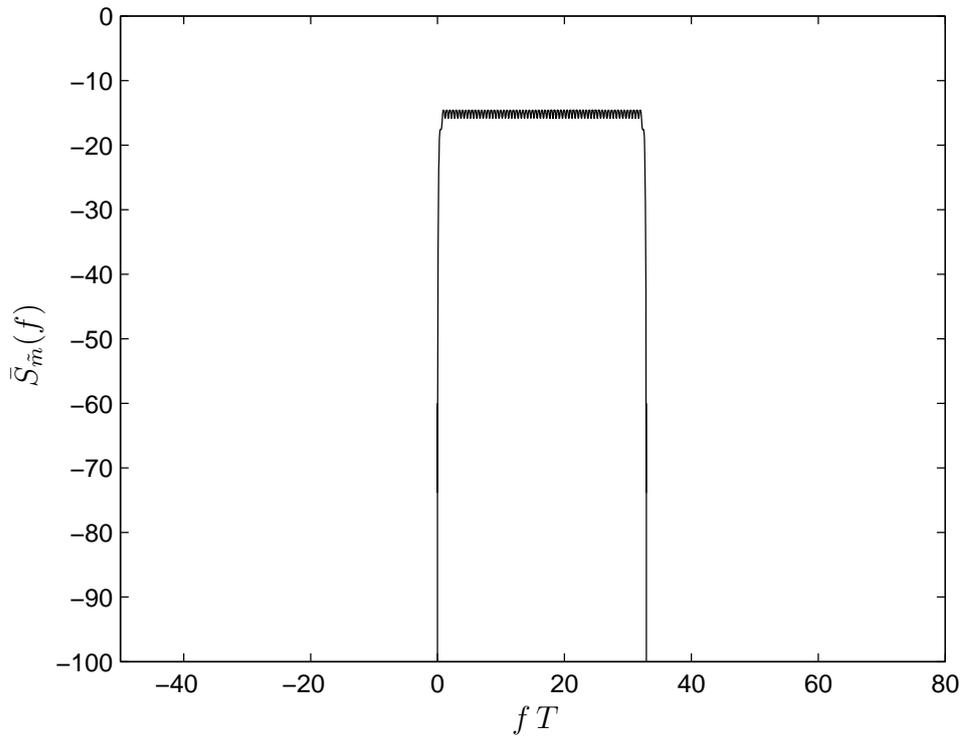


Figura 4.12: Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso Nyquist, ($\alpha = 0,4$) e 64 portadoras.

4.1.3

Pulso Metade Cosseno

O pulso metade cosseno (*half cosine*) de energia unitária, é definido por

$$p(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{T}} \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right), & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (4-7)$$

Este pulso encontra-se ilustrado na Figura 4.13.

A transformada de Fourier do pulso em (4-7) é dada por

$$P(f) = \sqrt{\frac{T}{2}} \frac{\cos(\pi fT)}{1 - (2fT)^2} \quad (4-8)$$

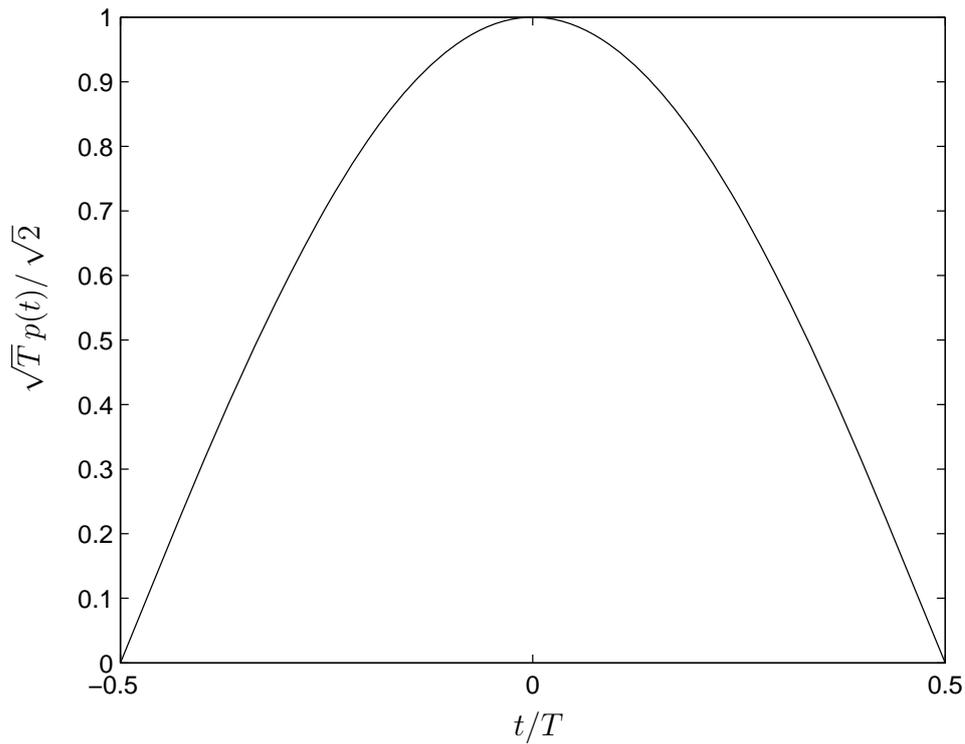


Figura 4.13: Pulso metade cosseno normalizado

A Figura 4.14 ilustra o módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso metade cosseno.

A função autocorrelação da envoltória complexa de $\tilde{m}_k(t)$, dada por (2-46), e a convolução de $p(\tau)$ com $p(-\tau)$ para o pulso metade cosseno com $N = 64$ portadoras são ilustrados na Figura 4.15. A função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{m}(t)$ de um sinal OFDM, dada por (2-65), é ilustrada na Figura 4.16, para o caso de pulso formatador metade cosseno e $N = 64$ portadoras.

A densidade espectral de potência deste sinal OFDM é apresentada na Figura (4.17)

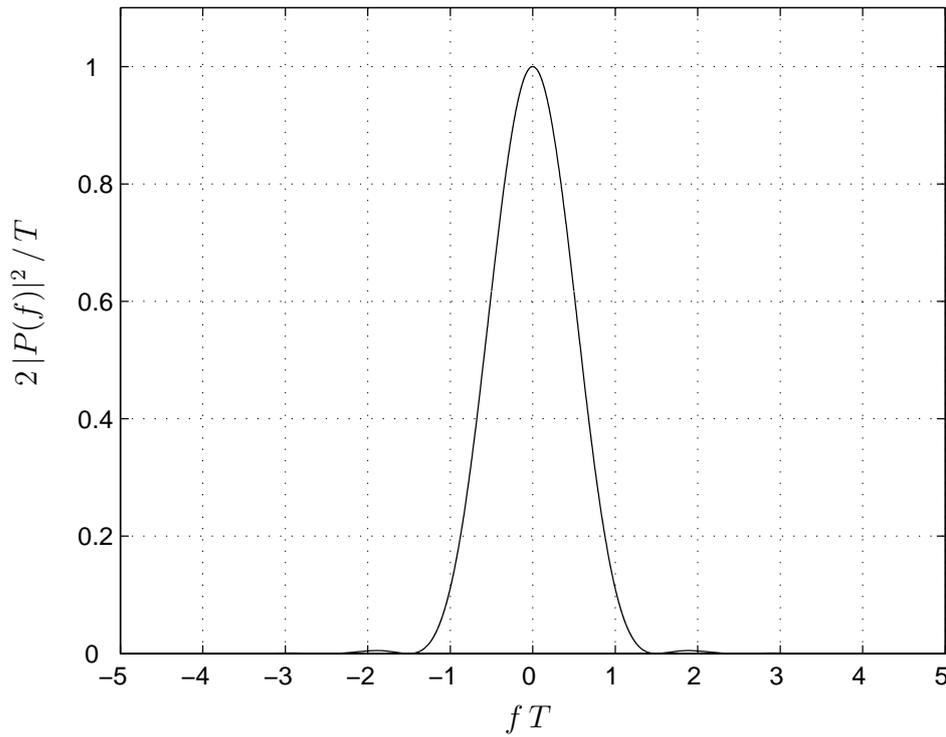


Figura 4.14: Módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso metade cosseno.

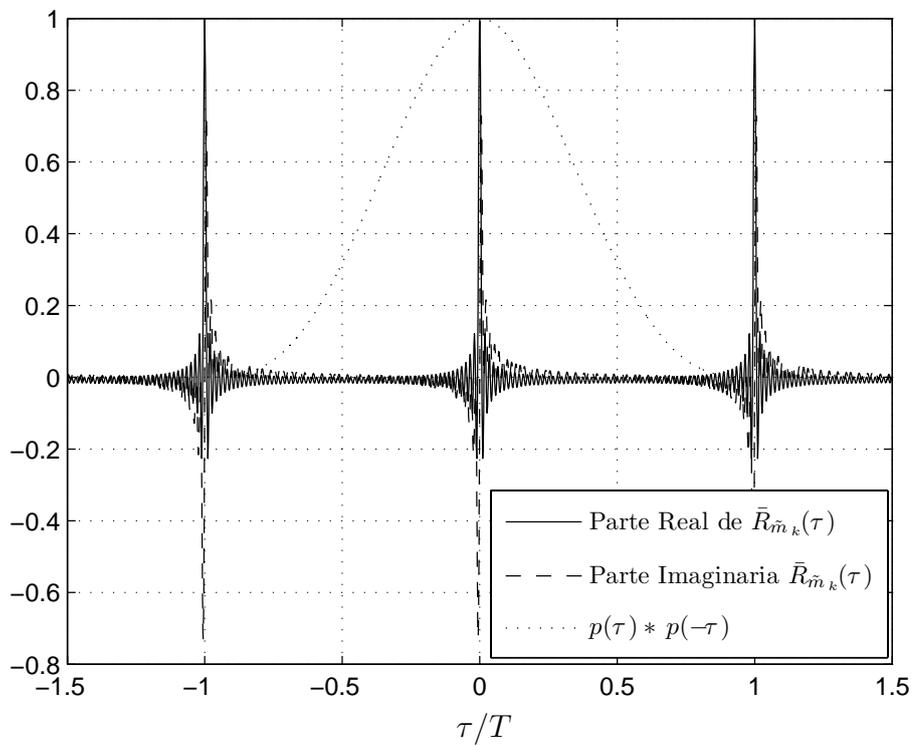


Figura 4.15: Função Autocorrelação de $\tilde{m}_k(t)$ e $p(\tau)*p(-\tau)$, para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.

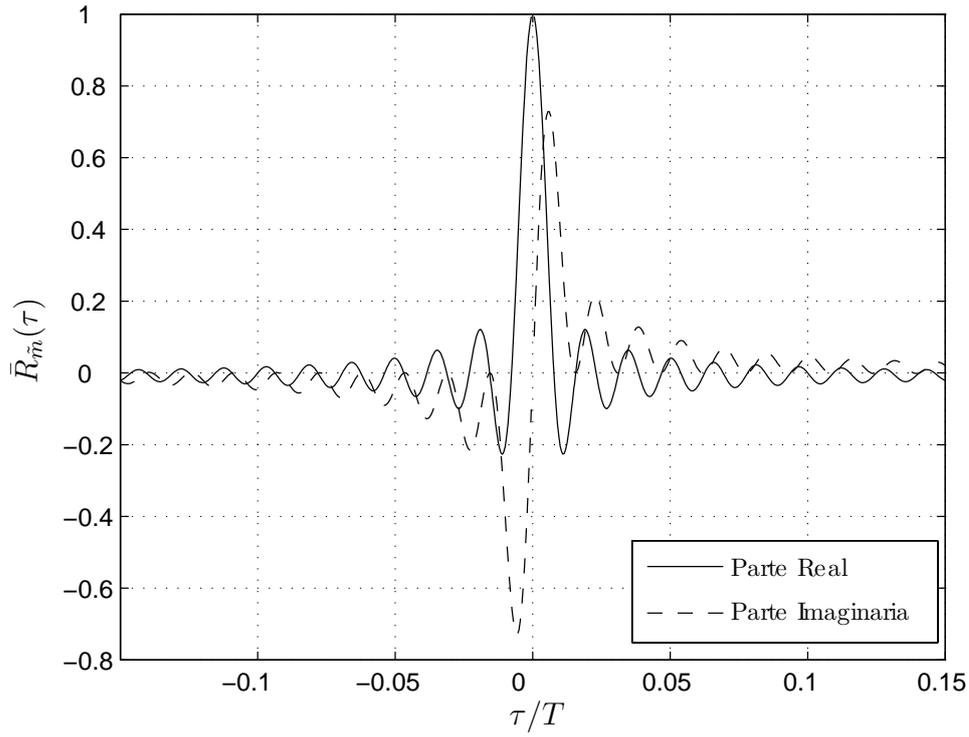


Figura 4.16: Função Autocorrelação de $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.

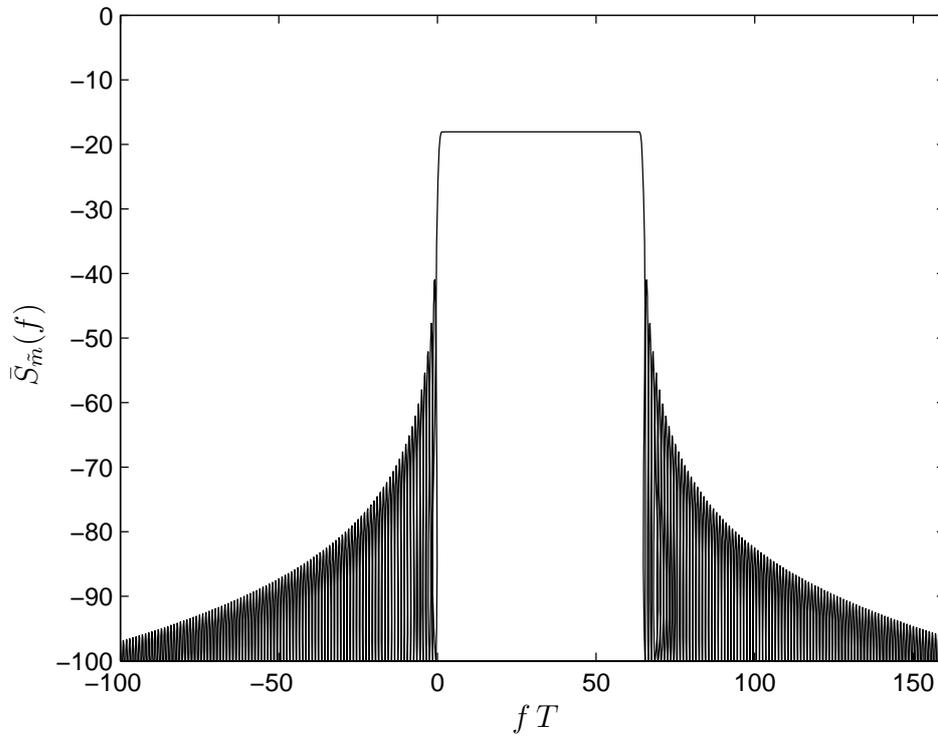


Figura 4.17: Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.

4.2

Efeito da não linearidade sobre um único sinal OFDM

Nesta seção são apresentados resultados correspondentes às distorções de espectro experimentadas por um único sinal OFDM ao ser transmitido através de um canal não-linear. A não linearidade do canal foi modelada utilizando-se a expansão em série em (2-98) com os coeficientes dados em (4-1).

Foi considerado um sinal OFDM com 64 portadoras ($N=64$). Os resultados obtidos contemplam casos específicos envolvendo cada um dos três pulsos definidos na Seção 4.1. Os resultados correspondentes a cada um destes casos são apresentados a seguir

Caso 1: Pulso Retangular

Para um sinal OFDM com pulso formatador retangular conforme a definição em (4-3), a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125). Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.18 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB)

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.19 para diversos valores de *back-off* de entrada.

Na Figura 4.20, são explicitadas para o caso de $b_{in} = 0$ dB as parcelas da densidade espectral de potência da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^ª, 5^ª e 7^ª ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^ª ordem). Note que os produtos de intermodulação de 3^ª ordem são praticamente os principais responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^ª e 7^ª estão, respectivamente 10 dB e 17 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^ª ordem.

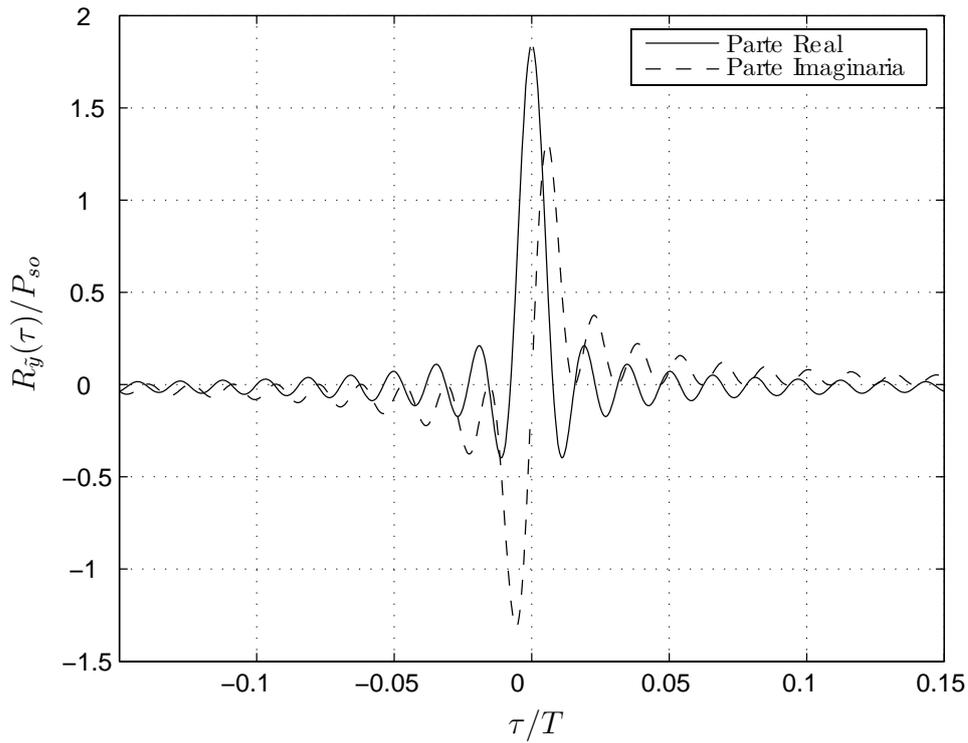


Figura 4.18: Função Autocorrelação de $\tilde{y}(t)$ para o pulso retangular e $b_{in} = 0$ dB

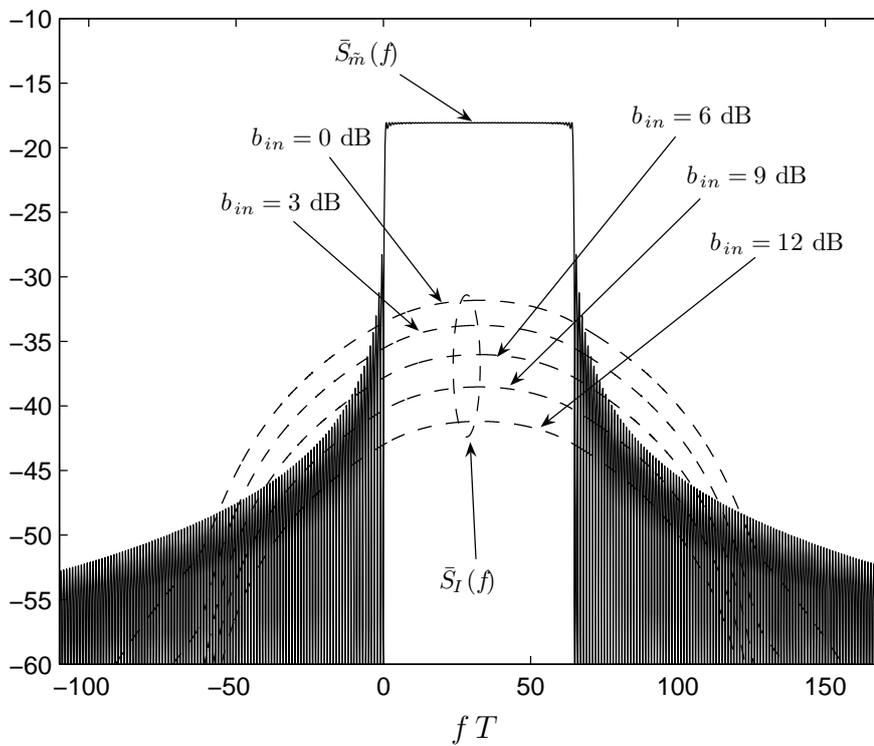


Figura 4.19: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

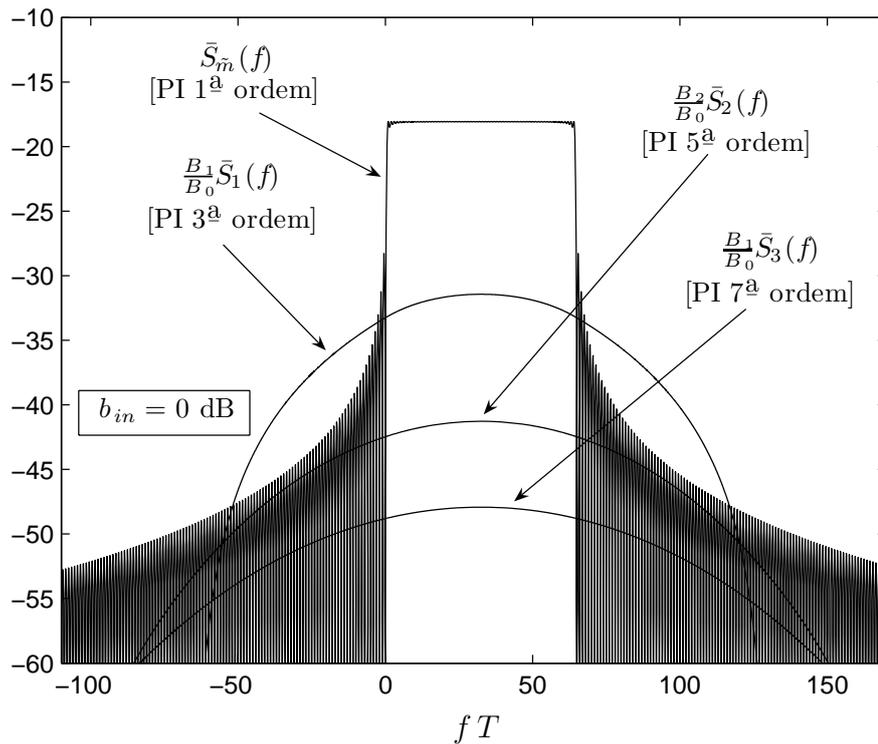


Figura 4.20: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

Caso 2: Pulso Nyquist

Para um sinal OFDM com pulso formatador Nyquist e fator de *roll-off* 0,4 ($\alpha = 0,4$) conforme a definição em (4-5), a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125). Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.21 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.22 para diversos valores de *back-off* de entrada.

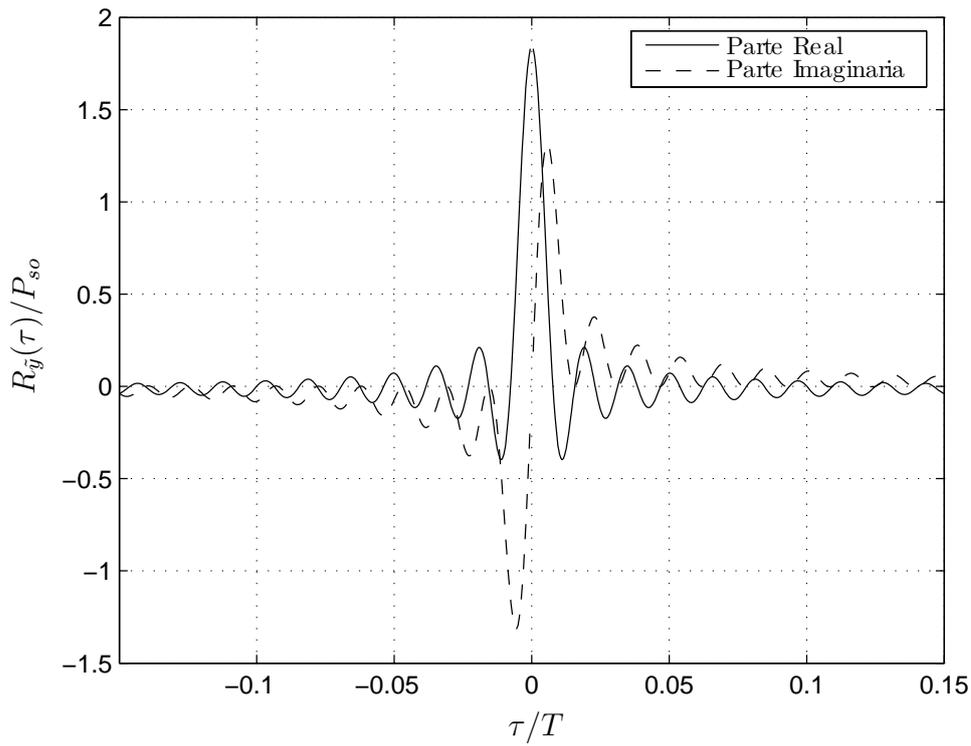


Figura 4.21: Função Autocorrelação de $\tilde{y}(t)$ para o pulso Nyquist com $\alpha = 0,4$ e $b_{in} = 0$ dB

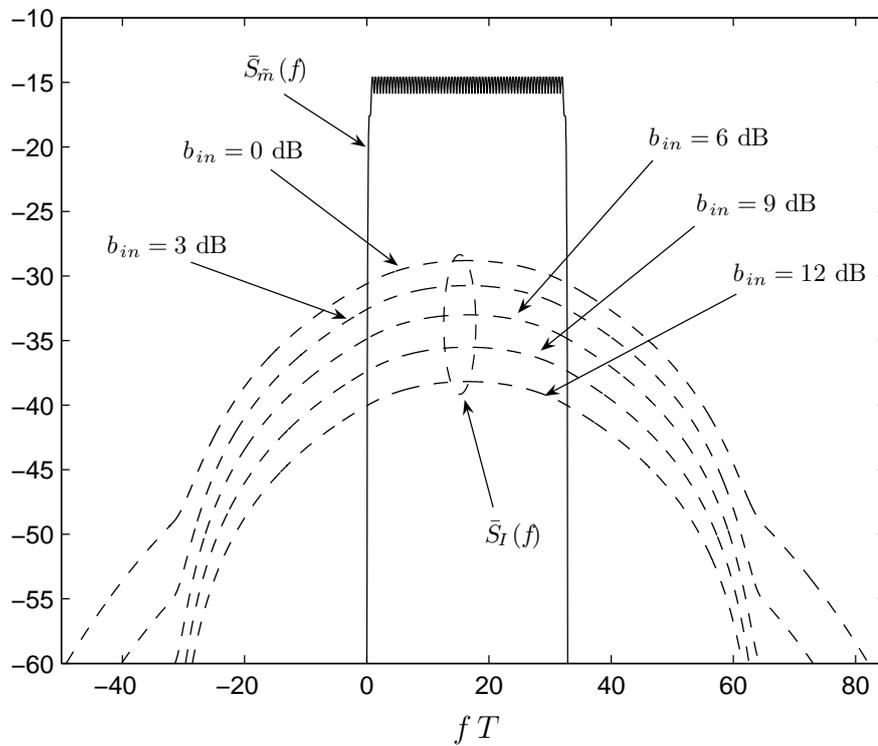


Figura 4.22: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

Na Figura 4.23, são explicitadas para o caso de $b_{in} = 0$ dB as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^a, 5^a e 7^a ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^a ordem). Também neste caso, os produtos de intermodulação de 3^a ordem são praticamente os principais responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^a e 7^a estão, respectivamente 11 dB e 18 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^a ordem.

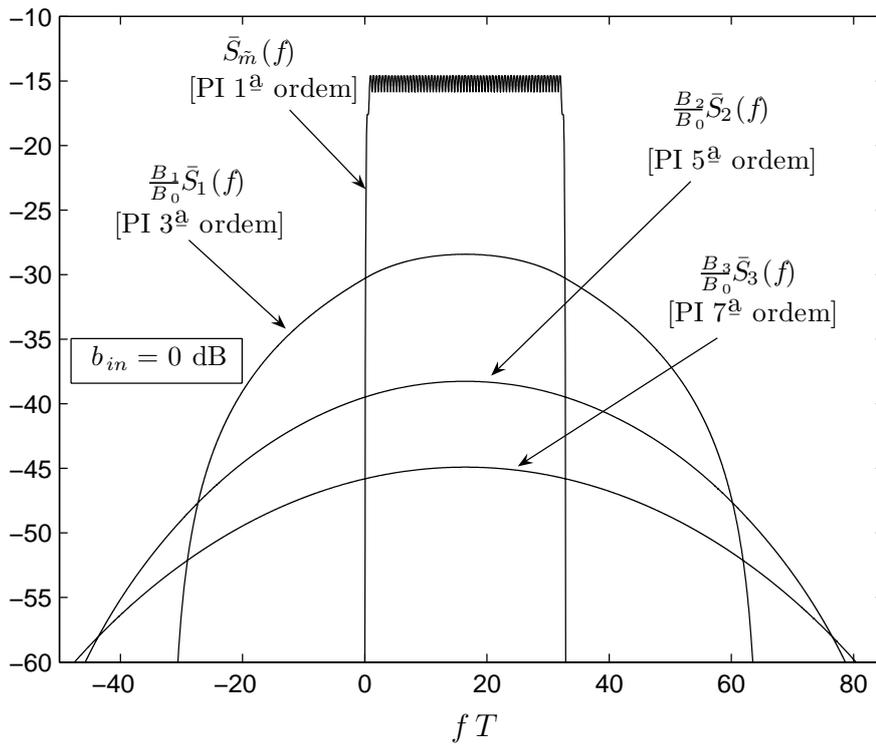


Figura 4.23: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

Caso 3: Pulso Metade Cosseno

Para um sinal OFDM com pulso formatador metade cosseno conforme a definição em (4-7), a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125). Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.24 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

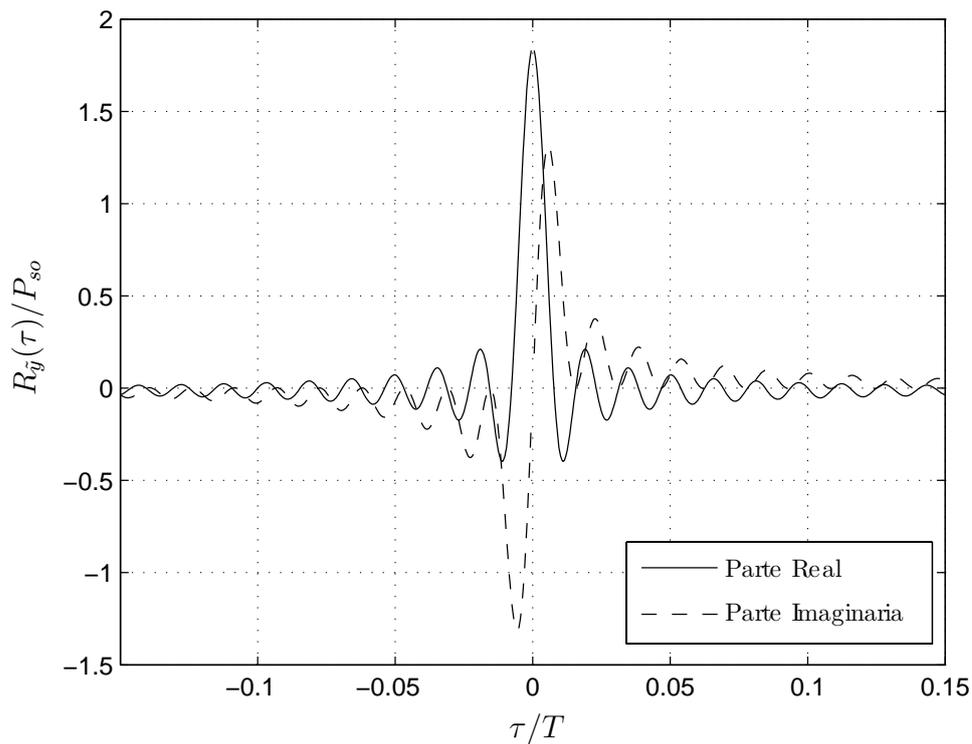


Figura 4.24: Função Autocorrelação de $\tilde{y}(t)$ para o pulso metade cosseno e $b_{in} = 0$ dB

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.25 para diversos valores de *back-off* de entrada.

Na Figura 4.26, são explicitadas para o caso de $b_{in} = 0$ dB as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^ª, 5^ª e 7^ª ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^ª ordem). Note que, novamente, os produtos de intermodulação de 3^ª ordem são praticamente os principais responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^ª e 7^ª estão, respectivamente 10 dB e 18 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^ª ordem.

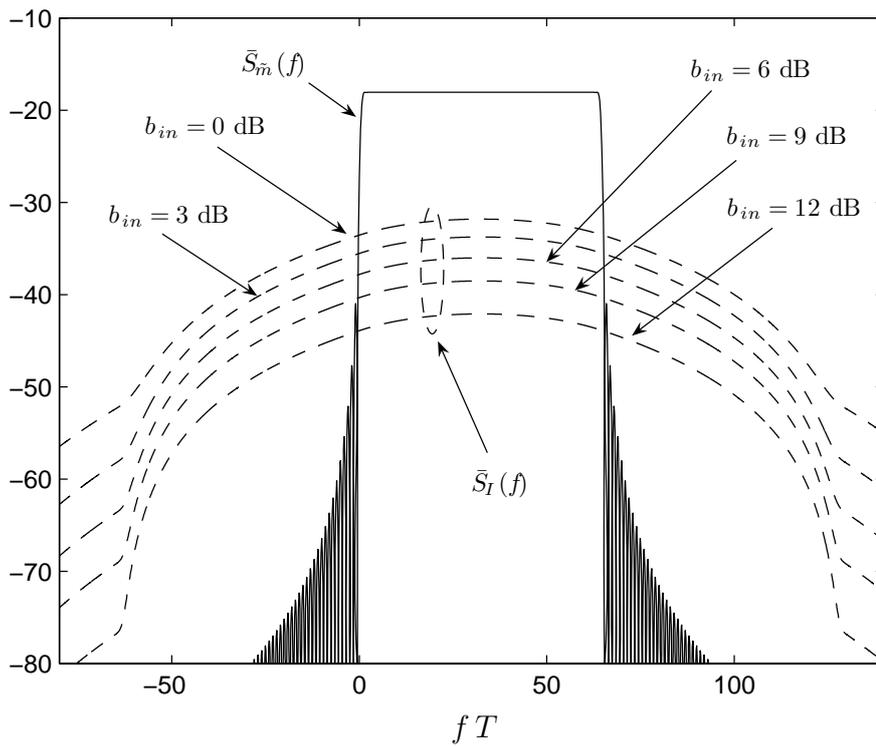


Figura 4.25: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

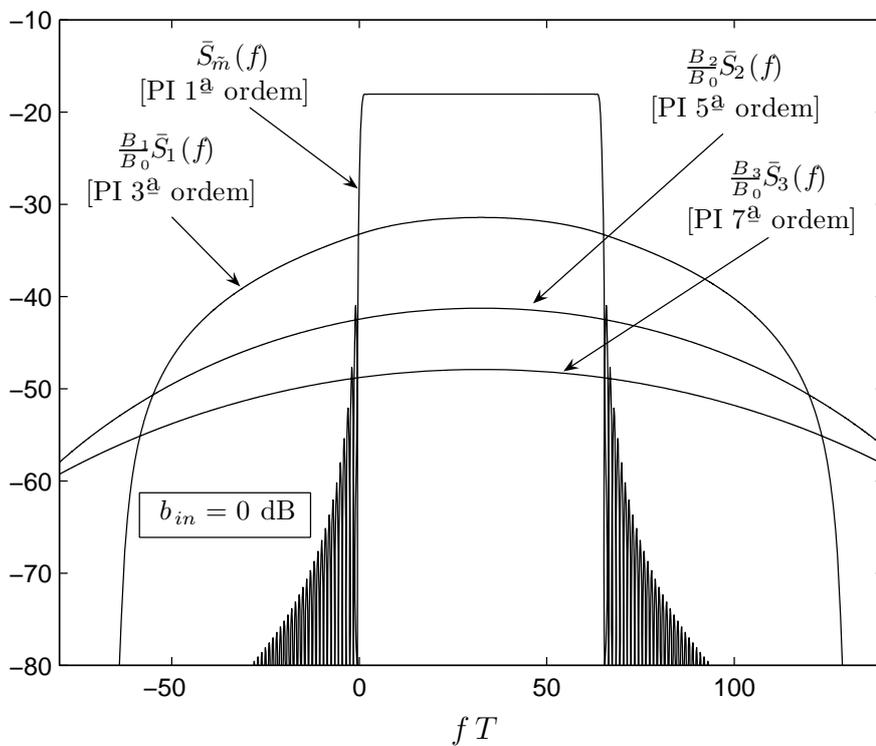


Figura 4.26: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

4.3

Efeito da não linearidade sobre dois sinais OFDM

Nesta seção são apresentados resultados correspondentes às distorções de espectro experimentadas por dois sinais OFDM que compartilham um canal não-linear. Como na Seção 4.2, a não linearidade do canal foi modelada utilizando-se a expansão em série em (2-98) com os coeficientes dados em (4-1).

A envoltória complexa $\tilde{r}(t)$ corresponde à soma de dois sinais OFDM estatisticamente independentes, sendo definida de acordo com (3-1). A Função Autocorrelação do sinal $\tilde{r}(t)$ é dada por (3-11) que, no caso de $M = 2$ se escreve

$$\bar{R}_{\tilde{r}}(\tau) = \frac{P_{\tilde{m}_0}}{P_{\tilde{m}_0} + P_{\tilde{m}_1}} \bar{R}_{\tilde{m}_0}(\tau) + \frac{P_{\tilde{m}_1}}{P_{\tilde{m}_0} + P_{\tilde{m}_1}} \bar{R}_{\tilde{m}_1}(\tau) e^{-j2\pi\Delta f_1\tau} \quad (4-9)$$

Considera-se que um dos sinais OFDM tem 64 portadoras e envoltória complexa com potência média $P_{\tilde{m}_0}$. O outro sinal possui 128 portadoras e uma envoltória complexa com potência média $P_{\tilde{m}_1} = 4P_{\tilde{m}_0}$. Lembrando que a duração do símbolo OFDM T , é a mesma para os dois sinais OFDM.

Foram examinados casos específicos que envolvem cada um dos três pulsos definidos na Seção 4.1. Convém observar que embora nos casos apresentados tenha sido considerado que os dois sinais OFDM têm o mesmo tipo de pulso formatador, os resultados analíticos obtidos nas seções anteriores podem ser aplicados a situações onde os sinais OFDM têm pulsos formatadores diferentes. Os resultados correspondentes a cada um dos pulsos são apresentados a seguir

Caso 1: Pulso Retangular

Para sinais OFDM com as características definidas no início desta seção e pulsos formatadores retangulares, a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125) com $\bar{R}_{\tilde{m}}(\tau)$ substituído por $\bar{R}_{\tilde{r}}(\tau)$. Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.27 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

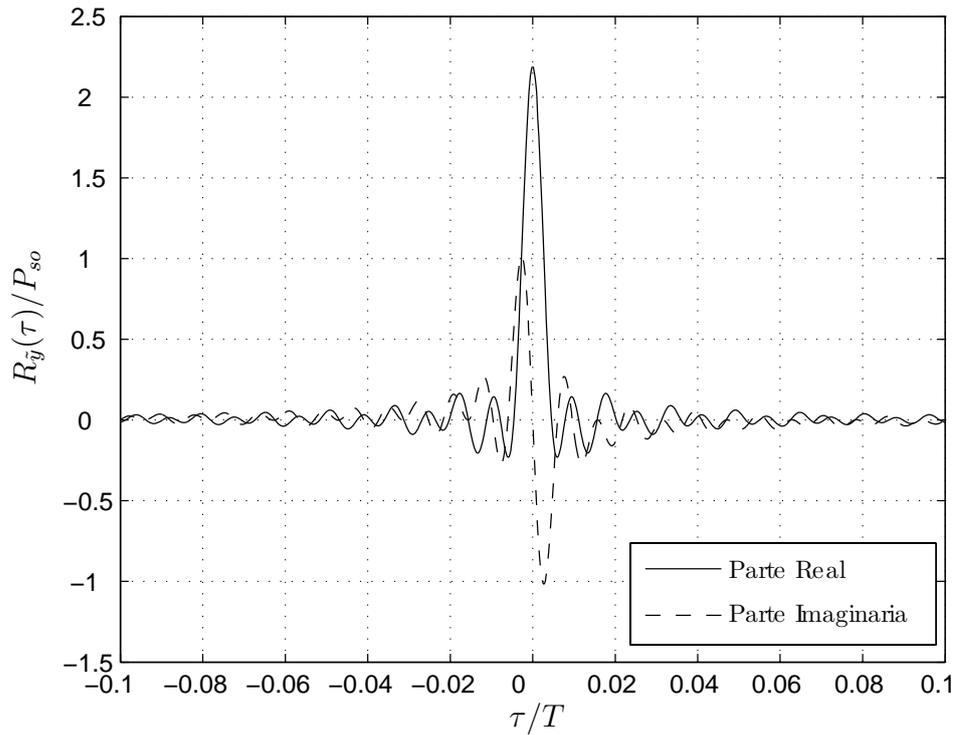


Figura 4.27: Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso retangular e $b_{in} = 0$ dB

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa de $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.28 para diversos valores de *back-off* de entrada.

Na Figura 4.29 são explicitadas, para o caso de $b_{in} = 0$ dB, as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^a, 5^a e 7^a ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^a ordem). Note que os produtos de intermodulação de 3^a ordem são praticamente os principais responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^a e 7^a estão, respectivamente 10 dB e 19 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^a ordem.

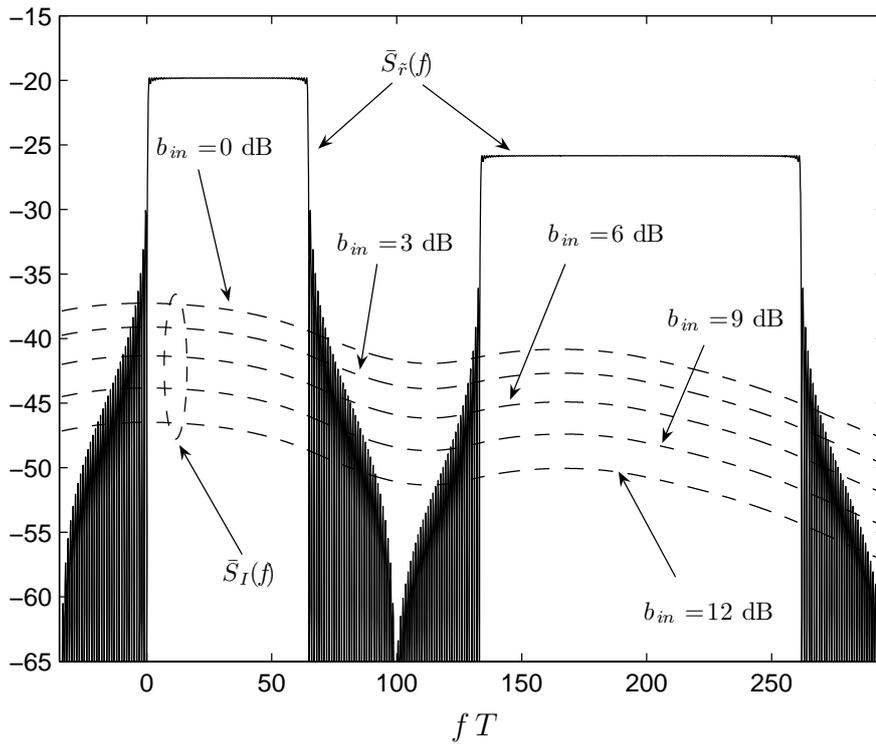


Figura 4.28: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

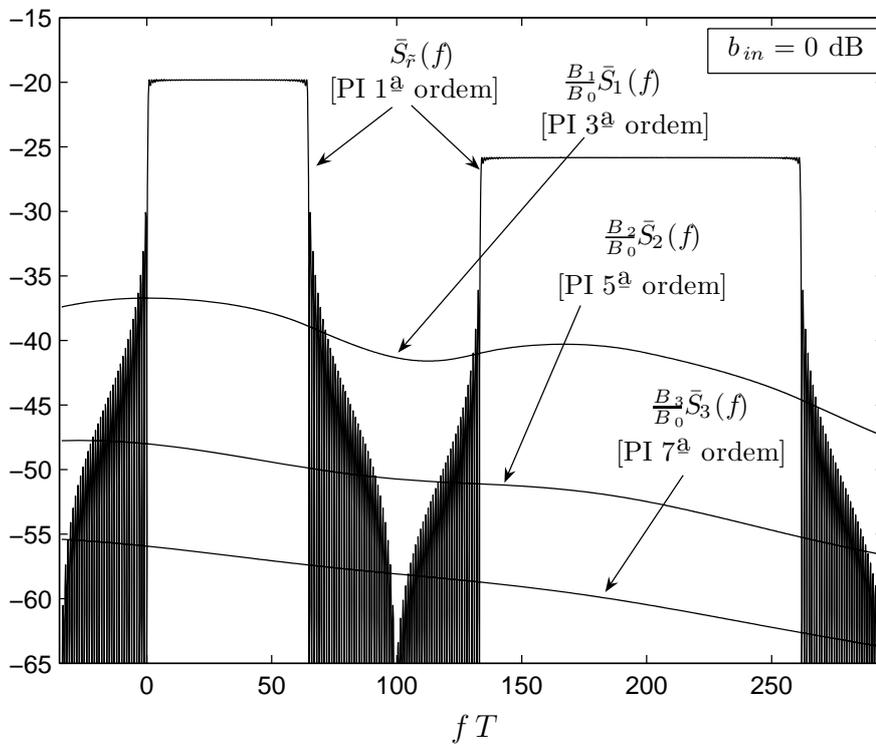


Figura 4.29: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

Caso 2: Pulso de Nyquist

Para um sinais OFDM com características descritas no início desta seção e pulsos formatadores Nyquist com fator de *roll-off* 0,4 ($\alpha = 0,4$), a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125) com $\bar{R}_{\tilde{m}}(\tau)$ substituído por $\bar{R}_{\tilde{r}}(\tau)$. Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.30 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

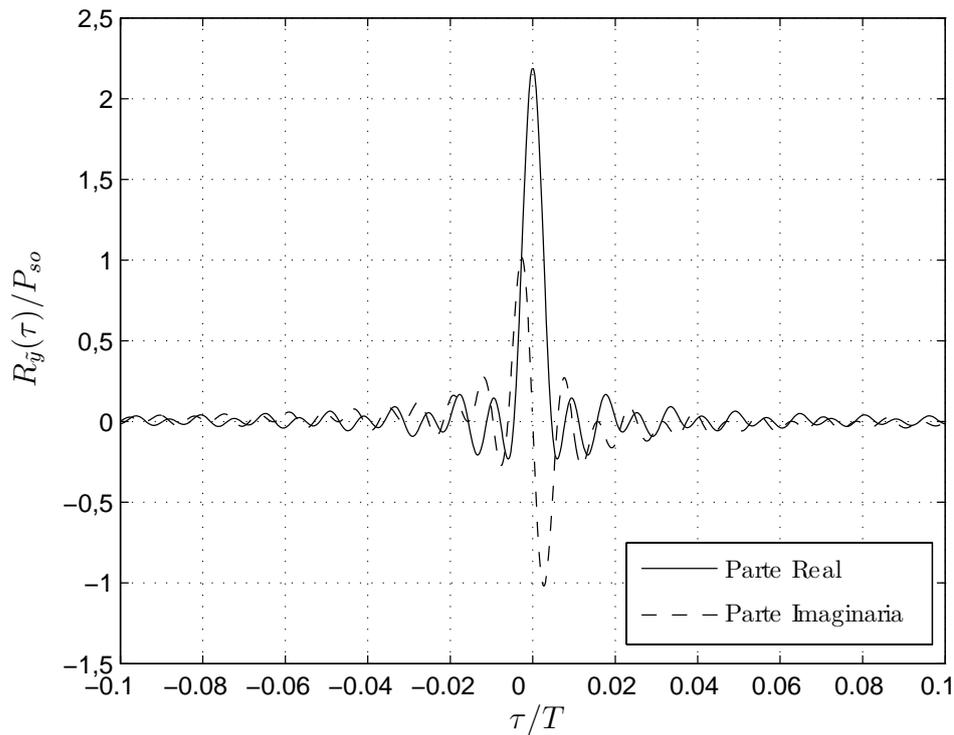


Figura 4.30: Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso Nyquist, $\alpha = 0,4$ e $b_{in} = 0$ dB

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada de $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.31 para diversos valores de *back-off* de entrada.

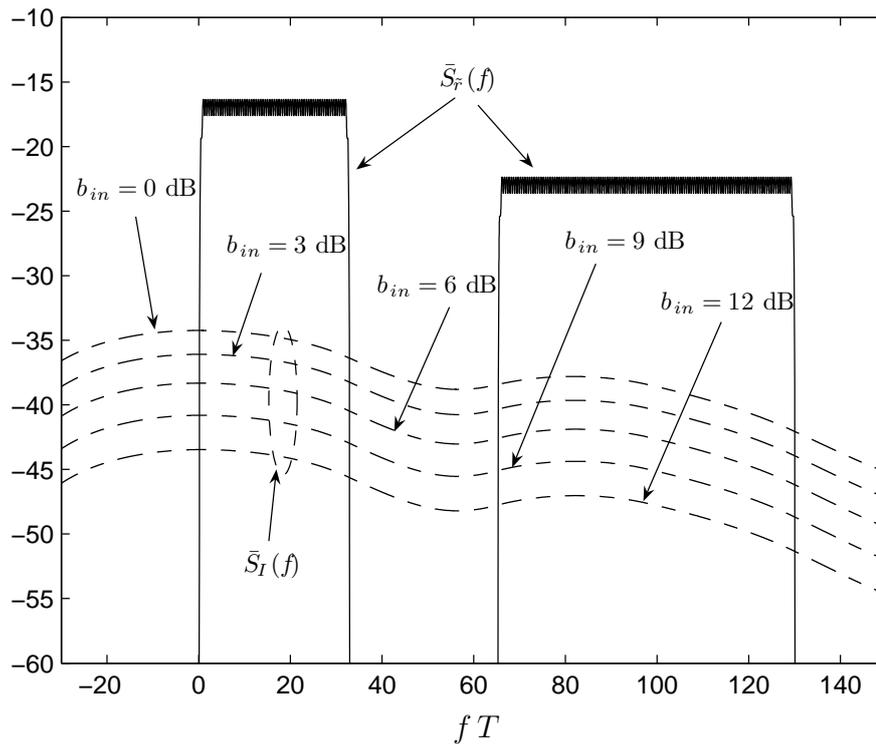


Figura 4.31: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

Na Figura 4.32 são explicitadas, para o caso de $b_{in} = 0$ dB, as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^ª, 5^ª e 7^ª ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^ª ordem). Também neste caso, os produtos de intermodulação de 3^ª ordem são praticamente os responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^ª e 7^ª estão, respectivamente 10 dB e 18 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^ª ordem.

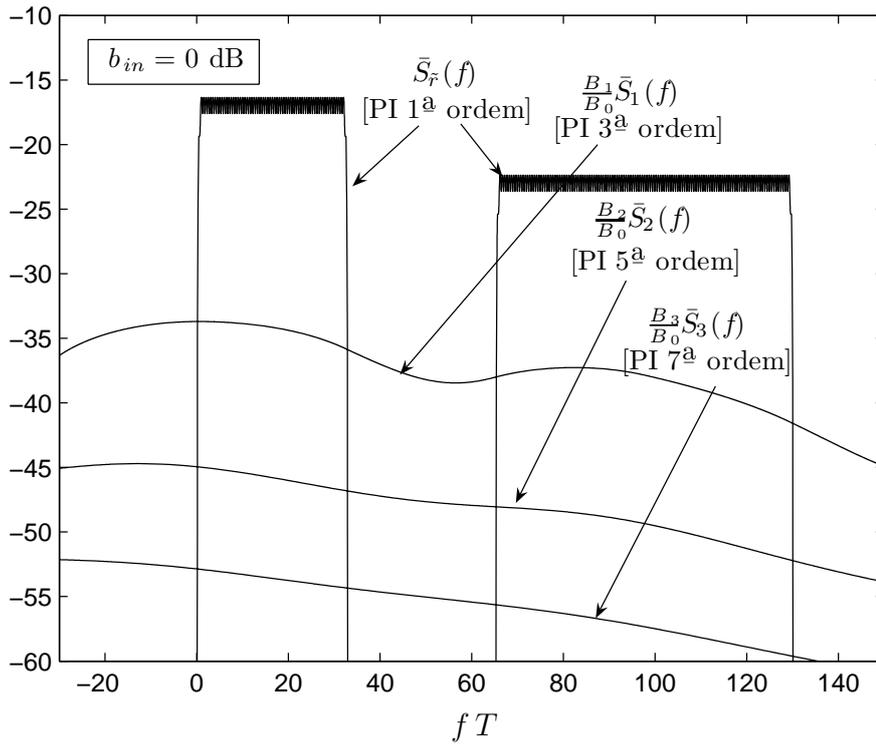


Figura 4.32: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

Caso 3: Pulso metade cosseno

Para sinais OFDM com características descritas no início desta seção com pulsos formatadores metade cossenos, a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125) com $\bar{R}_{\tilde{m}}(\tau)$ substituído por $\bar{R}_{\tilde{r}}(\tau)$. Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.33 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa de $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.34 para diversos valores de *back-off* de entrada.

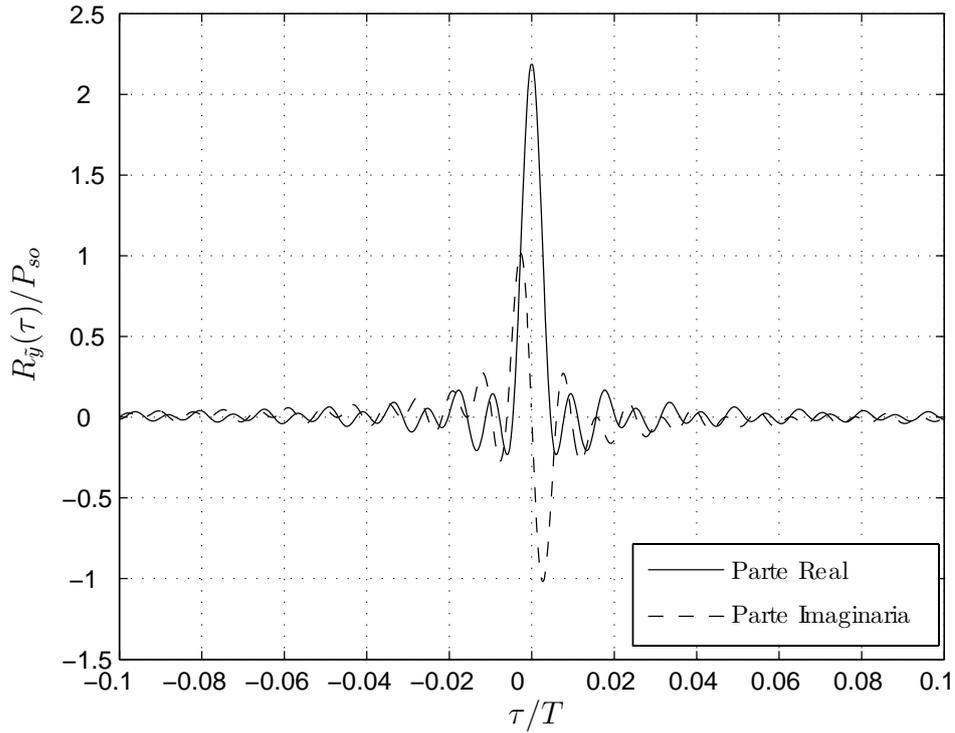


Figura 4.33: Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso metade cosseno e $b_{in} = 0$ dB

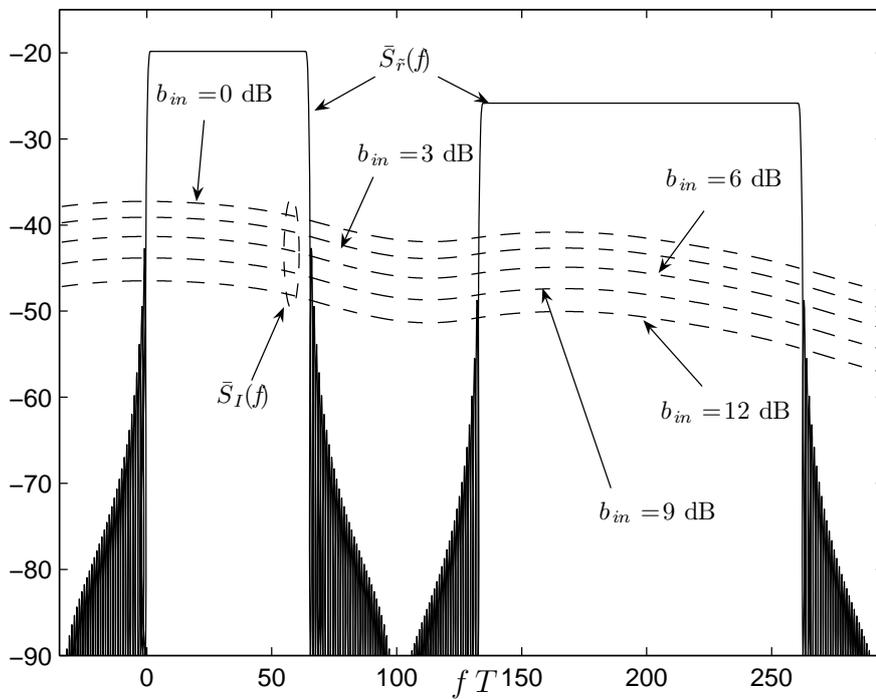


Figura 4.34: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

Na Figura 4.35, são explicitadas para o caso de $b_{in} = 0$ dB as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^a, 5^a e 7^a ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^a ordem). Note que, novamente, os produtos de intermodulação de 3^a ordem são praticamente os principais responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^a e 7^a estão, respectivamente 10 dB e 18 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^a ordem.

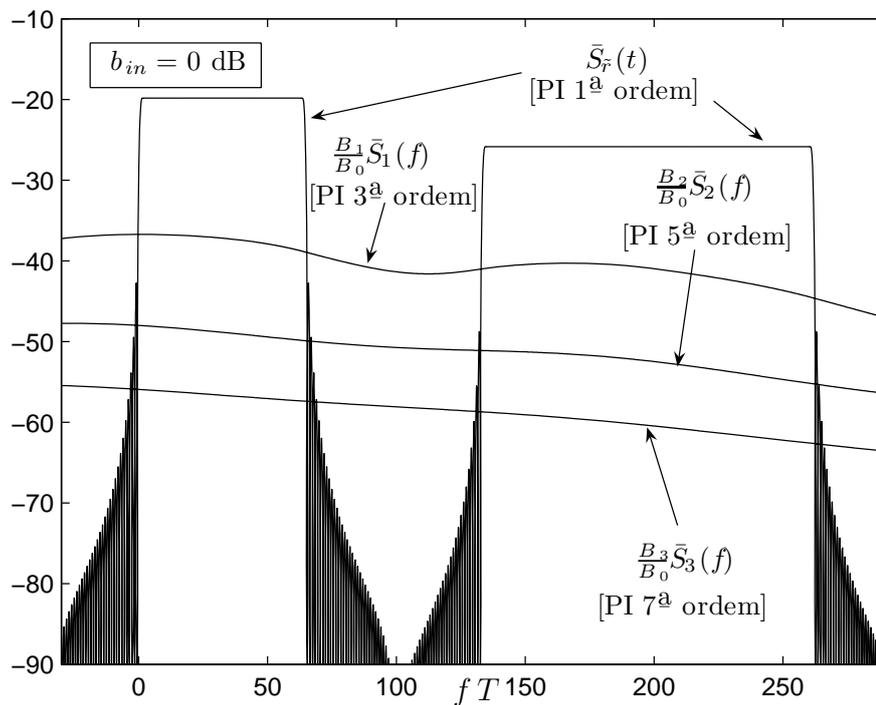


Figura 4.35: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

4.4

Efeito da não linearidade sobre três sinais OFDM

Nesta seção são apresentados resultados correspondentes às distorções de espectro experimentadas por três sinais OFDM que compartilham um canal não-linear. A não linearidade do canal foi modelada utilizando-se a expansão em série em (2-98) com os coeficientes dados em (4-1).

A envoltória complexa $\tilde{r}(t)$ corresponde à soma de três sinais OFDM estatisticamente independentes, sendo definidos na Seção 4.1. A função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{r}(t)$ é dada por (3-11) que, no caso de $M = 3$, se escreve

$$\begin{aligned} \bar{R}_{\tilde{r}}(\tau) = & \frac{P_{\tilde{m}_0}}{P_{\tilde{m}_0} + P_{\tilde{m}_1} + P_{\tilde{m}_2}} \bar{R}_{\tilde{m}_0}(\tau) + \frac{P_{\tilde{m}_1}}{P_{\tilde{m}_0} + P_{\tilde{m}_1} + P_{\tilde{m}_2}} \bar{R}_{\tilde{m}_1}(\tau) e^{-j2\pi\Delta f_1\tau} + \\ & + \frac{P_{\tilde{m}_2}}{P_{\tilde{m}_0} + P_{\tilde{m}_1} + P_{\tilde{m}_2}} \bar{R}_{\tilde{m}_2}(\tau) e^{-j2\pi\Delta f_2\tau} \end{aligned} \quad (4-10)$$

Foi considerado o primeiro e o terceiro sinais OFDM possuem 64 portadoras, o segundo sinal OFDM possui 128 portadoras. A relação entre as potências médias das envoltória complexas destes sinais é dada por $P_{\tilde{m}_1} = 4P_{\tilde{m}_0} = 8P_{\tilde{m}_2}$. Foram examinados casos específicos que envolvem cada um dos três pulsos definidos na Seção 4.1. Lembrando que a duração do símbolo OFDM T , é a mesma para os três sinais OFDM. Os resultados correspondentes a cada um destes casos são apresentados a seguir. Conforme comentado anteriormente, convém observar que embora nos casos apresentados tenham sido considerado que os três sinais OFDM têm o mesmo tipo de pulso formatador, os resultados analíticos obtidos nas seções anteriores podem ser aplicadas a situações onde os sinais OFDM tem pulsos formatadores diferentes.

Caso 1: Pulso Retangular

Para sinais OFDM com as características descritas no início desta seção e pulsos formatadores retangulares, a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125) com $\bar{R}_{\tilde{m}}(\tau)$ substituído por $\bar{R}_{\tilde{r}}(\tau)$. Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.36 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa de $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.37 para diversos valores de *back-off* de entrada.

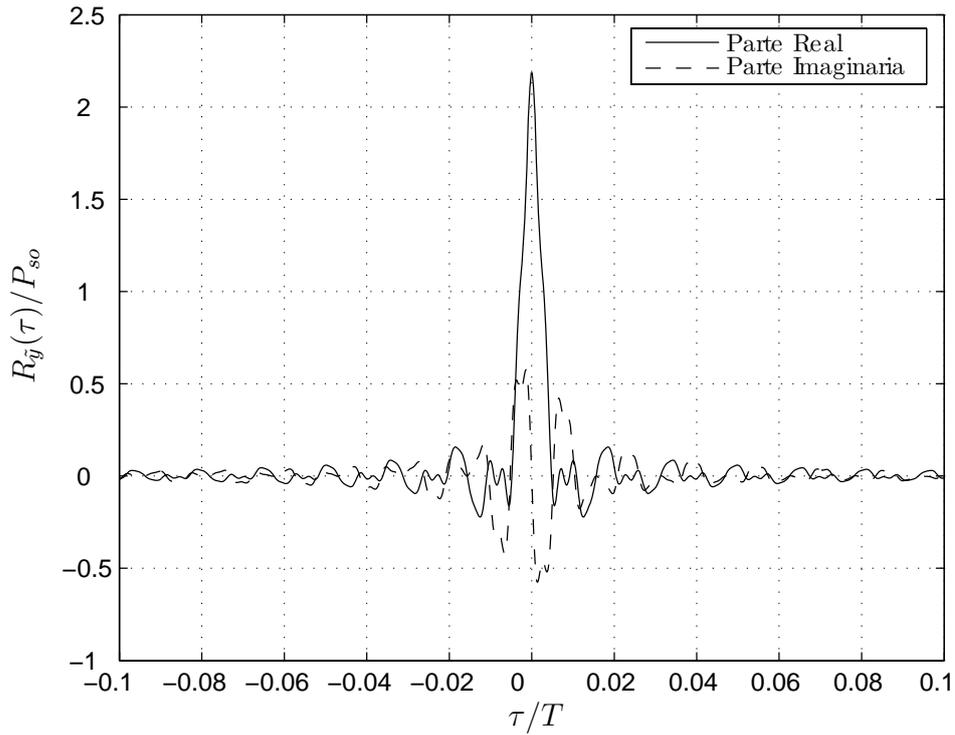


Figura 4.36: Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso retangular e $b_{in} = 0$ dB

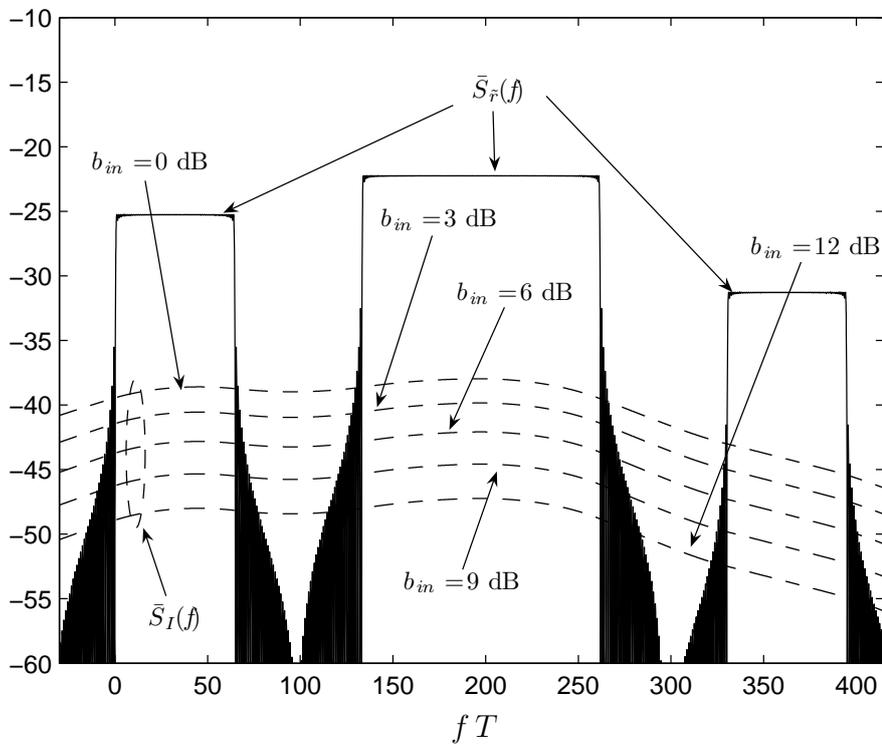


Figura 4.37: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

Na Figura 4.38, são explicitadas para o caso de $b_{in} = 0$ dB as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^a, 5^a e 7^a ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^a ordem). Note que os produtos de intermodulação de 3^a ordem são praticamente os principais responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^a e 7^a estão, respectivamente 10 dB e 18 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^a ordem.

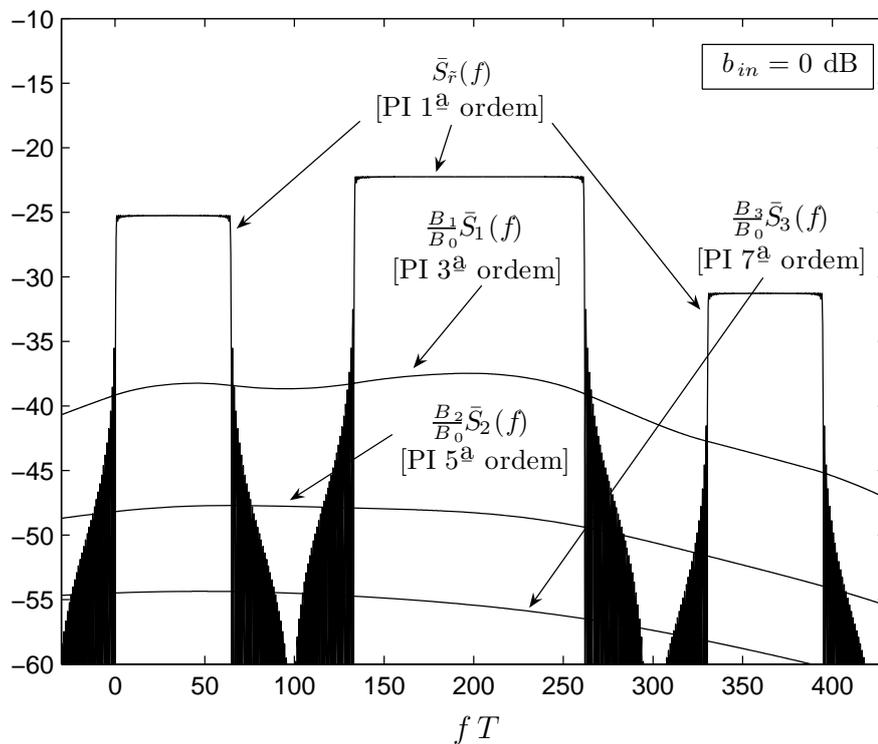


Figura 4.38: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

Caso 2: Pulso Nyquist

Para sinais OFDM com características descritas no início desta seção e pulsos formatadores Nyquist com fator de *roll-off* 0,4 ($\alpha = 0,4$), a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125) com $\bar{R}_{\tilde{m}}(\tau)$ substituído por $\bar{R}_{\tilde{r}}(\tau)$. Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.39 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

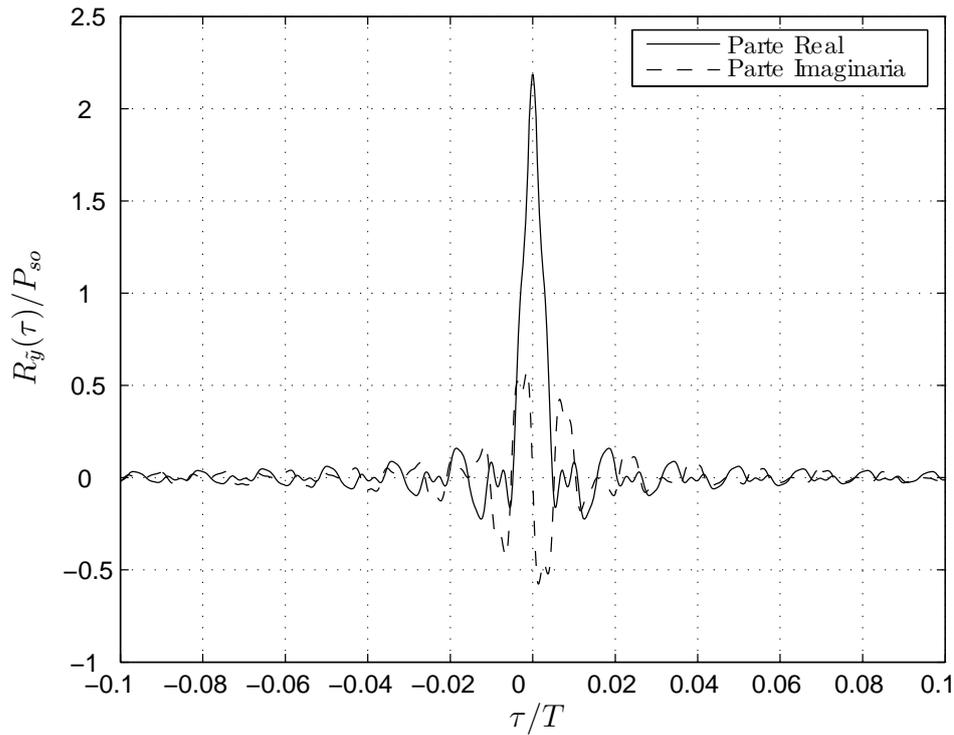


Figura 4.39: Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso Nyquist, $\alpha = 0,4$ e $b_{in} = 0$ dB

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa de $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.40 para diversos valores de *back-off* de entrada.

Na Figura 4.41, são explicitadas para o caso de $b_{in} = 0$ dB as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^a, 5^a e 7^a ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^a ordem). Também neste caso, os produtos de intermodulação de 3^a ordem são praticamente os responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^a e 7^a estão, respectivamente 10 dB e 18 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^a ordem.

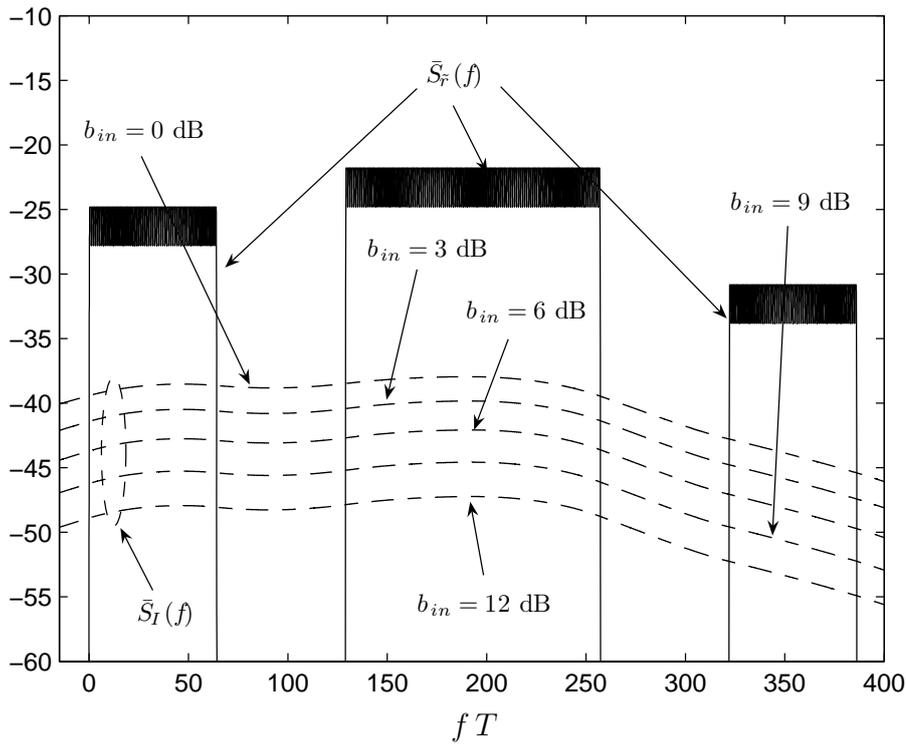


Figura 4.40: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

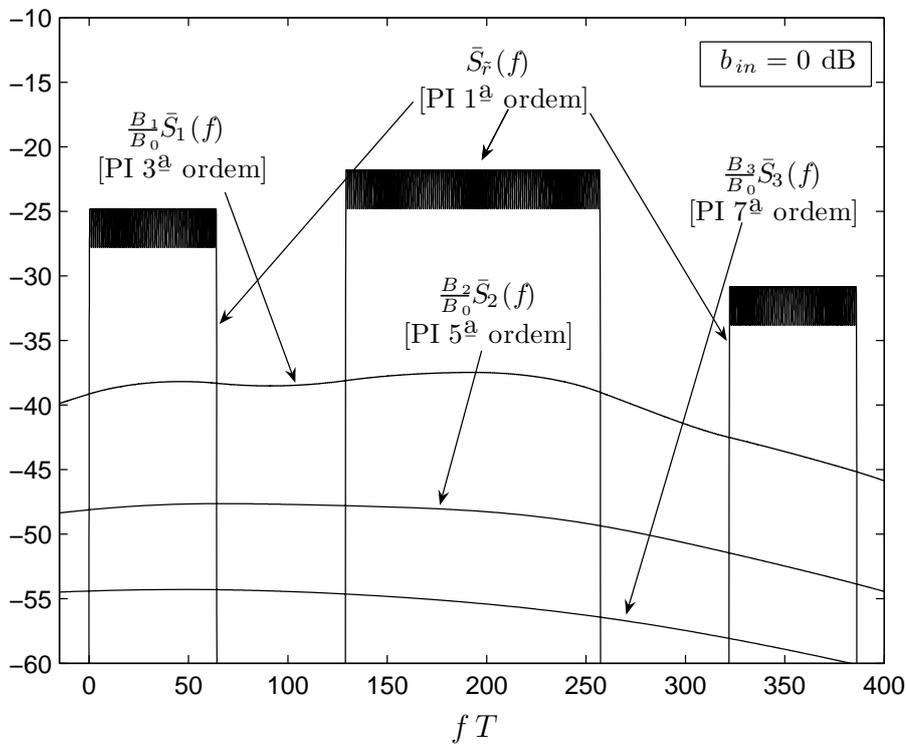


Figura 4.41: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.

Caso 3: Pulso Metade cosseno

Para sinais OFDM com características descritas no início desta seção e pulsos formatadores metade cossenos, conforme definido em (4-7), a função autocorrelação da envoltória complexa $\tilde{y}(t)$ do sinal produzido na saída da não linearidade foi calculada utilizando-se (2-125) com $\bar{R}_m(\tau)$ substituído por $\bar{R}_r(\tau)$. Esta função autocorrelação é ilustrada na Figura 4.42 para um valor de *back-off* de entrada de 0 dB ($b_{in} = 0$ dB).

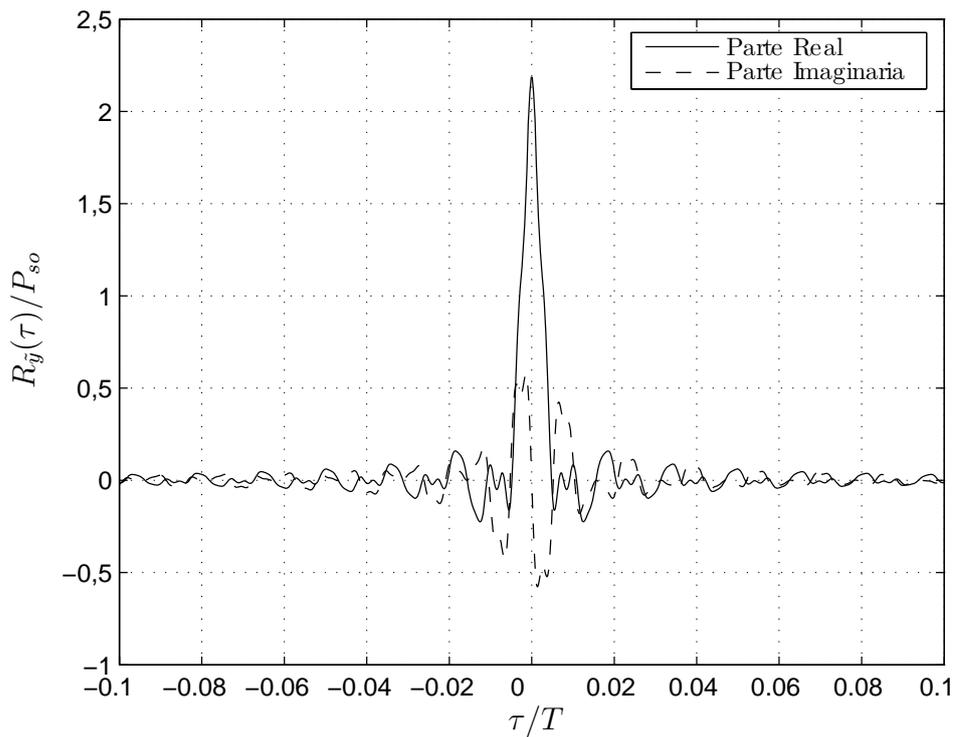


Figura 4.42: Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso metade cosseno e $b_{in} = 0$ dB

As parcelas da densidade espectral de potência normalizada da envoltória complexa de $\tilde{y}(t)$ correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, definidas em (2-147) e (2-149), estão ilustradas na Figura 4.43 para diversos valores de *back-off* de entrada.

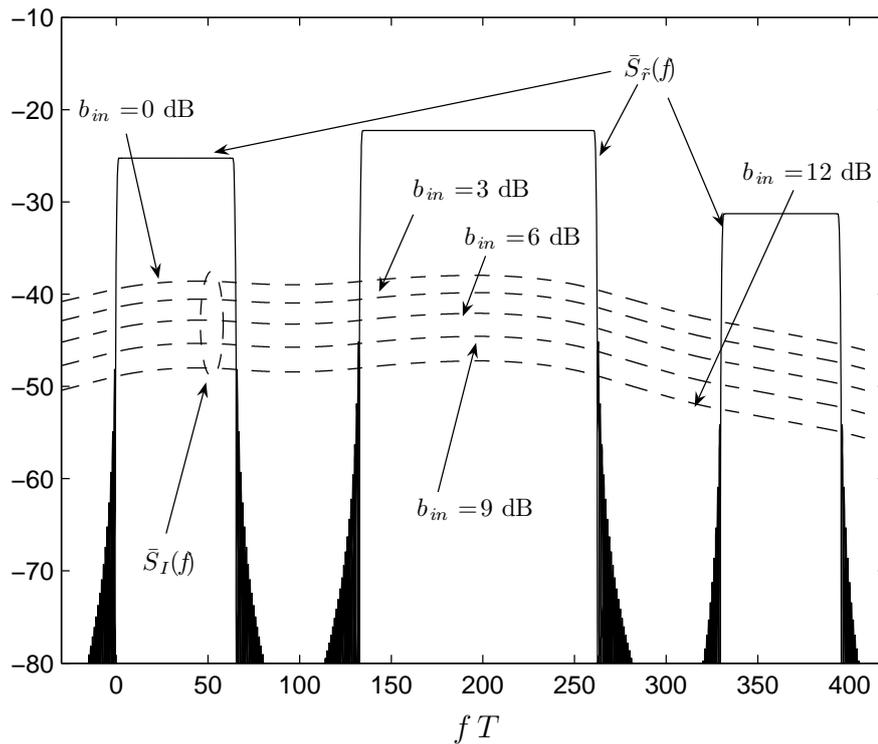


Figura 4.43: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.

Na Figura 4.44, são explicitadas para o caso de $b_{in} = 0$ dB as parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação de 3^a, 5^a e 7^a ordem. A título de referência esta figura inclui ainda a densidade espectral de potência correspondente ao sinal desejado (PI de 1^a ordem). Note que, novamente, os produtos de intermodulação de 3^a ordem são praticamente os principais responsáveis pela degradação do sinal devido à não linearidade uma vez que as potências dos produtos de intermodulação de 5^a e 7^a estão, respectivamente 10 dB e 18 dB abaixo do produto de intermodulação de 3^a ordem.

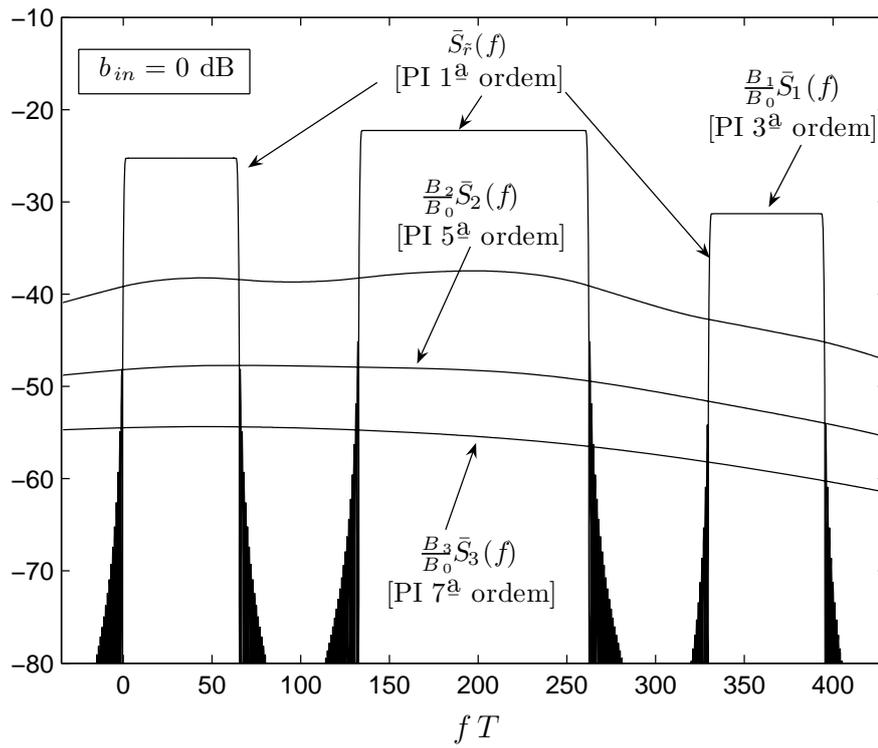


Figura 4.44: Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.