

## 5 Resultados Numéricos

Neste capítulo, exemplos de aplicações da modelagem desenvolvida no Capítulo 4 são apresentados. Estes exemplos são aplicados a situações particulares de interesse envolvendo a passagem de sinais através de um sistema de pré-distorção e, em seguida, por uma não-linearidade típica. Nos resultados apresentados neste capítulo utilizou-se, na entrada da não-linearidade, um sinal OFDM (ver Apêndice B), uma vez que, sobre determinadas condições [13, 14], a envoltória complexa do sinal OFDM pode ser adequadamente aproximada por um processo estocástico gaussiano, próprio, e estacionário no sentido amplo (ESA).

### 5.1 Considerações iniciais

Detalhes da não-linearidade utilizada, e algumas características adicionais do sinal de entrada são apresentados nas seções seguintes.

#### 5.1.1 A não-linearidade

As Curvas correspondentes às conversões AM/AM e AM/PM associadas à não-linearidade considerada nos exemplos numéricos são apresentadas nas figuras 5.1 e 5.2, respectivamente. Nestas figuras estão também ilustradas as aproximações correspondentes à série polinomial em (2-4) considerando-se os quatro primeiros termos da série ( $N = 3$ ). Os coeficientes complexos utilizados na representação em série polinomial são apresentados em (5-1)

$$\begin{cases} \gamma_1 = 1,3777548 - j 0,0108593 \\ \gamma_2 = -0,2257113 + j 0,0875749 \\ \gamma_3 = 0,0180834 - j 0,0171466 \\ \gamma_4 = -0,0004257 + j 0,0010350 \end{cases} \quad (5-1)$$

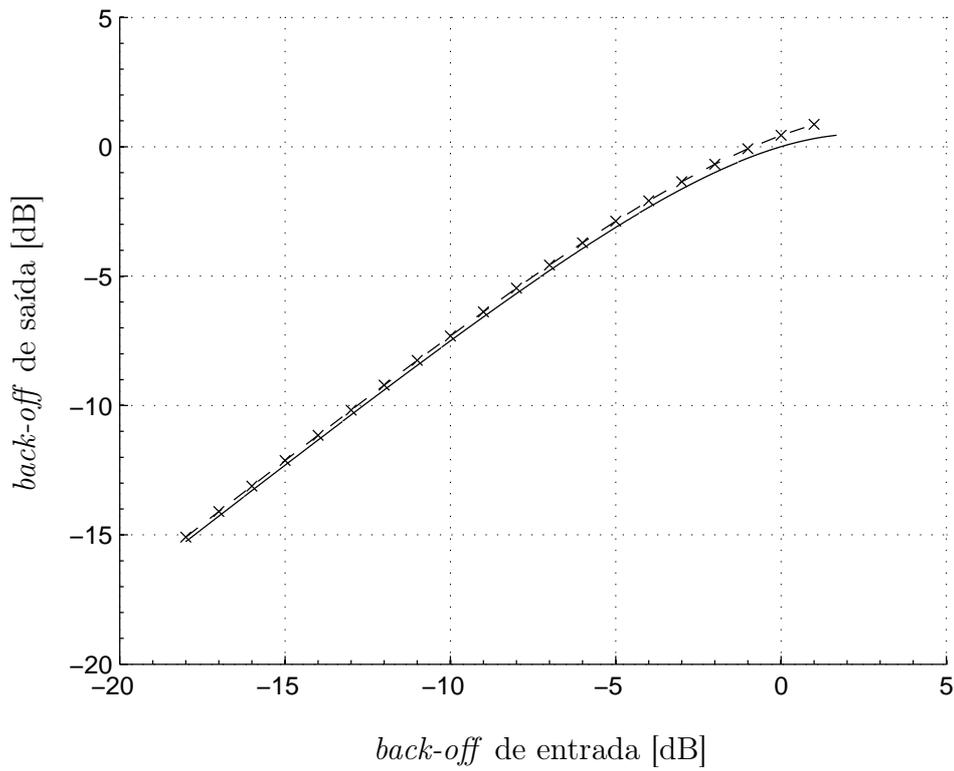


Figura 5.1: Conversão AM/AM: curva do fabricante (linha tracejada) e aproximação polinomial com  $N = 3$  (linha contínua).

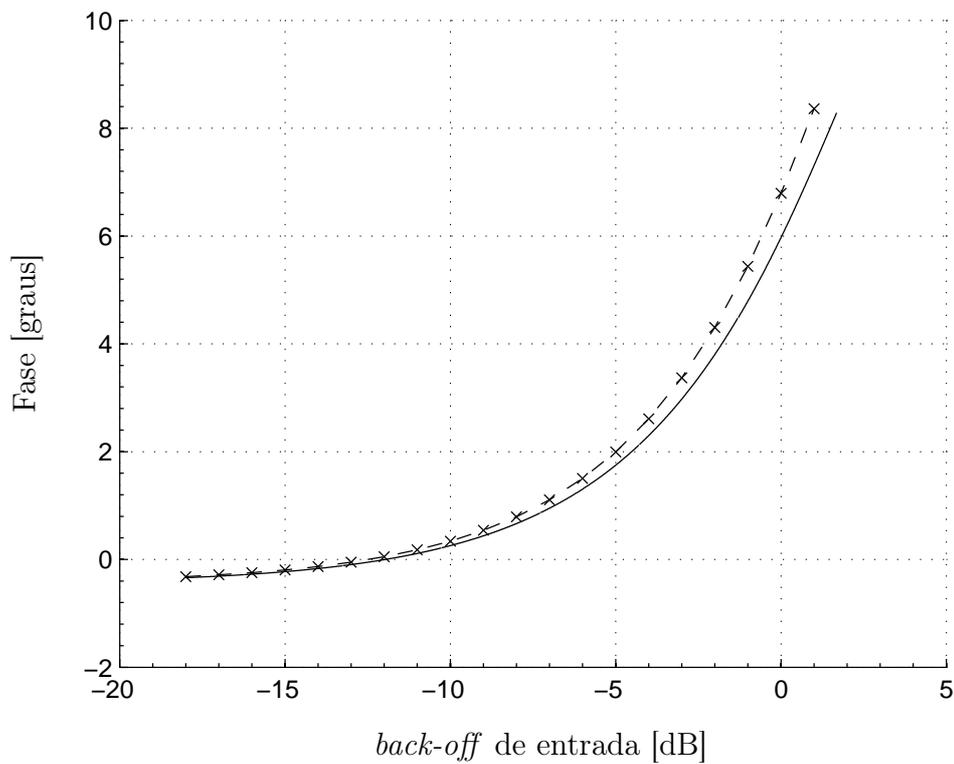


Figura 5.2: Conversão AM/PM: curva do fabricante (linha tracejada) e aproximação polinomial com  $N = 3$  (linha contínua).

## 5.1.2

**O sinal de entrada da não-linearidade**

O sinal de entrada do sistema composto é definido por (B-1). Considerou-se 64 portadoras ( $N=64$ ), com modulação QAM e três tipos de pulso: retangular, Nyquist, e metade cosseno. Detalhes destes pulsos e da Densidade Espectral de Potência do sinal OFDM resultante são apresentados a seguir

**Pulso retangular:** A expressão matemática do pulso retangular de energia unitária, é dada por

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T}}, & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (5-2)$$

Este pulso encontra-se ilustrado na Figura 5.3

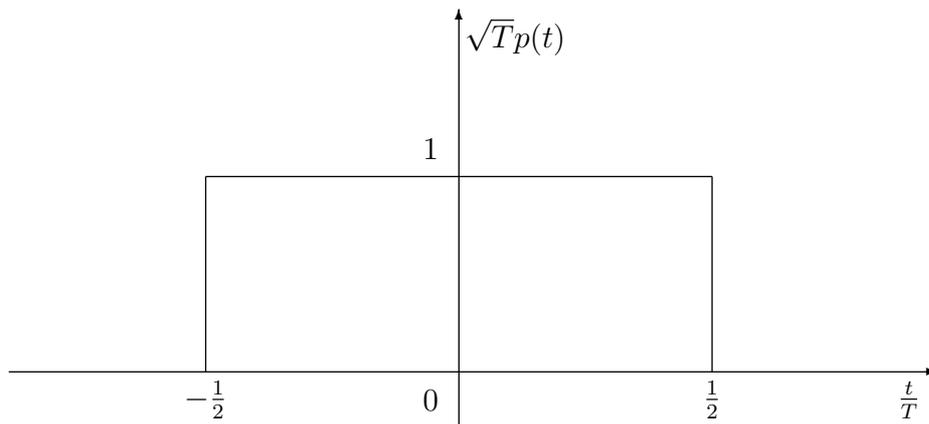


Figura 5.3: Pulso retangular normalizado

Neste caso, a densidade espectral de potência do sinal OFDM, dada por (B-24) é apresentada na Figura 5.4.

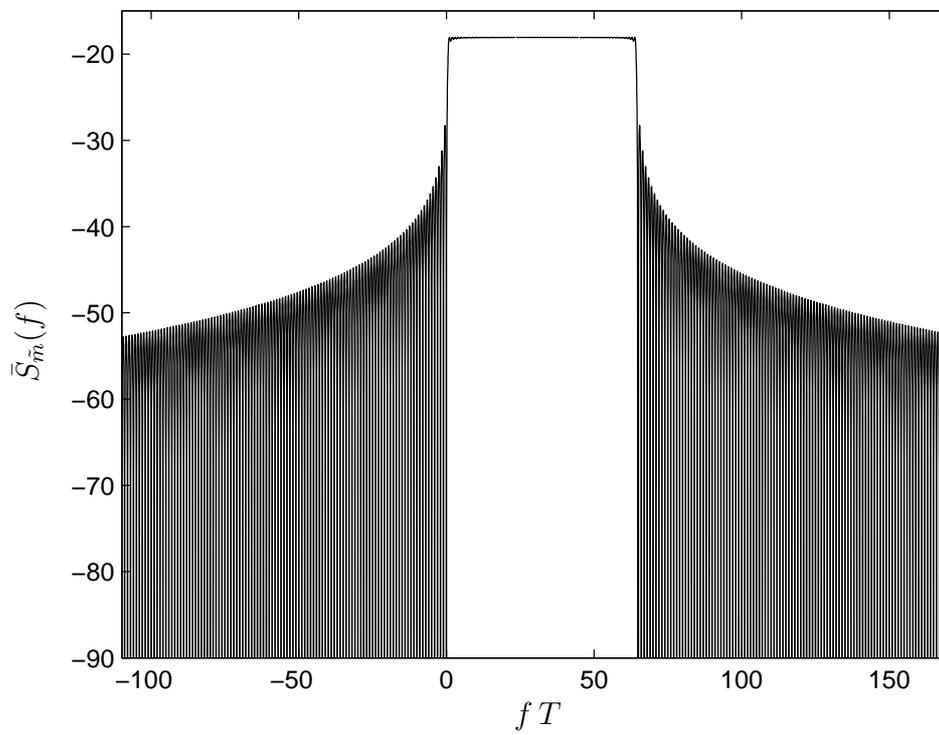


Figura 5.4: Densidade Espectral de Potência do sinal  $\tilde{m}(t)$  para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras.

**Pulso de Nyquist:** A expressão matemática do pulso de Nyquist de energia unitária, é dado por,

$$p(t) = \frac{2}{\sqrt{T(4-\alpha)}} \operatorname{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos(\alpha\pi t/T)}{1-(2\alpha t/T)^2} \quad (5-3)$$

onde o parâmetro  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) 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 5.5 para  $\alpha = 0, \frac{1}{2}$  e 1

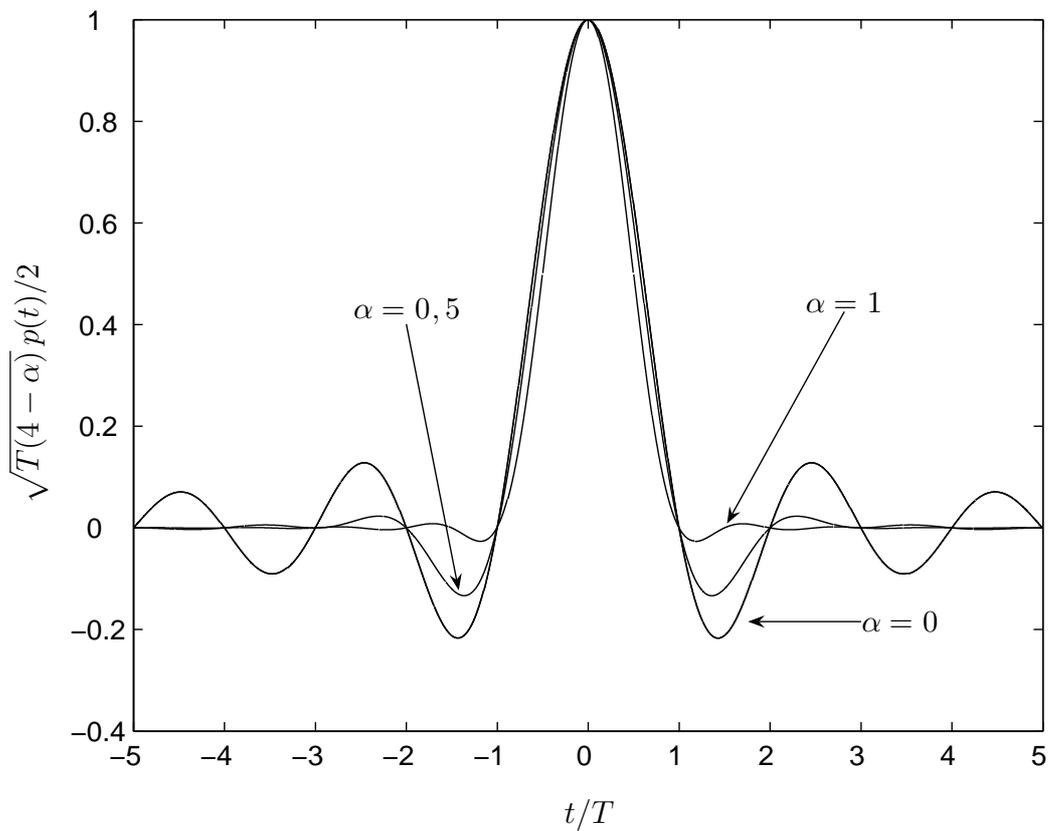


Figura 5.5: Pulso Nyquist normalizado

Neste caso, a densidade espectral de potência do sinal OFDM é apresentada na Figura 5.6

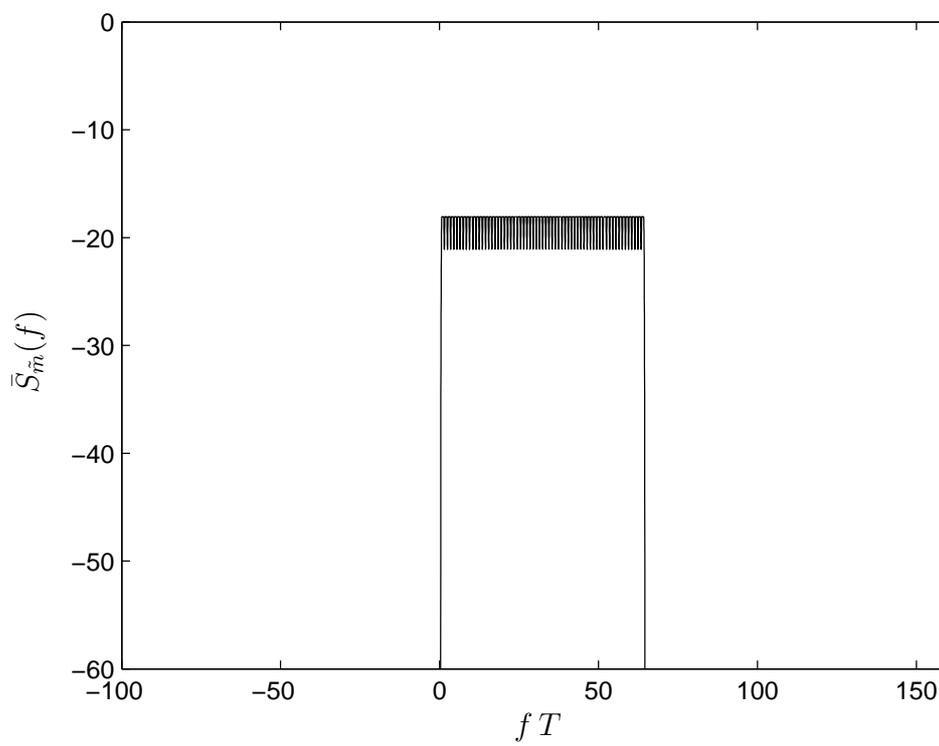


Figura 5.6: Densidade Espectral de Potência do sinal  $\tilde{m}(t)$ , para sinais OFDM com pulso Nyquist e 64 portadoras.

**Pulso metade cosseno:** A expressão matemática do pulso metade cosseno (*half cosine*) de energia unitária, é dada por

$$p(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{T}} \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right), & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (5-4)$$

Este pulso encontra-se ilustrado na Figura 5.7.

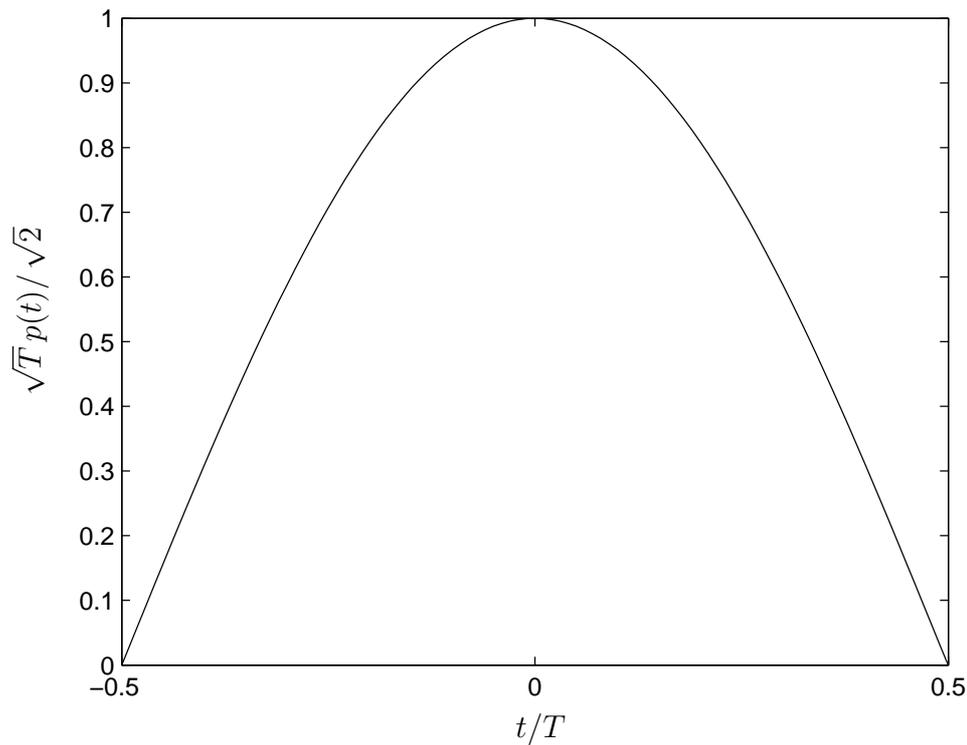


Figura 5.7: Pulso metade cosseno normalizado

Neste caso, a densidade espectral de potência deste sinal OFDM é apresentada na Figura (5.8)

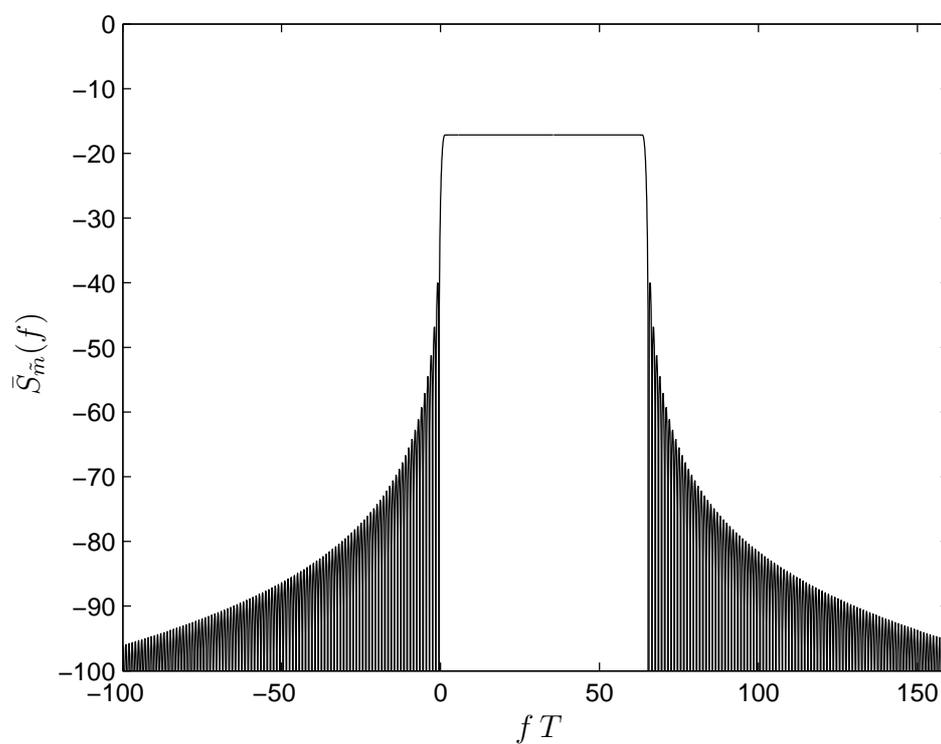


Figura 5.8: Densidade Espectral de Potência do sinal  $\tilde{m}(t)$ , para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.

## 5.2

### Exemplos de aplicação

Nesta seção são apresentados exemplos das duas estratégias de redução dos efeitos produzidos pelos produtos de intermodulação (exposto no Capítulo 4). São apresentados três diferentes exemplos (casos) em cada estratégia. Os resultados obtidos são apresentados nas seções seguintes.

#### 5.2.1

#### Exemplos da estratégia 1

##### Caso 1

Neste caso determina-se o valor do  $\delta$  e  $P_{\bar{x}}$  tal que a potência de intermodulação de 3ª ordem seja minimizada, enquanto as potências dos demais produtos de intermodulação são limitados aos valores indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 1 da estratégia 1

Função Objetivo	$\mathcal{S} = \{1\}$
Restrições	$B_2 = h_2(\delta, P_{\bar{x}}) < -14 \text{ dB}$ $B_3 = h_3(\delta, P_{\bar{x}}) < -14 \text{ dB}$ $B_\ell = h_\ell(\delta, P_{\bar{x}}) < -20 \text{ dB}, \ell \geq 4$ $P_{\bar{m}} = g(\delta, P_{\bar{x}}) = 1$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.2. Na primeira linha desta tabela estão indicadas as potências dos produtos de intermodulação das primeiras sete ordens quando não se utiliza o sistema de pré-distorção. Na segunda linha apresenta-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *sub-ótimo*, o qual foi obtido considerando-se como ponto inicial da otimização aquele que corresponde a não utilização da pré-distorção. Na terceira linha mostra-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *ótimo*, o qual foi obtido considerando-se o melhor mínimo local apresentado no histograma da Figura 5.9. Este histograma foi obtido a partir da geração aleatória de múltiplos valores de inicialização da otimização exposta no Capítulo 4 (os elementos do vector de parâmetros  $\delta$  com parte real e parte imaginária uniformes em  $[-1 ; 1]$  e estatisticamente independentes). Note que o histograma da Figura 5.9 reflete a existência de mínimos locais bem definidos.

Neste caso pode-se apreciar uma melhoria aproximada de 9,4 dB na potência do produto de intermodulação de 3ª ordem, entretanto as potências dos produtos de intermodulação de ordem superior respeitam de certa forma as restrições estabelecidas na Tabela 5.1.

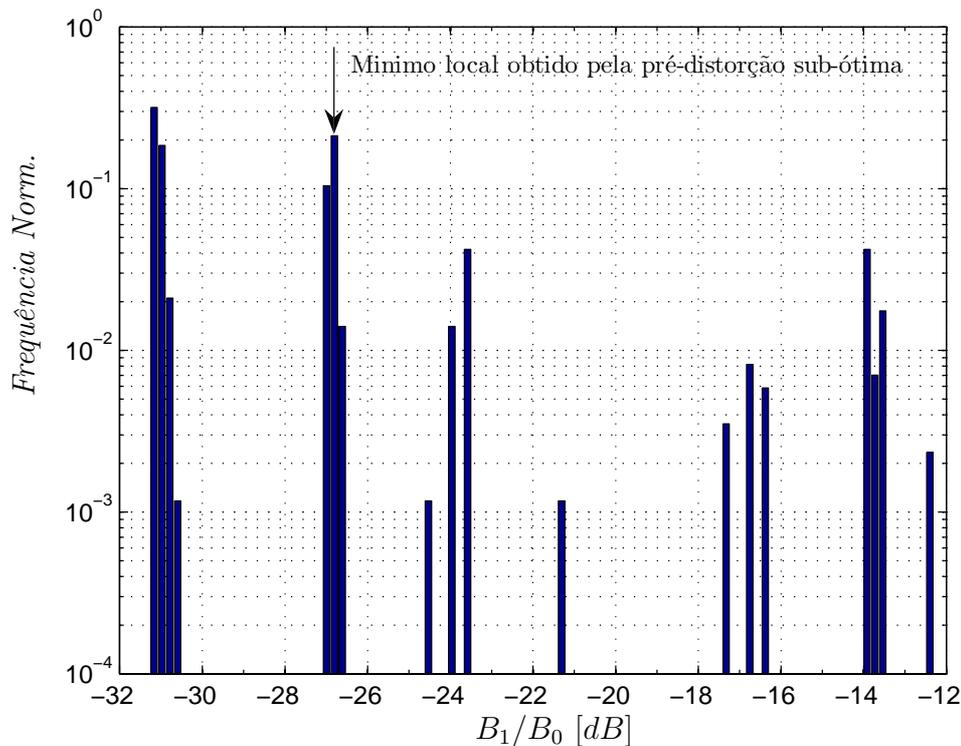


Figura 5.9: Histograma da potência do produto de intermodulação de 3ª ordem da estratégia 1 - caso 1, obtido a partir da geração de múltiplos pontos de inicialização na otimização.

A título de informação, se a curva dos coeficientes do sistema não linear fosse idêntica à aproximação da não-linearidade utilizada na obtenção dos parâmetros do sistema de pré-distorção, as potências seriam aquelas apresentadas na Tabela 5.3.

As Figuras 5.10, 5.11, e 5.12 ilustram graficamente os resultados da Tabela 5.2 para os pulsos retangular, Nyquist, e metade cosseno respectivamente. Em cada uma das Figuras são indicadas três curvas de interesse, estas são: quando não se utiliza o sistema de pré-distorção, quando se utiliza o sistema de pré-distorção sub-ótimo, e quando se utiliza o sistema de pré-distorção ótimo.

Comparando as Figura 5.10, 5.11, e 5.12, pode-se afirmar que quando o símbolo OFDM é gerado utilizando o pulso de Nyquist, os efeitos das potên-

Tabela 5.2: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 1 - caso 1, considerando-se a não-linearidade real (parâmetros do fabricante).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-14,6	-14,8	-18,9			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-23,2	-14,1	-15,5	-20,9	-21,2	-21,1
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-24,0	-14,2	-16,2	-21,4	-21,6	-21,0

Tabela 5.3: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 1 - caso 1, considerando-se a não-linearidade ideal(idêntica à utilizada na obtenção dos  $\delta$ ).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-11,7	-14,7	-17,8			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-26,7	-14,0	-14,5	-20,0	-20,2	-20,1
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-31,3	-14,0	-15,7	-20,5	-20,6	-20,0

cias dos produtos de intermodulação, quando utiliza-se o sistema pré-distorção proposto neste trabalho, diminuem consideravelmente em comparação dos outros pulsos (retangular e metade cosseno).

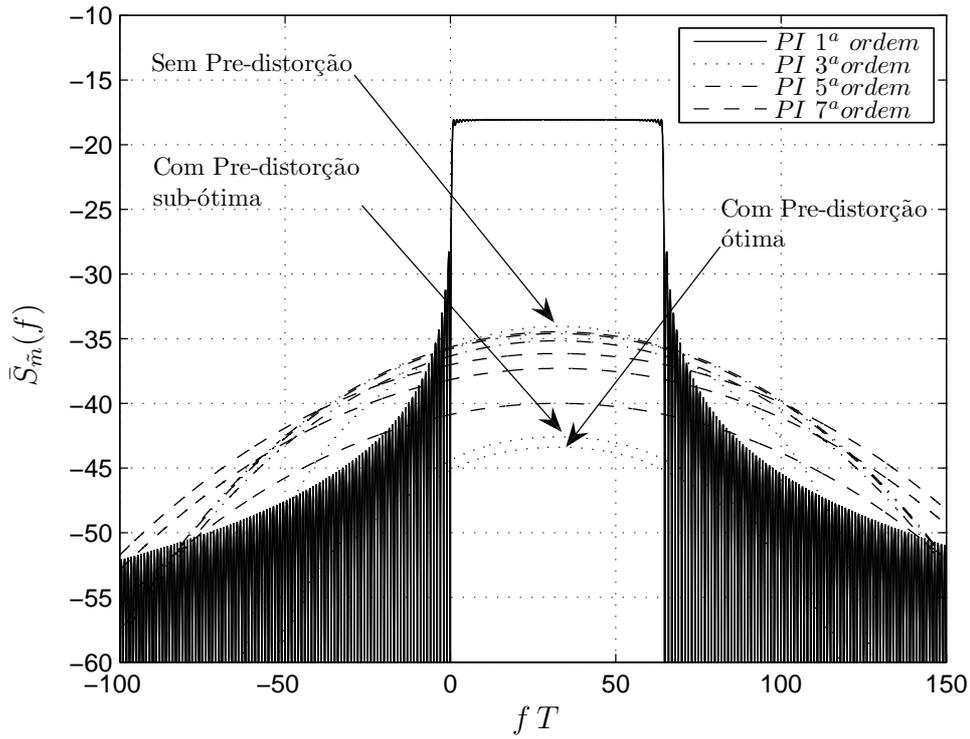


Figura 5.10: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 1 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso retangular.

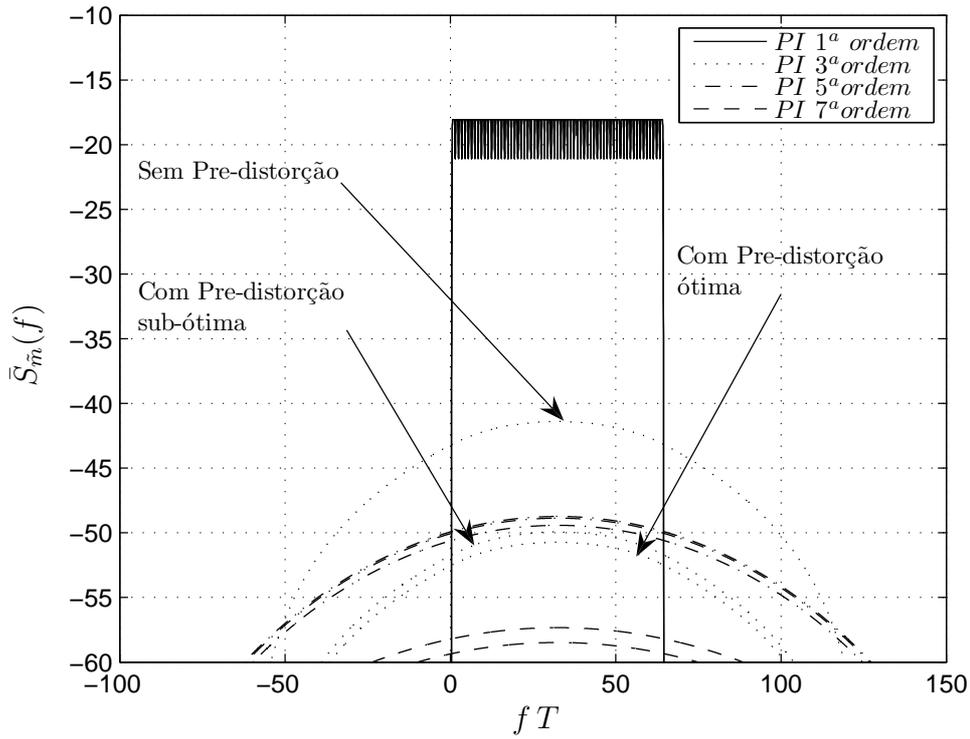


Figura 5.11: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 1 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso de Nyquist.

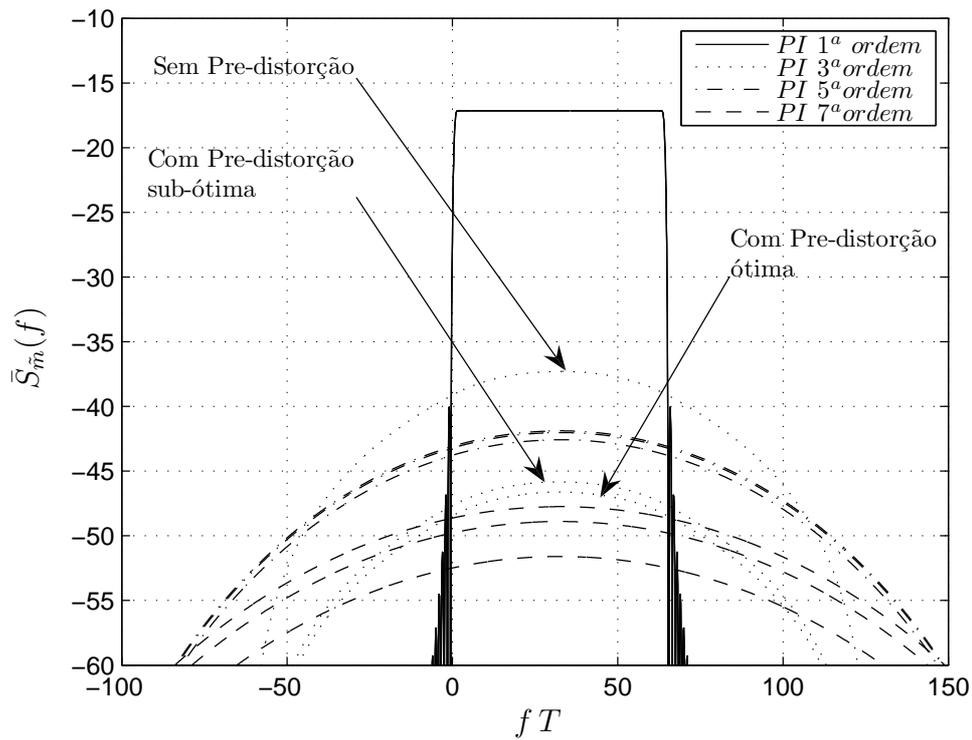


Figura 5.12: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 1 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso metade cosseno.

**Caso 2**

Neste caso tem-se a mesma função objetivo determinada no caso anterior (pretende-se minimizar a potência do produto de intermodulação de 3ª ordem), mas as restrições foram alteradas para valores apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 2 da estratégia 1.

<b>Função Objetivo</b>	$\mathcal{S} = \{1\}$
<b>Restrições</b>	$B_2 = h_2(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) < -14,78 \text{ dB}$ $B_3(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) < -15,5 \text{ dB}$ $B_\ell = h_\ell(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) < -20 \text{ dB} , \ell \geq 4$ $P_{\tilde{m}} = g(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) = 1$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5. Na primeira linha desta tabela estão indicadas as potências dos produtos de intermodulação das primeiras sete ordens quando não se utiliza o sistema de pré-distorção. Na segunda linha apresenta-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *sub-ótimo*, o qual foi obtido considerando-se como ponto inicial da otimização aquele que corresponde a não utilização da pré-distorção. Na terceira linha mostra-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *ótimo*, o qual foi obtido considerando-se o melhor mínimo local apresentado no histograma da Figura 5.13. Este histograma foi obtido a partir da geração aleatória de múltiplos valores de inicialização da otimização exposta no Capítulo 4 (os elementos do vector de parâmetros  $\boldsymbol{\delta}$  com parte real e parte imaginária uniformes em  $[-1 ; 1]$  e estatisticamente independentes). Note que o histograma da Figura 5.13 reflete a existência de mínimos locais bem definidos.

Neste caso pode-se apreciar uma melhoria aproximada de 4,8 dB na potência do produto de intermodulação de 3ª ordem, enquanto as potências dos produtos de intermodulação de ordem superior respeitam de certa forma as restrições estabelecidas na Tabela 5.4.

A título de informação, se a curva dos coeficientes do sistema não linear fosse idêntica á aproximação da não linearidade utilizada na obtenção dos parâmetros do sistema de pré-distorção, as potências seriam aquelas apresentadas na Tabela 5.6.

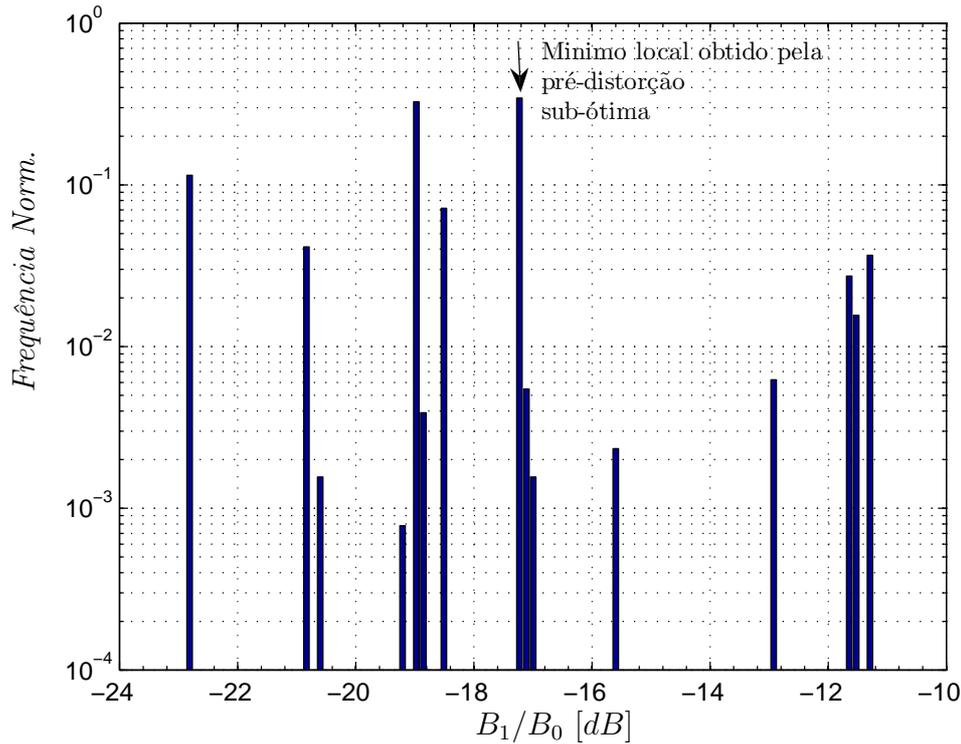


Figura 5.13: Histograma da potência do produto de intermodulação de 3ª ordem da estratégia 1 - caso 2, obtido a partir da geração de múltiplos pontos de inicialização na otimização.

As Figuras 5.14, 5.15, e 5.16 ilustram graficamente os resultados da Tabela 5.5 para os pulsos retangular, Nyquist, e metade cosseno respectivamente. Em cada uma das figuras são indicadas tres curvas de interesse, estas são: quando não se utiliza o sistema de pré-distorção, quando utiliza-se o sistema de pré-distorção sub-ótimo, e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção ótimo.

Comparando as Figura 5.14, 5.15, e 5.16, pode-se afirmar que quando o símbolo OFDM é gerado utilizando o pulso de Nyquist, os efeitos das potências dos produtos de intermodulação, quando utiliza-se o sistema pré-distorção proposto neste trabalho, diminuem consideravelmente em comparação dos outros pulsos (retangular e metade cosseno).

Tabela 5.5: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 1 - caso 2, considerando-se a não-linearidade real (parâmetros do fabricante).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-14,6	-14,8	-18,9			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-18,7	-14,9	-16,1	-23,6	-25,3	-22,9
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-19,4	-15,2	-16,1	-20,9	-26,5	-25,3

Tabela 5.6: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 1 - caso 2, considerando-se a não-linearidade ideal(idêntica à utilizada na obtenção dos  $\delta$ ).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-11,7	-14,7	-17,8			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-17,2	-14,8	-15,5	-22,5	-24,2	-21,9
Com Pré-distorção (ótima)	0	-22,9	-14,8	-15,8	-20,0	-25,6	-24,4

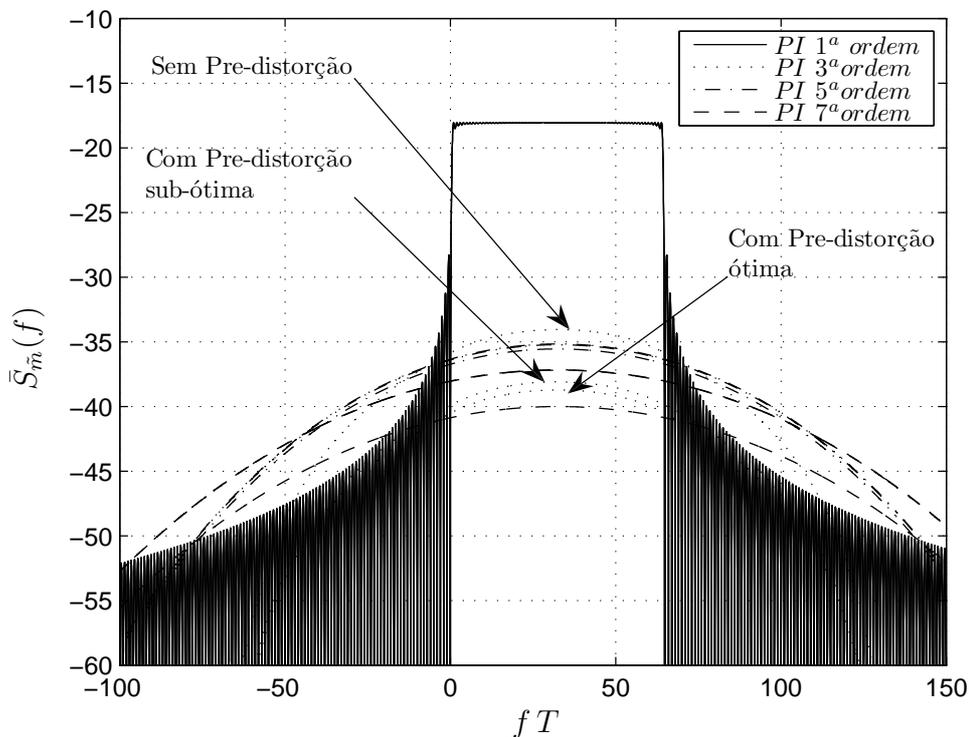


Figura 5.14: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção(sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 2 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso retangular.

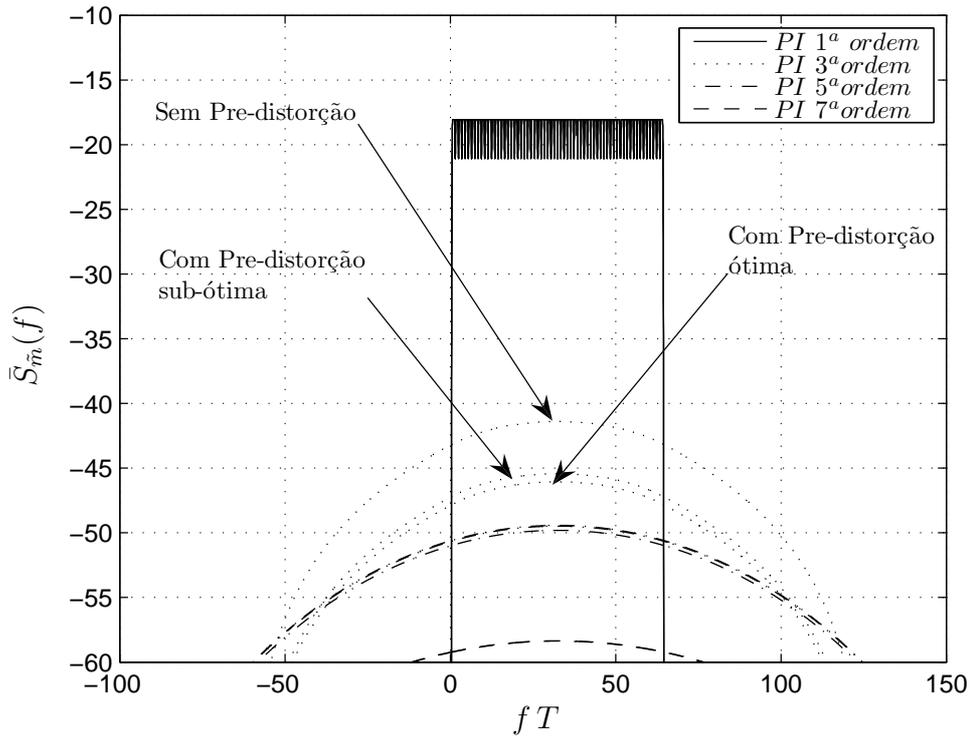


Figura 5.15: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção(sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 2 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso de Nyquist

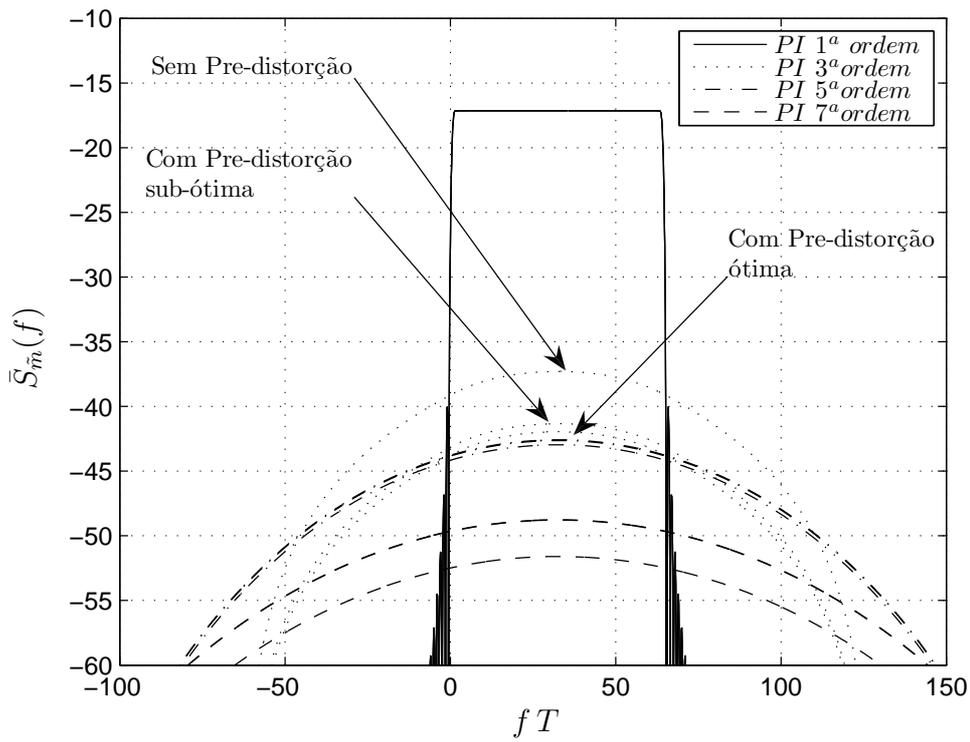


Figura 5.16: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 2 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso metade cosseno

### Caso 3

Neste caso determina-se o valor do  $\delta$  e  $P_{\bar{x}}$  tal que a soma, das potências de intermodulação de 3ª e 5ª ordem, seja minimizada, entanto as potências dos demais produtos de intermodulação são limitados com valores indicados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 3 da estratégia 1

Função Objetivo	$\mathcal{S} = \{1, 2\}$
Restrições	$B_3 = h_3(\delta, P_{\bar{x}}) < -15,0 \text{ dB}$
	$B_\ell = h_\ell(\delta, P_{\bar{x}}) < -20 \text{ dB}, \ell \geq 4$
	$P_{\bar{m}} = g(\delta, P_{\bar{x}}) = 1$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.8. Na primeira linha desta tabela estão indicadas as potências dos produtos de intermodulação das primeiras sete ordens quando não se utiliza o sistema de pré-distorção. Na segunda linha apresenta-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *sub-ótimo*, o qual foi obtido considerando-se como ponto inicial da otimização aquele que corresponde a não utilização da pré-distorção. Na terceira linha mostra-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *ótimo*, o qual foi obtido considerando-se o melhor mínimo local apresentado no histograma da Figura 5.17. Este histograma foi obtido a partir da geração aleatória de múltiplos valores de inicialização da otimização exposta no Capítulo 4 (os elementos do vector de parâmetros  $\delta$  com parte real e parte imaginária uniformes em  $[-1 ; 1]$  e estatisticamente independentes). Na Tabela 5.8 pode-se apreciar também que quando utiliza-se a pré-distorção ótima consegue-se, de forma aparentemente contraditória, uma pior resposta do que quando utiliza-se a pré-distorção sub-ótima. Isto se deve ao fato dos resultados da Tabela 5.8 se referem à composição do sistema não linear real con o sistema de pré-distorção que foi dimensionado utilizando um modelo obtido por aproximação polinomial (modelo ideal).

Neste caso pode-se apreciar uma melhoria aproximada de 9,2 dB na potência do produto de intermodulação de 3ª ordem, entretanto as potências dos produtos de intermodulação de ordem superior respeitam de certa forma as restrições estabelecidas na Tabela 5.7.

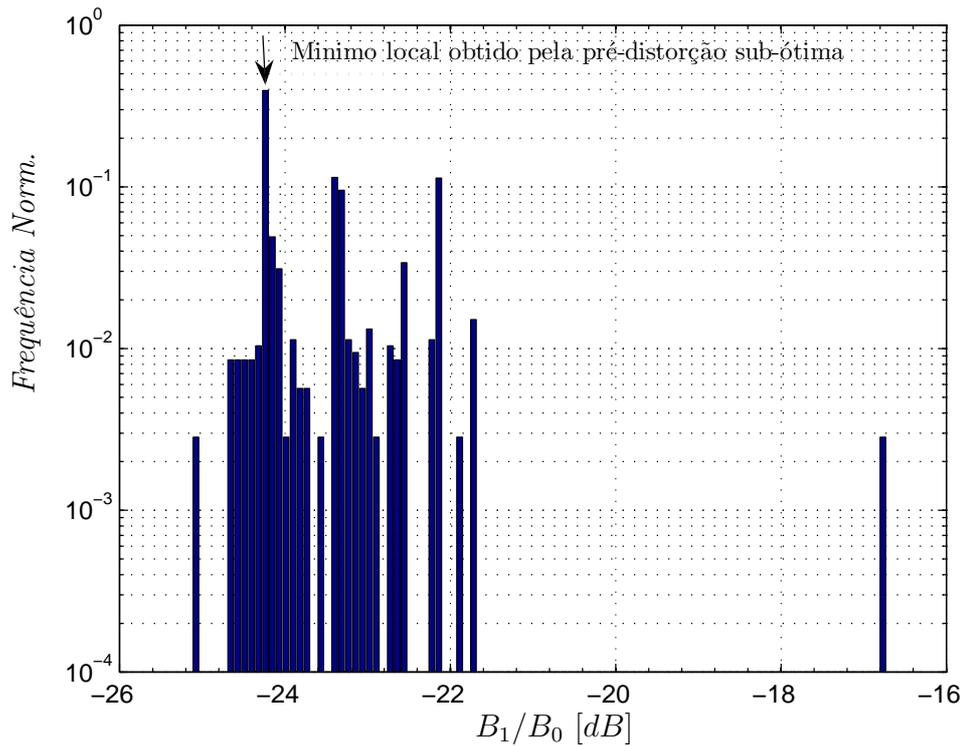


Figura 5.17: Histograma da potência do produto de intermodulação de 3ª ordem da estratégia 1 - caso 3, obtido a partir da geração de múltiplos pontos de inicialização na otimização.

A título de informação, se a curva dos coeficientes do sistema não linear fosse idêntica à aproximação da não-linearidade utilizada na obtenção dos parâmetros do sistema de pré-distorção, as potências seriam aquelas apresentadas na Tabela 5.9.

As Figuras 5.18, 5.19, e 5.20 ilustram graficamente os resultados da Tabela 5.8 para os pulsos retangular, Nyquist, e metade cosseno respectivamente. Em cada uma das Figuras são indicadas três curvas de interesse, estas são: quando não se utiliza o sistema de pré-distorção, quando se utiliza o sistema de pré-distorção sub-ótimo, e quando se utiliza o sistema de pré-distorção ótimo.

Comparando as Figuras 5.18, 5.19, e 5.20, pode-se afirmar que quando o símbolo OFDM é gerado utilizando o pulso de Nyquist, os efeitos das potências dos produtos de intermodulação, quando utiliza-se o sistema de pré-distorção proposto neste trabalho, diminuem consideravelmente em comparação dos outros pulsos (retangular e metade cosseno).

Tabela 5.8: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 1 - caso 3, considerando-se a não-linearidade real (parâmetros do fabricante).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-14,6	-14,8	-18,9			
Com Pré-distorção (Sub-ótimo)	0	-23,8	-14,6	-15,7	-20,9	-21,5	-21,0
Com Pré-distorção (Ótimo)	0	-23,1	-14,1	-15,7	-24,1	-25,6	-24,3

Tabela 5.9: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 1 - caso 3, considerando-se a não-linearidade ideal(idêntica à utilizada na obtenção dos  $\delta$ ).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-11,7	-14,7	-17,8			
Com Pré-distorção (Sub-ótimo)	0	-24,2	-14,4	-15,1	-20,0	-20,5	-20,0
Com Pré-distorção (ótimo)	0	-25,1	-14,0	-15,0	-23,3	-24,6	-23,2

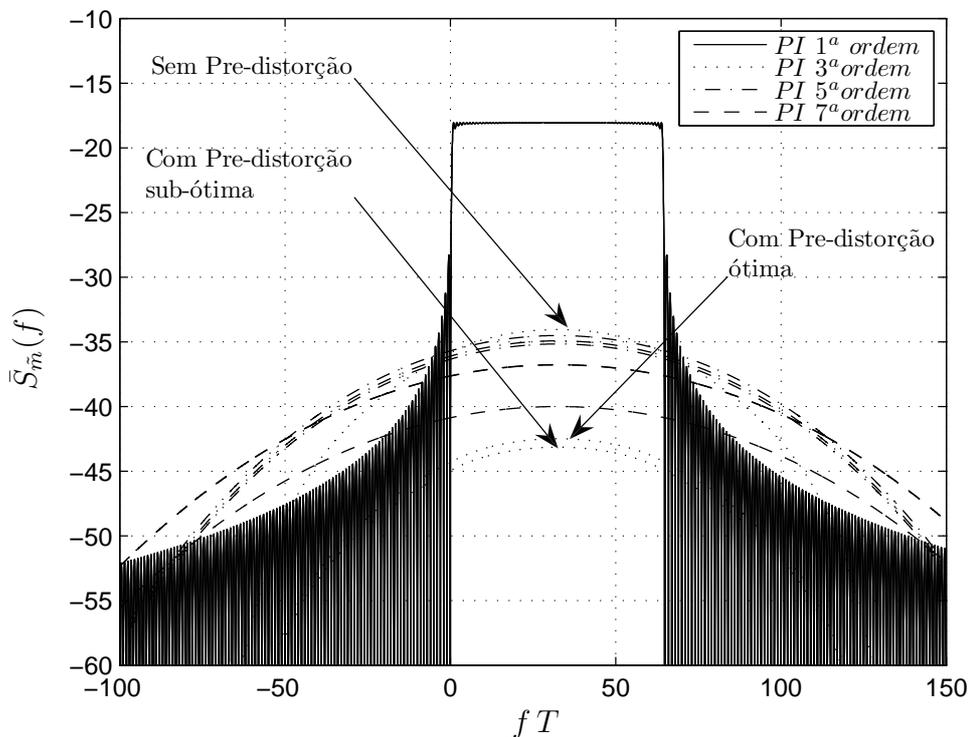


Figura 5.18: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção(sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 3 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso retângulo

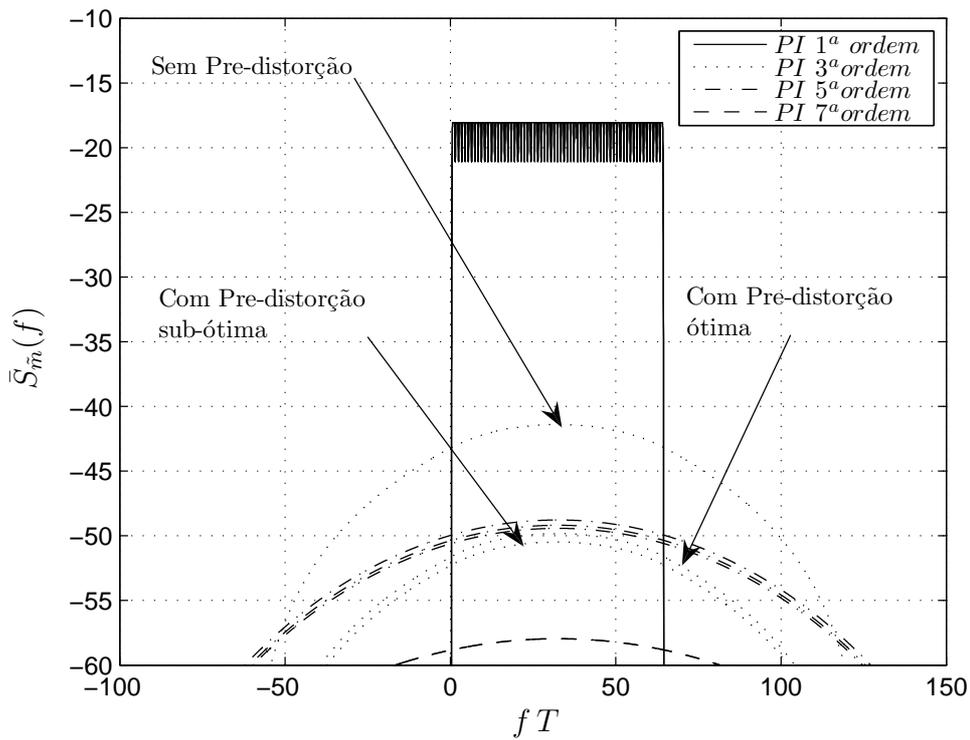


Figura 5.19: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 3 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso de Nyquist

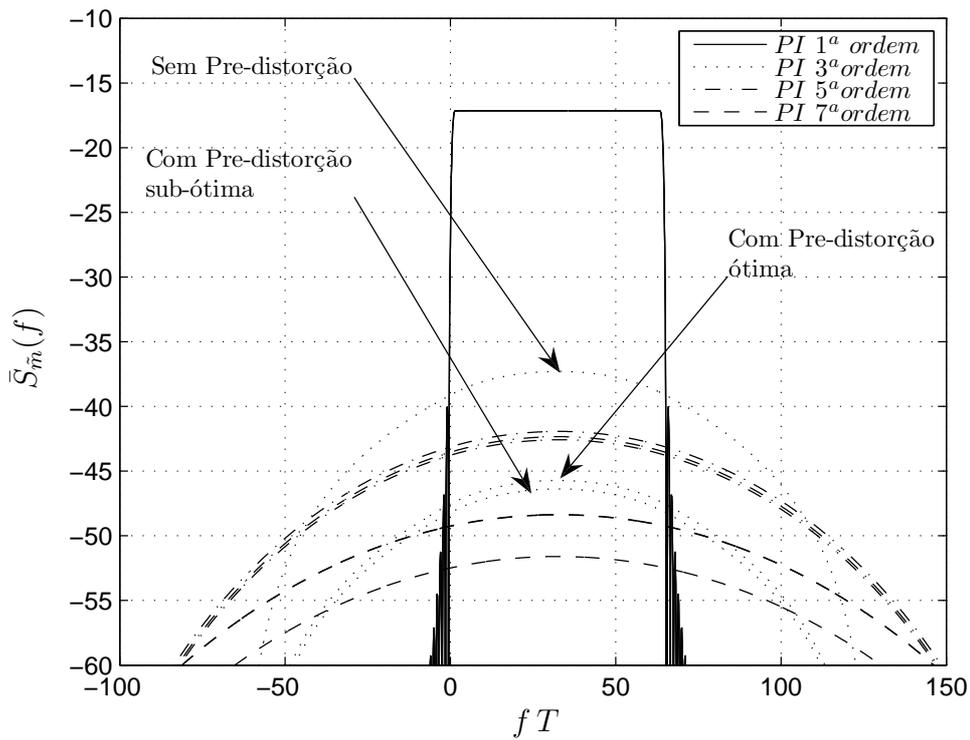


Figura 5.20: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 3 na estratégia 1. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso metade cosseno

5.2.2

Exemplos da estratégia 2

Caso 1

Neste caso as potências a serem equalizadas são as dos produtos de intermodulação de 3ª e 5ª ordem (a função objetivo), as restrições para as outras potências de intermodulação são mostradas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 1 da estratégia 2

<b>Função Objetivo</b>	$\mathcal{S} = \{1, 2\}$
<b>Restrições</b>	$B_3 = h_3(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) < -17 \text{ dB}$ $B_\ell = h_\ell(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) < -25 \text{ dB}, \ell \geq 4$ $P_{\tilde{m}} = g(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) = 1$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.11. Na primeira linha desta tabela estão indicadas as potências dos produtos de intermodulação das primeiras sete ordens quando não se utiliza o sistema de pré-distorção. Na segunda linha apresenta-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *sub-ótimo*, o qual foi obtido considerando-se como ponto inicial da otimização aquele que corresponde a não utilização da pré-distorção. Na terceira linha mostra-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *ótimo*, o qual foi obtido considerando-se o melhor mínimo local apresentado no histograma da Figura 5.21. Este histograma foi obtido a partir da geração aleatória de múltiplos valores de inicialização da otimização exposta no Capítulo 4 (os elementos do vector de parâmetros  $\boldsymbol{\delta}$  com parte real e parte imaginária uniformes em  $[-1; 1]$  e estatisticamente independentes). Note que o histograma da Figura 5.21 reflete a existência de mínimos locais bem definidos. Na Tabela 5.11 pode-se apreciar também que após da equalização das potências dos produtos de intermodulação expostas nas colunas  $B_1/B_0$  e  $B_2/B_0$ , estas não refletem-se em valores equalizados. Isto se deve ao fato dos resultados da Tabela 5.8 se referem à composição do sistema não linear real com o sistema de pré-distorção que foi dimensionado utilizando um modelo obtido por aproximação polinomial (modelo ideal).

Neste caso pode-se apreciar uma melhoria aproximada de 2,4 dB na potência do produto de intermodulação de 3ª ordem, considerando que as potências dos produtos de intermodulação de 3ª e 5ª ordem foram equalizadas, entretanto as potências dos produtos de intermodulação de ordem superior respeitam de

certa forma as restrições estabelecidas na Tabela 5.10.

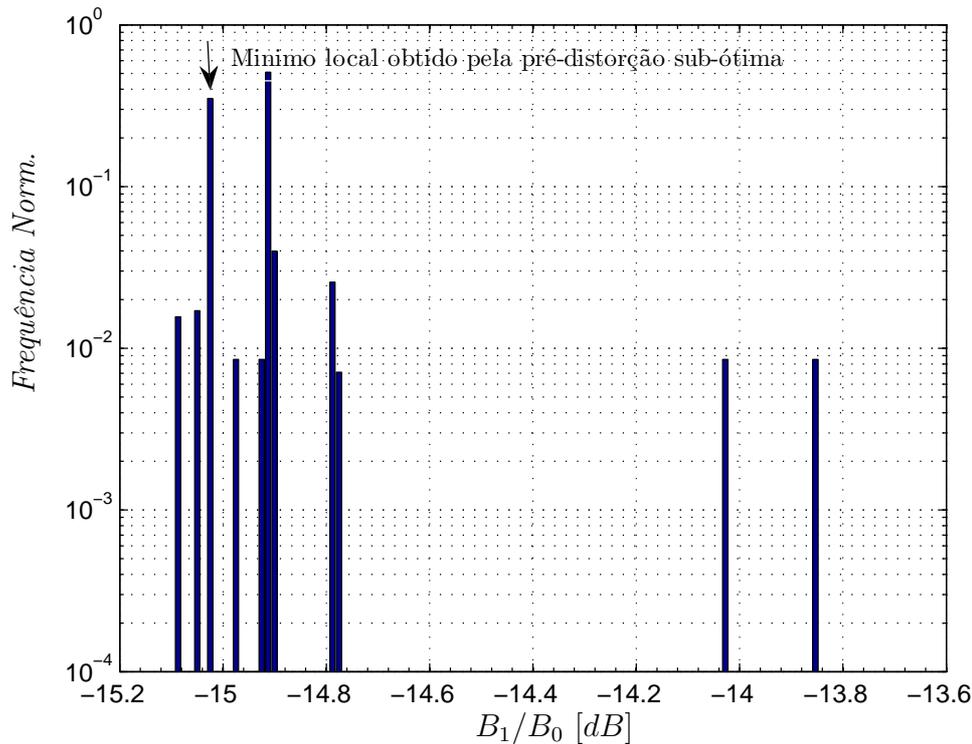


Figura 5.21: Histograma da potência do produto de intermodulação de 3ª ordem da estratégia 2 - caso 1, obtido a partir da geração de múltiplos pontos de inicialização na otimização.

A título de informação, se a curva dos coeficientes do sistema não linear fosse idêntica à aproximação da não-linearidade utilizada na obtenção dos parâmetros do sistema de pré-distorção, as potências seriam aquelas apresentadas na Tabela 5.12.

As Figuras 5.22, 5.23, e 5.24 ilustram graficamente os resultados da Tabela 5.11 para os pulsos retangular, Nyquist, e metade cosseno respectivamente. Em cada uma das Figuras são indicadas tres curvas de interesse, estas são: quando não se utiliza o sistema de pré-distorção, quando se utiliza o sistema de pré-distorção sub-ótimo, e quando se utiliza o sistema de pré-distorção ótimo.

Comparando as Figura 5.22, 5.23, e 5.24, pode-se afirmar que quando o símbolo OFDM é gerado utilizando o pulso de Nyquist, os efeitos das potências dos produtos de intermodulação, quando utiliza-se o sistema pré-distorção proposto neste trabalho, diminuem consideravelmente em comparação dos outros pulsos (retangular e metade cosseno).

Tabela 5.11: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 2 - caso 1, considerando-se a não-linearidade real (parâmetros do fabricante).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-14,6	-14,8	-18,9			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-17,0	-15,2	-17,6	-26,1	-30,6	-28,6
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-16,6	-15,4	-17,6	-26,1	-36,5	-33,1

Tabela 5.12: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 2 - caso 1, considerando-se a não-linearidade ideal(idêntica à utilizada na obtenção dos  $\delta$ ).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-11,7	-14,7	-17,8			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-15,0	-15,0	-17,0	-25,0	-29,5	-27,5
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-15,1	-15,1	-17,0	-25,0	-35,0	-32,3

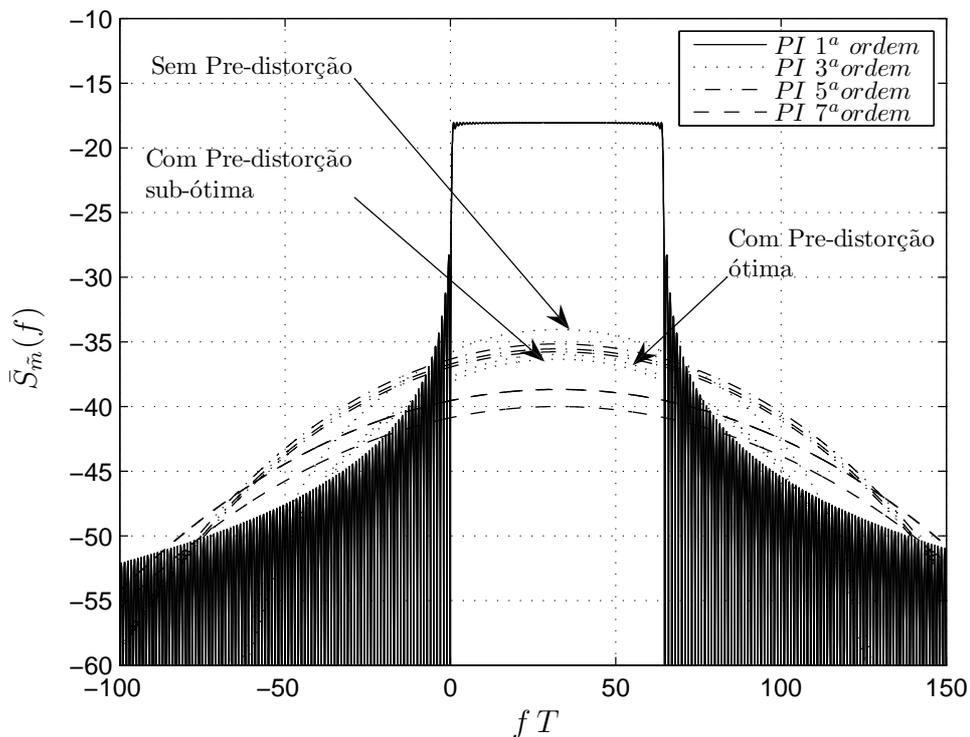


Figura 5.22: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção(sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 1 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso retângulo

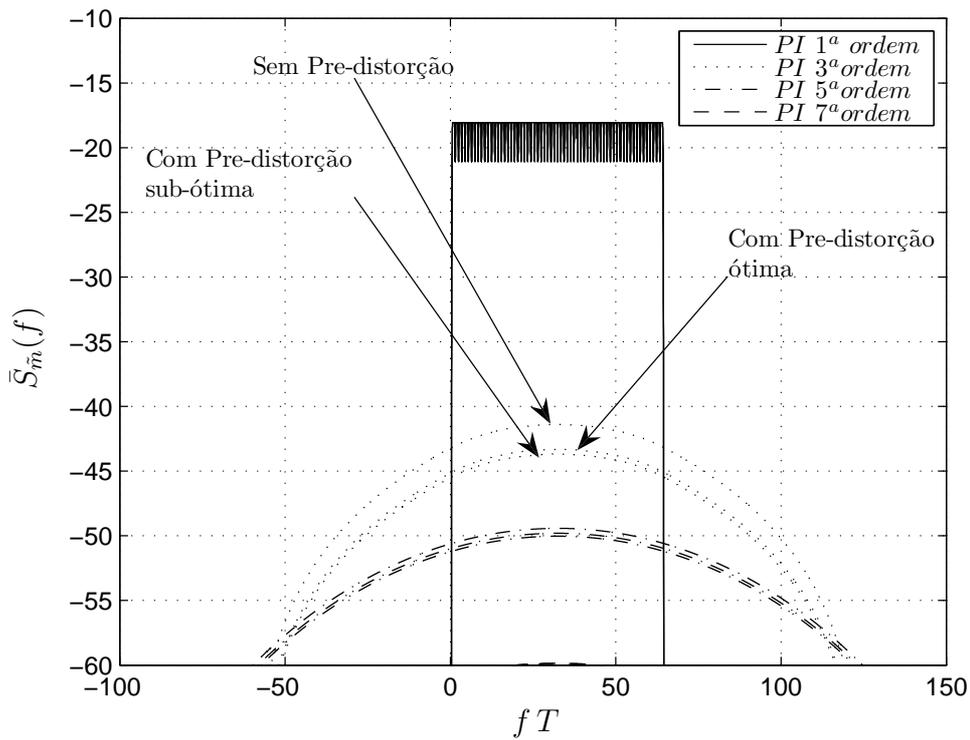


Figura 5.23: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 1 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso de Nyquist

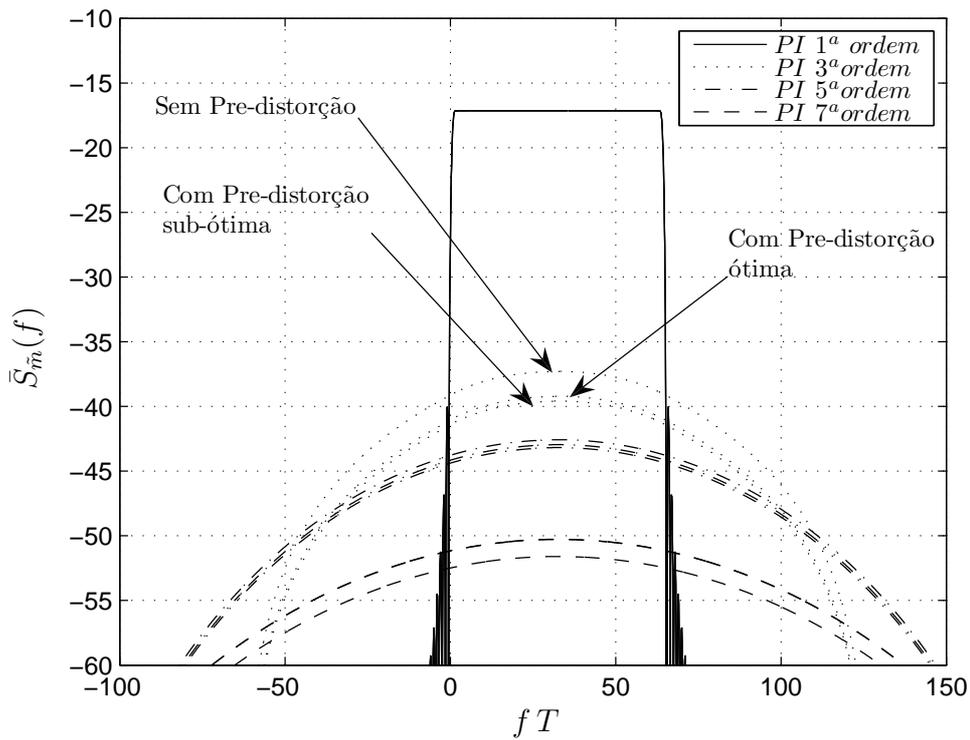


Figura 5.24: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 1 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso metade cosseno

**Caso 2**

Exatamente como o caso anterior, mantêm-se a mesma função objetivo, é dizer as potências que serão equalizadas são os produtos de intermodulação de 3ª e 5ª ordem, mas neste caso as restrições para as outras potências de intermodulação serão diferentes conforme são mostradas na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 2 da estratégia 2

<b>Função Objetivo</b>	$S = \{1, 2\}$
<b>Restrições</b>	$B_3 = h_3(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) < -17 \text{ dB}$ $B_\ell = h_\ell(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) < -20 \text{ dB}, \ell \geq 4$ $P_{\tilde{m}} = g(\boldsymbol{\delta}, P_{\tilde{x}}) = 1$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.14. Na primeira linha desta tabela estão indicadas as potências dos produtos de intermodulação das primeiras sete ordens quando não se utiliza o sistema de pré-distorção. Na segunda linha apresenta-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *sub-ótimo*, o qual foi obtido considerando-se como ponto inicial da otimização aquele que corresponde a não utilização da pré-distorção. Na terceira linha mostra-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *ótimo*, o qual foi obtido considerando-se o melhor mínimo local apresentado no histograma da Figura 5.25. Este histograma foi obtido a partir da geração aleatória de múltiplos valores de inicialização da otimização exposta no Capítulo 4 (os elementos do vector de parâmetros  $\boldsymbol{\delta}$  com parte real e parte imaginária uniformes em  $[-1 ; 1]$  e estatisticamente independentes). Note que o histograma da Figura 5.25 reflete a existência de mínimos locais bem definidos. Na Tabela 5.14 pode-se apreciar também que após da equalização das potências dos produtos de intermodulação expostas nas colunas  $B_1/B_0$  e  $B_2/B_0$ , estas não refletem valores equalizados. Isto se deve ao fato dos resultados da Tabela 5.8 se referem à composição do sistema não linear real con o sistema de pré-distorção que foi dimensionado utilizando um modelo obtido por aproximação polinomial (modelo ideal).

Neste caso pode-se apreciar uma melhoria aproximada de 2,5 dB na potência do produto de intermodulação de 3ª ordem, considerando que as potências dos produtos de intermodulação de 3ª e 5ª ordem foram equalizadas, entretanto as potências dos produtos de intermodulação de ordem superior respeitam de certa forma as restrições estabelecidas na Tabela 5.13.

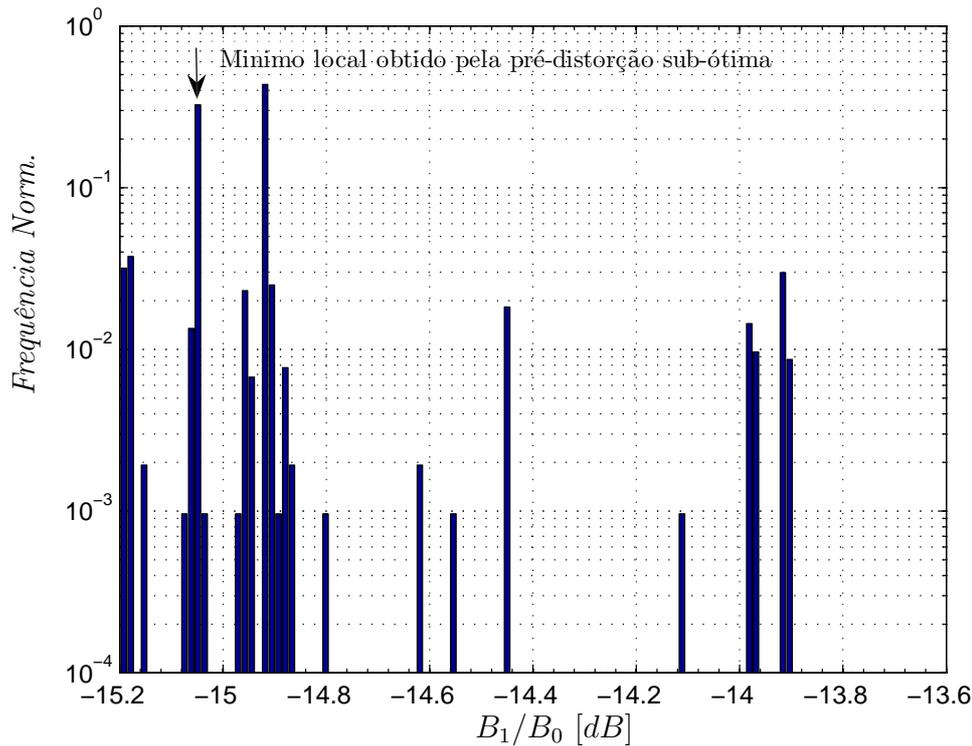


Figura 5.25: Histograma da potência do produto de intermodulação de 3ª ordem da estratégia 2 - caso 2, obtido a partir da geração de múltiplos pontos de inicialização na otimização.

A título de informação, se a curva dos coeficientes do sistema não linear fosse idêntica à aproximação da não-linearidade utilizada na obtenção dos parâmetros do sistema de pré-distorção, as potências seriam aquelas apresentadas na Tabela 5.15.

As Figuras 5.26, 5.27, e 5.28 ilustram graficamente os resultados da Tabela 5.14 para os pulsos retangular, Nyquist, e metade cosseno respectivamente. Em cada uma das Figuras são indicadas três curvas de interesse, estas são: quando não se utiliza o sistema de pré-distorção, quando se utiliza o sistema de pré-distorção sub-ótimo, e quando se utiliza o sistema de pré-distorção ótimo.

Comparando as Figuras 5.26, 5.27, e 5.28, pode-se afirmar que quando o símbolo OFDM é gerado utilizando o pulso de Nyquist, os efeitos das potências dos produtos de intermodulação, quando utiliza-se o sistema de pré-distorção proposto neste trabalho, diminuem consideravelmente em comparação dos outros pulsos (retangular e metade cosseno).

Tabela 5.14: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 2 - caso 2, considerando-se a não-linearidade real (parâmetros do fabricante).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-14,6	-14,8	-18,9			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-17,1	-15,2	-17,6	-23,9	-24,9	-22,5
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-16,7	-15,5	-17,6	-23,6	-27,2	-24,1

Tabela 5.15: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 2 - caso 2, considerando-se a não-linearidade ideal(idêntica à utilizada na obtenção dos  $\delta$ ).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-11,7	-14,7	-17,8			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-15,1	-15,1	-17,0	-22,8	-23,8	-21,4
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-15,2	-15,2	-17,0	-22,5	-26,2	-23,2

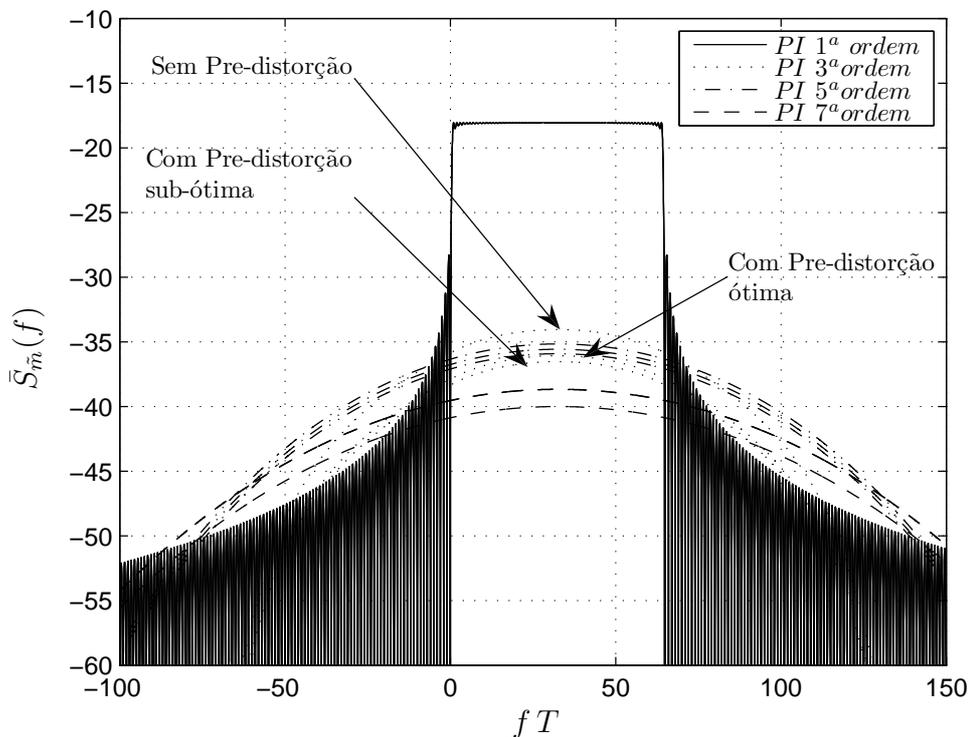


Figura 5.26: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção(sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 2 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso retângulo

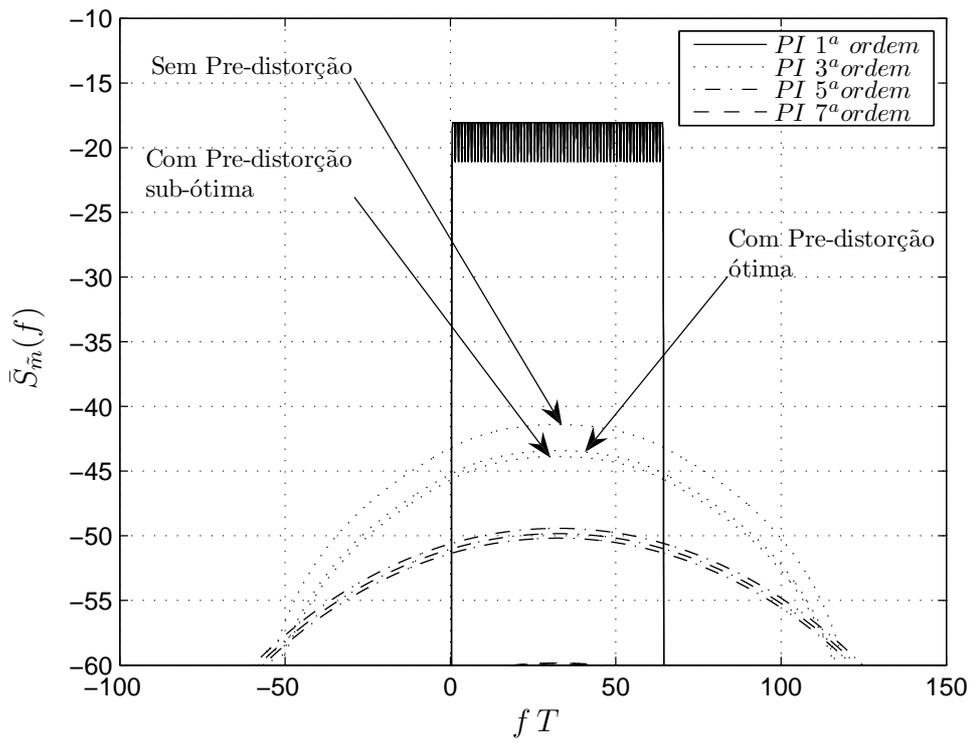


Figura 5.27: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 2 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso de Nyquist

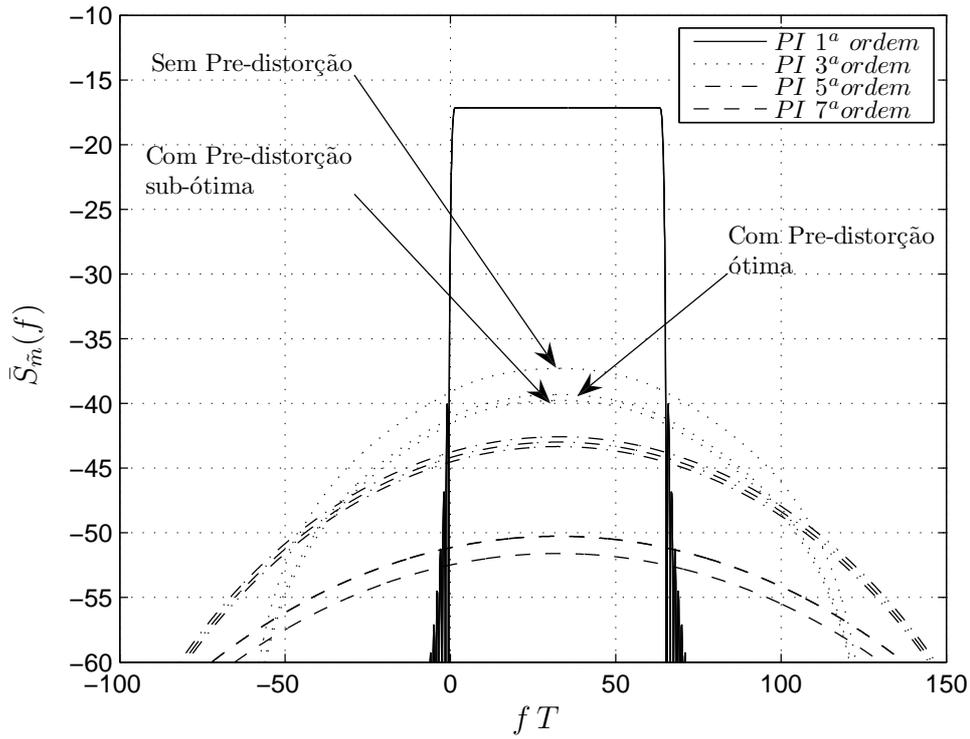


Figura 5.28: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 2 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso metade cosseno

**Caso 3**

Nesta caso as potências a serem equalizadas são as dos produtos de intermodulação de 3ª, 5ª, e 7ª ordem (a função objetivo), as restrições para as outras potências de intermodulação são amostradas na Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 3 da estratégia 2

<b>Função Objetivo</b>	$\mathcal{S} = \{1, 2, 3\}$
<b>Restrições</b>	$B_\ell = h_\ell(\boldsymbol{\delta}, P_{\bar{x}}) < -20 \text{ dB}, \ell \geq 4$ $P_{\bar{m}} = g(\boldsymbol{\delta}, P_{\bar{x}}) = 1$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.17. Na primeira linha desta tabela estão indicadas as potências dos produtos de intermodulação das primeiras sete ordens quando não se utiliza o sistema de pré-distorção. Na segunda linha apresenta-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *sub-ótimo*, o qual foi obtido considerando-se como ponto inicial da otimização aquele que corresponde a não utilização da pré-distorção. Na terceira linha mostra-se as potências dos produtos de intermodulação quando utiliza-se o sistema de pré-distorção *ótimo*, o qual foi obtido considerando-se o melhor mínimo local apresentado no histograma da Figura 5.29. Este histograma foi obtido a partir da geração aleatória de múltiplos valores de inicialização da otimização exposta no Capítulo 4 (os elementos do vector de parâmetros  $\boldsymbol{\delta}$  com parte real e parte imaginária uniformes em  $[-1 ; 1]$  e estatisticamente independentes). Note que o histograma da Figura 5.29 reflete a existência de mínimos locais bem definidos. Na Tabela 5.17 pode-se apreciar também que após da equalização das potências dos produtos de intermodulação expostas nas colunas  $B_1/B_0$ ,  $B_2/B_0$ , e  $B_3/B_0$  estas não refletem valores equalizados. Isto se deve ao fato dos resultados da Tabela 5.8 se referem à composição do sistema não linear real con o sistema de pré-distorção que foi dimensionado utilizando um modelo obtido por aproximação polinomial (modelo ideal).

Neste caso pode-se apreciar uma melhoria aproximada de 2,8 dB na potência do produto de intermodulação de 3ª ordem, considerando que as potências dos produtos de intermodulação de 3ª, 5ª, e 7ª ordem foram equalizadas, enquanto as potências dos produtos de intermodulação de ordem superior respeitam de certa forma as restrições estabelecidas na Tabela 5.16.

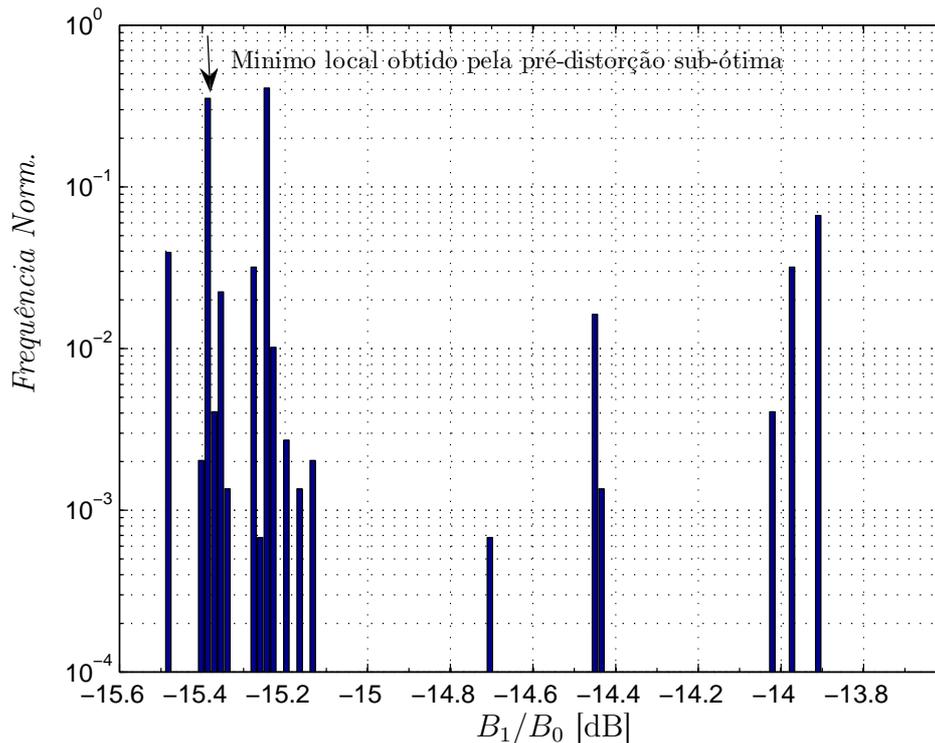


Figura 5.29: Histograma da potência do produto de intermodulação de 3ª ordem da estratégia 2 - caso 3, obtido a partir da geração de múltiplos pontos de inicialização na otimização.

A título de informação, se a curva dos coeficientes do sistema não linear fosse idêntica à aproximação da não-linearidade utilizada na obtenção dos parâmetros do sistema de pré-distorção, as potências seriam aquelas apresentadas na Tabela 5.18.

As Figuras 5.30, 5.31, e 5.32 ilustram graficamente os resultados da Tabela 5.17 para os pulsos retangular, Nyquist, e metade cosseno respectivamente. Em cada uma das Figuras são indicadas três curvas de interesse, estas são: quando não se utiliza o sistema de pré-distorção, quando se utiliza o sistema de pré-distorção sub-ótimo, e quando se utiliza o sistema de pré-distorção ótimo.

Comparando as Figuras 5.30, 5.31, e 5.32, pode-se afirmar que quando o símbolo OFDM é gerado utilizando o pulso de Nyquist, os efeitos das potências dos produtos de intermodulação, quando utiliza-se o sistema de pré-distorção proposto neste trabalho, diminuem consideravelmente em comparação com outros pulsos (retangular e metade cosseno).

Tabela 5.17: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 2 - caso 3, considerando-se a não-linearidade real (parâmetros do fabricante).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-14,6	-14,8	-18,9			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-17,4	-15,5	-16,1	-21,2	-22,1	-21,1
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-16,6	-15,9	-16,1	-21,4	-25,1	-23,5

Tabela 5.18: Potência normalizada dos sete primeiros produtos de intermodulação(em dB)da estratégia 2 - caso 3, considerando-se a não-linearidade ideal(idêntica à utilizada na obtenção dos  $\delta$ ).

	$\frac{B_0}{B_0}$	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{B_2}{B_0}$	$\frac{B_3}{B_0}$	$\frac{B_4}{B_0}$	$\frac{B_5}{B_0}$	$\frac{B_6}{B_0}$
Sem Pré-distorção	0	-11,7	-14,7	-17,8			
Com Pré-distorção (Sub-ótima)	0	-15,4	-15,4	-15,4	-20,2	-21,1	-20,1
Com Pré-distorção (Ótima)	0	-15,5	-15,5	-15,5	-20,4	-24,2	-22,4

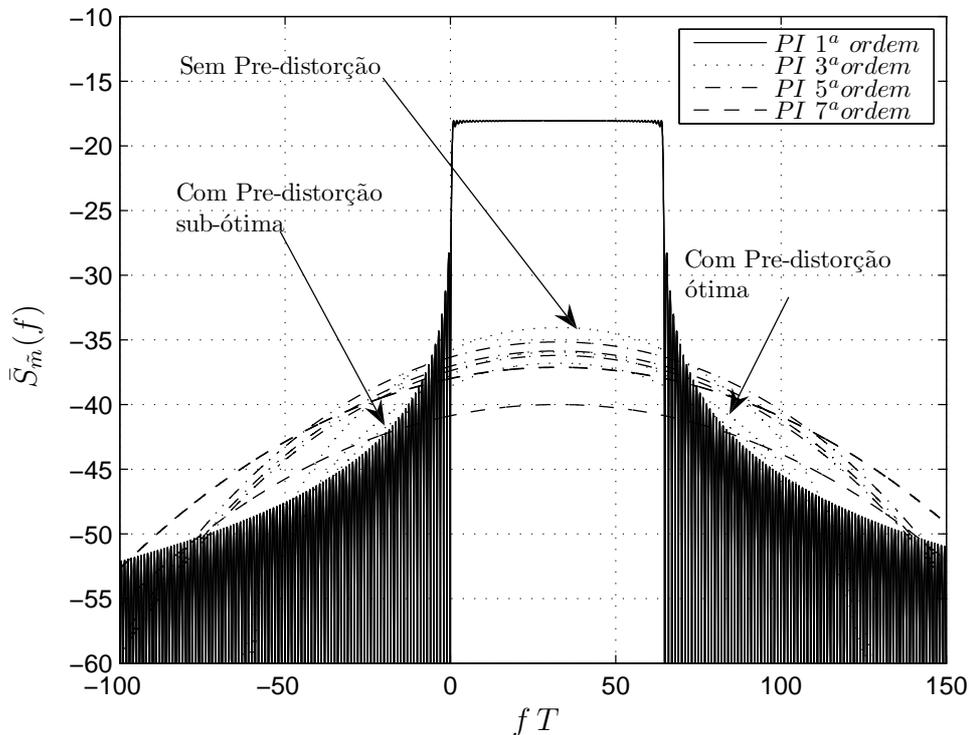


Figura 5.30: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção(sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 3 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso retângulo

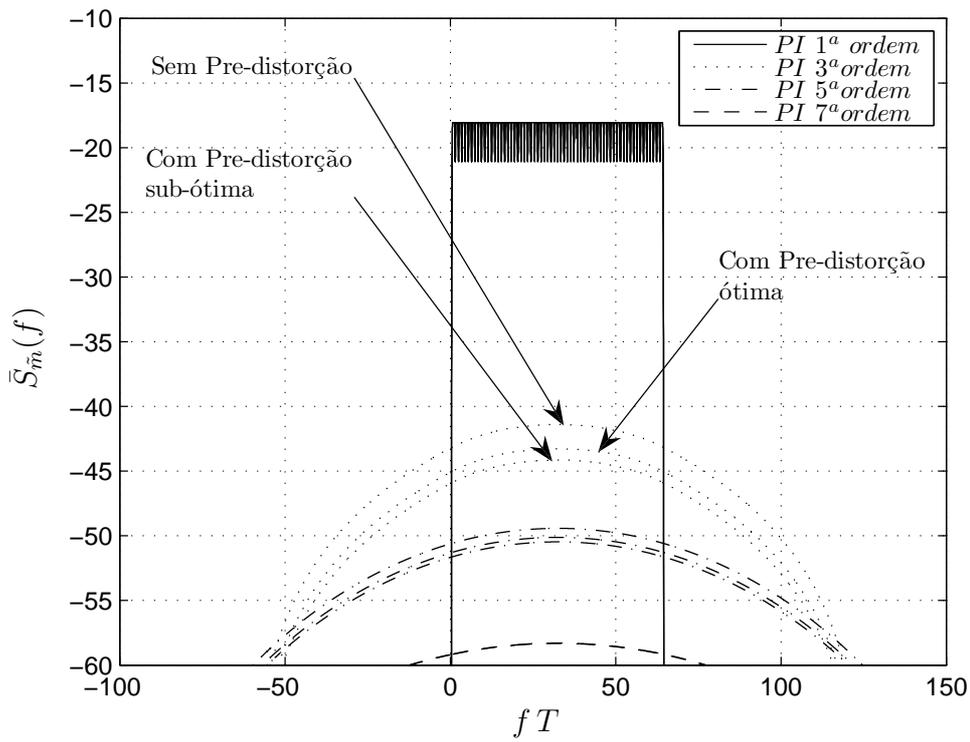


Figura 5.31: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 3 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso de Nyquist

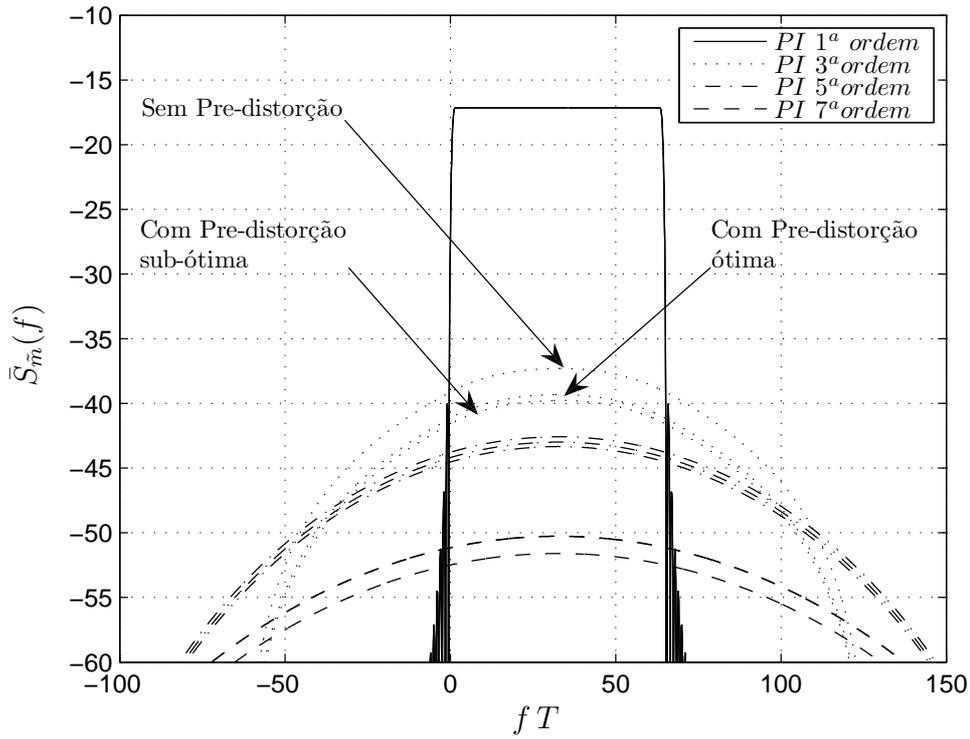


Figura 5.32: Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e a intermodulação produzida, quando não utiliza-se a pré-distorção e quando utiliza-se o sistema de pré-distorção (sub-ótimo e ótimo) considerando-se as condições do caso 3 na estratégia 2. Utilizando-se como pulso formatador ao pulso metade cosseno