

**Dick Carrillo Melgarejo**

**Redução dos efeitos de canais não-lineares  
sobre sinais OFDM: um esquema de  
pré-distorção não-linear baseado em série de  
potências**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro  
Abril de 2008



**Dick Carrillo Melgarejo**

**Redução dos efeitos de canais não-lineares  
sobre sinais OFDM: um esquema de  
pré-distorção não-linear baseado em série de  
potências**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Mauro Pedro Fortes**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. Weiler Alves Finamore**

Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Paulo Roberto R. L. Nunes**

IME

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Abril de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Dick Carrillo Melgarejo**

Graduou-se em Engenharia Electrónica (Universidad Nacional Mayor de San Marcos)

Ficha Catalográfica

Carrillo Melgarejo, Dick

Redução dos efeitos de canais não-lineares sobre sinais OFDM: um esquema de pré-distorção não-linear baseado em série de potências / Dick Carrillo Melgarejo; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2008.

v., 87 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Não-linearidade. 3. OFDM. 4. Intermodulação. 5. Pré-distorção. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

A minha família, em especial a meu pai Carmelo e a minha mãe Melania, por tudo.

Ao Prof. José Mauro Pedro Fortes, meu orientador, pelo exemplo, entusiasmo de ensinar, e encaminhamento do presente trabalho.

Aos professores do CETUC, em especial aos professores Weiler e Raimundo, que agregaram conhecimento valioso à minha bagagem profissional.

Aos funcionários e colegas do CETUC, em especial a Tiago Vinhoza, Franklin Sanchez, Juan Otarola e José Antonio Seibnitz, pela compreensão e amizade.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Carrillo Melgarejo, Dick; Fortes, José Mauro Pedro. **Redução dos efeitos de canais não-lineares sobre sinais OFDM: um esquema de pré-distorção não-linear baseado em série de potências**. Rio de Janeiro, 2008. 87p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os principais problemas causados pela passagem de múltiplas portadoras por dispositivos não lineares são, conhecidamente, a conversão AM/AM, a conversão AM/PM, e a intermodulação. Estes problemas estão presentes tanto na transmissão via satélite, onde amplificadores de alta potência (HPAs) e *transponders* não lineares estão presentes, quando na radiodifusão terrestre onde, com o objetivo de ampliar ao máximo o tamanho da área geográfica na qual o serviço é oferecido, são utilizados amplificadores de alta potência operando em sua região não-linear. Neste contexto encontram-se os sinais multiportadora do tipo OFDM, amplamente utilizados na radiodifusão de sinais digitais de TV. Com o objetivo de minorar efeitos de canais não lineares sobre sinais OFDM, o presente trabalho propõe a utilização de um esquema de pré-distorção não linear modelado matematicamente através de uma série complexa de potências. Duas estratégias são consideradas no dimensionamento do esquema de pré-distorção: a redução da soma das potência dos produtos de intermodulação de ordens especificadas e a equalização das potências dos diversos produtos de intermodulação. Análises de configurações baseadas nestas duas estratégias são apresentadas juntamente com resultados numéricos envolvendo situações específicas de interesse.

## Palavras-chave

Não-linearidade. OFDM. Intermodulação. Pré-distorção.

## Abstract

Carrillo Melgarejo, Dick; Fortes, José Mauro Pedro. **Reduction of non linearity effects on OFDM signals: a pre-distortion scheme based on power series**. Rio de Janeiro, 2008. 87p. MsC Thesis — Department of Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main problems of multiple carriers through non-linear devices are, AM / PM conversion, conversion AM / PM conversion, and intermodulation. These problems are usually present in satellite transmissions, where high-power amplifiers (HPAs) and nonlinear transponders are used, as well as in terrestrial broadcasting systems where, in order to enlarge the service area (geographical area in which the service is offered). High-power amplifiers operating in their non-linear region are used. The multicarrier transmission called OFDM, which is widely used in TV broadcasting digital signals falls in this context. In order to alleviate the effects of nonlinear channels on OFDM signals, the present study suggests the use of a pre-distortion system mathematically described through a complex power series. Two Strategies are considered in order to determine the pre-distortion system parameters: the reduction of the intermodulation power sum associated to intermodulation products of any specified order, and the equalization of the intermodulation power associated to intermodulation product of various orders. Analysis of configurations based on these two strategies are presented together with numerical results involving situations of specific interest

## Keywords

Non-linearity. OFDM. Intermodulation. Pre-distortion.

# Sumário

1	Introdução	14
2	Descrição do Problema	17
3	Esquema de pré-distorção	22
3.1	Caracterização do sistema composto	24
3.1.1	Sistema não Linear equivalente	24
3.1.2	Sistema de pré-distorção	26
3.1.3	Sistema Composto	27
3.2	Intermodulação produzida pelo Sistema Composto	29
4	Redução dos efeitos de inter-modulação produzidos pelo sistema composto	32
4.1	Estratégias	32
4.2	Restrições a serem consideradas na redução dos efeitos de intermodulação	34
5	Resultados Numéricos	37
5.1	Considerações iniciais	37
5.1.1	A não-linearidade	37
5.1.2	O sinal de entrada da não-linearidade	39
5.2	Exemplos de aplicação	45
5.2.1	Exemplos da estratégia 1	45
5.2.2	Exemplos da estratégia 2	61
6	Conclusões	76
	Referências Bibliográficas	78
A	Expressão analítica dos coeficientes do Sistema Composto	80
B	Autocorrelação e Densidade Espectral de potência da envoltória complexa do sinal OFDM	84

## Lista de figuras

2.1	Diagrama de blocos do sinal passando por um dispositivo não-linear	18
2.2	Diagrama de blocos de um dispositivo não-linear com memória	18
2.3	Diagrama de blocos de um dispositivo não-linear sem memória	19
3.1	Diagrama geral do sistema composto, o sistema de pré-distorção e o sistema não linear.	22
3.2	Diagrama de blocos de um dispositivo não-linear com memória	22
3.3	Diagrama geral do sistema de pré-distorção com o sistema não linear	22
3.4	Diagrama do sistema de pré-distorção e o sistema não linear	23
3.5	Diagrama do sistema de pré-distorção e o sistema não linear detalhado	23
3.6	Diagrama do <i>sistema composto</i> com parâmetro $\alpha$ , composto pelo sistema de pré-distorção com parâmetro $\delta$ e o sistema não linear equivalente com parâmetro $\gamma'$ .	24
3.7	Sistema Não Linear Equivalente	25
3.8	Sistema Não Linear Equivalente com seus respectivos sinais de entrada e saída	25
3.9	Sistema de pré-distorção com parâmetro $\alpha$	26
3.10	Sistema geral do sistema composto	27
3.11	Diagrama do <i>sistema composto</i> com parâmetro $\alpha$	30
4.1	Diagrama do sistema de pré-distorção com seus respectivos sinais de entrada e saída	34
5.1	Conversão AM/AM: curva do fabricante (linha tracejada) e aproximação polinomial com $N = 3$ (linha contínua).	38
5.2	Conversão AM/PM: curva do fabricante (linha tracejada) e aproximação polinomial com $N = 3$ (linha contínua).	38
5.3	Pulso retangular normalizado	39
5.4	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$ para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras.	40
5.5	Pulso Nyquist normalizado	41
5.6	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$ , para sinais OFDM com pulso Nyquist e 64 portadoras.	42
5.7	Pulso metade cosseno normalizado	43
5.8	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$ , para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.	44
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.	46
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.	48



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.	49
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.	50
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.	52
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.	53
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	54
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	55
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.	57
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 retangulo	58
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	59
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	60

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.	62
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	63
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	64
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	65
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.	67
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	68
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	69
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	70
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.	72
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	73

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	74
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	75
B.1	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}_k(t)$	86

## Lista de tabelas

5.1	Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 1 da estratégia 1	45
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).	47
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 $\delta$ ).	47
5.4	Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 2 da estratégia 1.	51
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).	53
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 $\delta$ ).	53
5.7	Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 3 da estratégia 1	56
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).	58
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 $\delta$ ).	58
5.10	Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 1 da estratégia 2	61
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).	63
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 $\delta$ ).	63
5.13	Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 2 da estratégia 2	66
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).	68
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 $\delta$ ).	68
5.16	Função objetivo e restrições consideradas na minimização no caso 3 da estratégia 2	71

- 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). 73
- 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  $\delta$ ). 73