

## COMPORTAMENTO DO SISTEMA OFDM COM MODULAÇÕES 16QAM, MSK E $\pi/4$ DQPSK SOB RUÍDO IMPULSIVO

Elvio César GIRAUDO<sup>1,2</sup>  
Sérgio Antenor de CARVALHO<sup>1,2</sup>  
Maria do Socorro RIBEIRO DE OLIVEIRA<sup>2</sup>

- RESUMO: Este trabalho analisa e compara o desempenho do esquema de multiplexação OFDM combinado com os mapeamentos 16QAM, MSK e  $\pi/4$ DQPSK separadamente. Um modelo de ruído impulsivo, com estatística Bernoulli–Gaussiano é utilizado como interferência, o valor médio e a variância da distribuição Gaussiana podem ser alterados usando um parâmetro de controle. Para avaliar o comportamento dos sistemas sob ruído impulsivo e comparar o desempenho entre eles, curvas da BER são calculadas. As simulações mostram que o aumento do valor médio do ruído impulsivo leva a curva da BER à saturação, mantendo-se constante a potência total do ruído impulsivo no período do símbolo OFDM.
- PALAVRAS-CHAVE: Ruído Impulsivo; OFDM; estatística Bernoulli–Gaussiano.

### 1 Introdução

O ruído impulsivo é um problema significativo para algumas aplicações em OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) como, por exemplo: nos sistemas DVB (Digital Video Broadcasting), Tório e Sánchez (2009); nos sistemas de comunicação PLC (Power Line Communications), Ndo et al. (2010); na transmissão acústica submarina, Shen et al. (2009). Como fontes de ruído impulsivo têm-se, por exemplo: ignição automobilística, fios de alta tensão, secadores de cabelo, fornos de microondas, etc. A técnica de transmissão OFDM é muito robusta e adequada para combater os efeitos negativos do ruído impulsivo na transmissão de sinais de informação, como mostra os trabalhos de Bin Ahmad Kayani e Bin Alias (2009), Rouissi et al. (2009), Ndo et al. (2009). Tem sido observado na prática que a degradação nos sistemas DVB, causada por ruído impulsivo, depende somente da energia total do ruído dentro do período de símbolo OFDM, e não da forma como a energia é distribuída neste período, isto tem sido chamado de extensão do *bucket effect*. Uma explicação teórica desta observação prática, Suraweera e Armstrong (2004), esta fundamentada no fato que o sistema OFDM é baseado na DFT (*Discrete Fourier Transform*), ou seja, quando o ruído na entrada do receptor é impulsivo,

---

<sup>1</sup> Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – NUCEMA, Núcleo de Compatibilidade Eletromagnética Antenas e Microondas – NUTEC, Campus do Pici, CEP 60451-970, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: [elvio@ufc.br](mailto:elvio@ufc.br) / [antenor@ufc.br](mailto:antenor@ufc.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará – UFC, Departamento de Engenharia de Teleinformática - DETI, Centro de Tecnologia - CT, Caixa Postal 6007, CEP: 60.455-970, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: [ribms@hotmail.com](mailto:ribms@hotmail.com)

após a DFT ele é aproximadamente Gaussiano. O efeito do espalhamento da DFT, independente do ruído, faz com que a taxa de erro observada seja aproximadamente igual, como se o ruído fosse Gaussiano, com a mesma energia total por símbolo. Em Ghosh (1996) foram apresentados resultados para o sistema QAM multiportadora e de portadora única, sobre os efeitos de ruído impulsivo. Em Rouissi et al. (2009), encontramos simulações usando o mapeamento QPSK (*Quadrature Phase-shift Keying*), já em Ndo et al. (2009) foi simulado o OQAM (*Offset Quadrature Amplitude Modulation*) e em Nojiri et al. (2007), o mapeamento MFSK (*M-ary Frequency-shift Keying*) foi utilizado.

Neste trabalho apresentamos resultados para os mapeamentos 16QAM, MSK e  $\pi/4$ DQPSK no ambiente OFDM, comparando os resultados. Usamos o modelo de ruído impulsivo tendo como base a estatística Bernoulli–Gaussiano, Nikookar e Nathoeni (2002). Neste modelo, definimos um novo parâmetro  $\beta$ , que vincula a média e a variância do ruído impulsivo. Com as variações de  $\beta$ , criamos diferentes situações de perturbação pelo ruído, variando a potência CC e AC. Este modelo de ruído impulsivo é utilizado para comparar os desempenhos entre os sistemas anteriormente citados. As simulações mostram que o aumento da componente CC do ruído impulsivo leva a curva da BER (*Bit Error Rate*) à saturação, enquanto a potência total do ruído impulsivo se mantém constante no período do símbolo OFDM, fato que pode ser controlado ajustando o algoritmo de decisão para compensar esta componente do ruído.

Este trabalho está organizado como segue: na seção 2 apresentamos o modelo de canal, com ruído impulsivo Bernoulli–Gaussiano e introduzimos o parâmetro  $\beta$ ; na seção 3 discutimos os resultados das simulações e na conclusão fazemos um resumo dos resultados e das nossas conclusões.

## 2 Ruído impulsivo Bernoulli–Gaussiano

O canal de transmissão de dados usado neste trabalho é modelado como um canal com ruído impulsivo aditivo, caracterizado por um comportamento estatístico Bernoulli–Gaussiano, Glen et al. (2004). Este ruído é modelado como:

$$i(n) = b(n)g(n). \quad (1)$$

Ele é representado por uma variável aleatória discreta  $b(n)$  de média  $\alpha$  e variância  $\alpha(1-\alpha)$  com estatística de Bernoulli, que é modulada em amplitude por uma variável aleatória contínua com distribuição Gaussiana  $g(n)$ , com média e variância  $m_g$  e  $\sigma_g^2$ , respectivamente. Estas variáveis são consideradas independentes. Assim  $i(n)$  incorpora a mudança de amplitude de  $b(n)$  conforme as variações da variável  $g(n)$ , como ilustrado na Figura 1. A função densidade de probabilidade do ruído  $i(n)$ , pode ser expressa como em Nikookar e Nathoeni (2002):

$$F_i(i) = (1-\alpha) (1/\sqrt{2\pi\sigma_g^2}) \exp[-(i-m_g)^2/2\sigma_g^2] + \alpha \delta(i), \quad (2)$$

onde  $\delta(i)$  é a função impulso unitário.

Neste trabalho, para facilitar a manipulação da variável Gaussiana, introduzimos o parâmetro  $\beta$ , definido por:

$$\beta = \frac{m_g}{\sigma_g}, \quad (3)$$

que relaciona o valor médio e o desvio padrão de  $g(n)$ . A média e a variância do ruído impulsivo serão, respectivamente:

$$m_i = \alpha m_g \quad (4)$$

e

$$\sigma_i^2 = m_g \alpha (1 - \alpha) + \sigma_g^2 [2\alpha - \alpha^2]. \quad (5)$$

A sequência  $i(n)$  de impulsos, ponderados com estatística Gaussiana, possui potência total (potência CC associada ao valor médio e potência AC vinculada à variância):

$$P_i = \sigma_g^2 [\alpha^2 (\beta^2 - 1) + 2\alpha] + m_g \alpha (1 - \alpha). \quad (6)$$

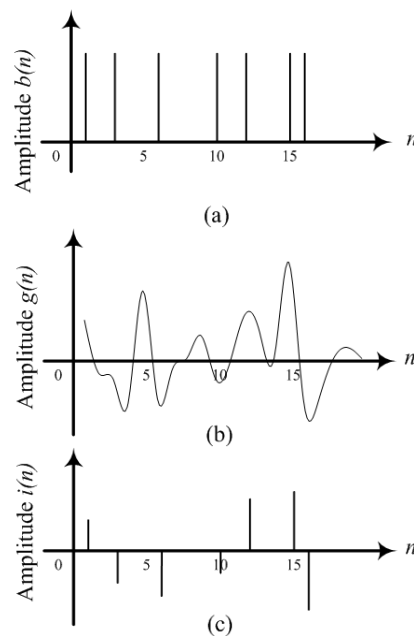


Figura 1 - Ruído impulsivo com distribuição Bernoulli–Gaussiano: (a) variável aleatória  $b(n)$  com distribuição de Bernoulli; (b) variável aleatória Gaussiana  $g(n)$ ; (c) ruído impulsivo  $i(n)$ .

O parâmetro  $\beta$ , conforme definido em (3), é utilizado para criar diversas situações de ruído impulsivo. Com o aumento de  $\beta$ , é imposto que o valor médio do ruído aumente enquanto sua variância diminui de forma a manter a potência total do ruído inalterada. Desta forma podemos variar a média e a variância da variável aleatória Gaussiana para uma determinada potência total do ruído, que é proporcional à relação entre a energia de bit e a densidade espectral de potência do ruído  $E_b/N_0$ . Desta forma podemos analisar e comparar o comportamento dos esquemas de modulação estudados no trabalho.

Um exemplo que mostra como  $\beta$  atua sobre o valor da média e da variância do ruído, é apresentado na Figura 2. A constelação de sinais do sistema 16QAM é contaminada por ruído  $i(n)$  para as situações em que  $E_b/N_0 = 3$  dB com  $\beta = 0$  e  $\beta = 3$ . A potência total do ruído sobre a constelação é mantida constante para os dois valores de  $\beta$ . Para  $\beta = 0$ , a média do ruído é nula  $m_i = 0$  e a variância do ruído é igual à potência total  $\sigma_i^2 = P_i$ , como pode ser apreciada na Figura 2(a). Neste caso não é possível distinguir os pontos de sinal na constelação. Na situação em que  $\beta = 3$ , tem-se a relação  $m_i = 3\alpha\sigma_g$ . Como existe um valor médio do ruído, a constelação é transladada e a variância do ruído é diminuída no quadrado deste valor  $\sigma_i^2 = P_i - 9\alpha^2\sigma_g^2$ , mantendo-se constante a potência total do ruído, como é ilustrado na Figura 2(b). Neste caso podemos observar que os pontos de sinal já são distinguíveis, por que diminuímos a potência AC.

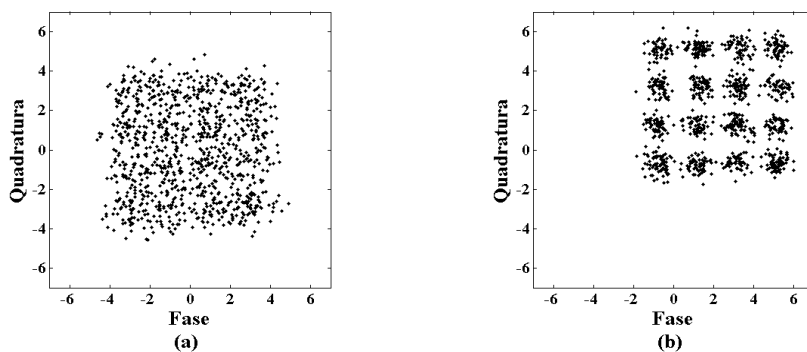


Figura 2 - Componentes do sinal em fase e quadratura, no ponto de recepção do sistema 16QAM, com  $E_b/N_0 = 3$  dB. (a)  $\beta = 0$ . (b)  $\beta = 3$ .

Para incorporar o ruído impulsivo no canal, decompomos  $i(n)$  nas suas componentes em fase e quadratura e as adicionamos ao sinal modulado quando este passa pelo canal. Cada uma dessas componentes do ruído é gerada com estatísticas independentes uma da outra.

### 3 Simulação do OFDM com mapeamentos 16QAM, MSK e $\pi/4$ DQPSK

Nesta seção analisamos o desempenho em termos da taxa de erro de bit BER como função da relação entre a energia de bit e a densidade espectral de potência do ruído  $E_b/N_0$  do sistema mostrado na Figura 3. O modulador, que realiza o mapeamento na técnica OFDM, juntamente com a IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) compõe o transmissor OFDM, enquanto que a DFT juntamente com o demodulador formam o receptor OFDM. Os conversores S/P e P/S transformam a sequência de dados de serial para paralelo e de paralelo para serial, respectivamente. O canal é o meio de transmissão do sistema e onde adicionamos o ruído impulsivo  $i(n)$  como definido em (1) ao sinal de informação que transita por ele. Na simulação computacional, usamos o método de Monte Carlo. Incorporamos no esquema OFDM, separadamente, o sistema coerente 16QAM, o MSK de fase mínima, e o  $\pi/4$ DQPSK não coerente.

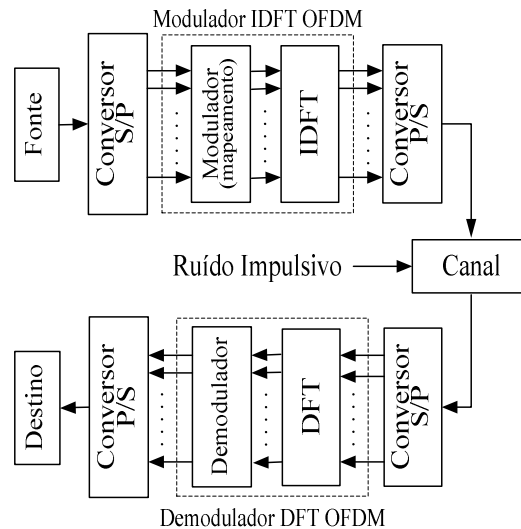


Figura 3 - Diagrama em blocos do sistema de multiplexação OFDM utilizado.

Nas Figuras 4, 5 e 6, apresentamos os desempenhos dos sistemas 16QAM, MSK e  $\pi/4$ DQPSK, respectivamente, usados como mapeamento no esquema OFDM. Nos três casos empregou-se 1024 portadoras com 100 símbolos OFDM, empregando-se  $32 t_b$  para o período de guarda, onde  $t_b$  é o tempo de bit. Em todos os casos usamos  $\alpha = 0,1$ .

Como era de se esperar, as curvas da BER versus  $E_b/N_0$ (dB) dos sistemas com portadora única (curvas ■) e dos multiportadora (curvas ▲) são as mesmas, quando simulados com ruído aditivo, branco e Gaussiano, já que o sistema OFDM é transparente para este tipo de ruído. Para ruído impulsivo com  $\beta = 0$  (ruído com média nula, somente potência AC), os três sistemas de modulações multiportadora (curvas ▼) apresentam melhor desempenho frente aos sistemas de portadora única (curvas ■). Quando  $\beta = 1$  (a potência AC é igual à potência DC), os desempenhos são ainda melhores (curvas ◆), mas existe uma componente média de ruído que leva ao ponto de saturação da curva da BER para valores constantes entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$ , podemos observar isto nas Figuras 4, 5 e 6. As curvas para o sistema MSK, tanto para portadora única como para multiportadora, aparentam serem menos perturbadas pelo ruído impulsivo. Até mesmo a região da saturação da curva da BER não é tão pronunciada como nos outros sistemas. Uma explicação para isto, é que este sistema carrega a informação na frequência da portadora, e o ruído impulsivo afeta mais na amplitude e na fase da portadora, como nos outros dois sistemas. Para  $\beta = 3$ , a média do ruído impulsivo é alta, e a resposta dos sistemas é deficiente (curvas ◆), embora a variância do ruído tenha diminuído consideravelmente. Temos situações de ruído ainda mais agressivas, nos sistemas com portadora única 16QAM, MSK e  $\pi/4$ DQPSK (curvas ●). Estas curvas apresentam menor desempenho em relação aos casos anteriores, os quais foram alterados pelo valor médio do ruído.

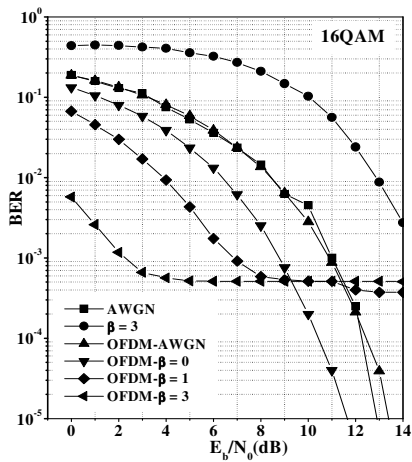


Figura 4 - Curvas da BER versus  $E_b/N_0$ (dB) para os sistemas 16QAM, de portadora única e multiportadora OFDM, nos casos com AWGN e ruído impulsivo.

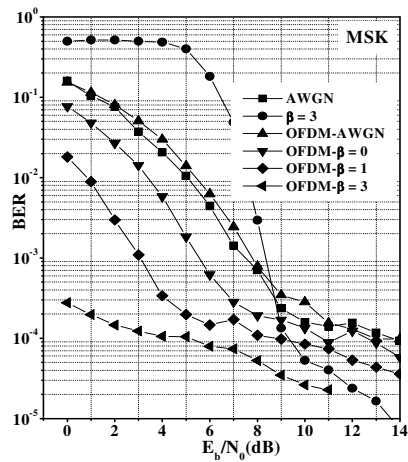


Figura 5 - Curvas da BER versus  $E_b/N_0$ (dB) para os sistemas MSK, de portadora única e multiportadora OFDM, nos casos com AWGN e ruído impulsivo.

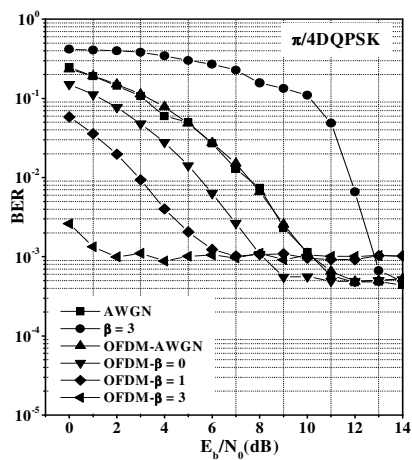


Figura 6 - Curvas da BER versus  $E_b/N_0$ (dB) para os sistemas  $\pi/4$ DQPSK, de portadora única e multiportadora OFDM, nos casos com AWGN e ruído impulsivo.

As Figuras 4, 5 e 6 mostram que, nos sistemas multiportadora OFDM, seus desempenhos em termos da BER são alterados, quando o ruído apresenta valor médio. O que também acontece para os sistemas de portadora única, onde seus desempenhos são consideravelmente mais afetados, em ambos os casos, as curvas de BER entram em

saturação para valores de  $\beta > 0$ , isto é, para valor médio não nulo do ruído. Este problema é solucionado no estágio de decisão do sistema, removendo a componente de CC presente no sinal de observação. Isto é obtido com um sistema AGC (*Automatic Gain Control*), sistema realimentado no estágio de decisão que compensa com um valor oposto à componente CC, resultando desta forma a remoção da mesma. Quando a componente CC do ruído, não esta presente no canal, existe somente potência AC do ruído sobre o sinal de informação que percorre o canal. Este é o caso de  $\beta = 0$  nas simulações computacionais onde as curvas mostram um comportamento mais satisfatório, sem problemas de saturação que tínhamos no caso de  $\beta > 0$ . Portanto, visando melhorar o desempenho dos sistemas na presença de ruído impulsivo com níveis de CC, um sistema de compensação do ganho, como o AGC, é necessário para evitar saturação da curva de BER, cujos desempenhos são apresentados nas Figuras 4, 5 e 6 para  $\beta = 0$ .

### Conclusão

Neste trabalho apresentamos, para sistemas de comunicação digital um modelo de canal do tipo impulsivo com características estatísticas de Bernoulli–Gaussiano. Usamos um parâmetro de peso do ruído impulsivo definido como  $\beta$ , que indica a razão entre o valor médio da distribuição Gaussiana e seu desvio padrão. Para qualquer valor do parâmetro  $\beta$  a potência total do ruído impulsivo é mantida constante o que permite comparar os resultados. Este parâmetro foi utilizado para testar o desempenho dos sistemas, observando o comportamento da BER em função da  $E_b/N_0$ (dB).

Como medida de proteção das agressividades do ruído impulsivo, utilizamos o esquema OFDM para as três diferentes modulações em quadratura, a coerente 16QAM, de fase mínima MSK e não coerente  $\pi/4$ DQPSK.

Chegamos às seguintes conclusões neste trabalho: os desempenhos em termos da BER dos sistemas multiportadora OFDM são alterados, quando o ruído impulsivo apresenta valor médio; as curvas da BER entram em saturação, para componentes DC do ruído, isto é para  $|\beta| > 0$ ; observa-se que para igual número de portadoras, o sistema OFDM–MSK foi o menos afetado pelo ruído impulsivo, já que este afeta a amplitude e a fase da portadora. Como medida para evitar a saturação, causada pela componente CC do ruído, é sugerido instalar um controle automático de ganho para a remoção desta componente.

GIRAUDO, E. C.; CARVALHO, S. A., RIBEIRO DE OLIVEIRA, M. S. Behavior OFDM system with 16QAM, MSK and  $\pi/4$ DQPSK modulations under impulsive noise. *Rev. Bras. Biom.*, São Paulo, v.28, n.3, p.96-103, 2010.

- **ABSTRACT:** *This paper analyzes and compares the performance of the OFDM multiplex scheme combined with 16QAM, MSK and  $\pi/4$ DQPSK mapping separately. A model of impulsive noise, with Bernoulli–Gaussian statistics is used as medium interference, where the mean and variance of the Gaussian distribution can be changed using a parameter adjustment. In order to analyze the behavior under impulsive noise and compare the performance between the systems, curves of BER is presented. The simulations show that with the increase in the mean impulse noise leads to the saturation the curve of BER, keeping constant the total power of impulse noise in OFDM symbol period.*

▪ **KEYWORDS:** *Impulsive Noise, OFDM, Statistical Bernoulli-Gaussian.*

### **Referências**

BIN AHMAD KAYANI, A.; BIN ALIAS, M. Y. *Performance of OFDM in the variation of the branch lengths in power line communications*, In: IEEE MALAYSIA INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 9., Kuala Lumpur, 2009, p.462-467.

GHOSH, M. Analysis of the effect of impulse noise on multicarrier and single carrier QAM systems, *IEEE Trans. Commun.*, New York, v.44, n.2, p.145-147, 1996.

GLEN, A. G.; LEEMIS, L. M.; DREWB, J. H. Computing the distribution of the product of two continuous random variables, *Comput. Stat. Data Anal.*, Amsterdam, v.44, n.3, p.451-464, 2004.

NDO, G.; SIOHAN, P.; HAMON, M. N. OFDM/OQAM performance analysis under asynchronous impulsive noise. In: ISPLC 2009, IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, 13., 2009, Dresden, Germany, p.160-165.

NDO, G.; SIOHAN, P.; HAMON, M. N. Adaptive noise mitigation in impulsive environment: application to power-line communications. *IEEE Trans. Power Deliv.*, New York, v.25, n.2, p.647-656, 2010.

NIKOOKAR, H.; NATHOENI, D. Performance evaluation of OFDM transmission over impulsive noisy channels. In: THE IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 13., 2002, PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS, 13., 2002, v.2, p. 550-554.

NOJIRI, Y.; TACHIKAWA, S.; MARUBAYASHI, G. Studies on fundamental properties of MMFSK systems. In: ISPLC '07, IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, 2007, p.222-227.

ROUISSI, F.; TLILI, F.; DEGARDIN, V.; GHAZEL, A.; LIENARD, M. Impulsive noise cancellation based on zero insertion technique for high bit rate powerline communication system. In: ICT '09, INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS, 2009, p.276-280.

SHEN W.; SUN H.; CHENG E.; YUAN F.; ZHANG Y. Impulsive noise suppression in DFT-SOFDM system, In: ICTM '09, INTERNATIONAL CONFERENCE ON TEST AND MEASUREMENT, 2009, v.1, p.216-219.

SURAWEEERA, H. A.; ARMSTRONG, J. Noise bucket effect for impulse noise in OFDM. *Electronics Letters*, v.40, n.18, p. 1156–1157, 2004.

TORIO, P.; SANCHEZ, M. G. Mitigation of impulsive noise in digital video broadcasting terrestrial using orthogonal polarization reception, *IEEE Trans. Consumer Electron.*, Piscataway, v.55, n.4, p.1798-1804, 2009.

Recebido em 07.01.2010.

Aprovado após revisão 20.09.2010.