

# REVISTA DIGITAL

Volume 5, agosto de 2005  
ISSN 1679 - 4389

[www.revdigonline.com](http://www.revdigonline.com)

COMUNICAÇÕES DIGITAIS  
& TÓPICOS RELACIONADOS

Proibida a venda

## ÍNDICE

Nota Editorial.....	3
Princípios e Perspectivas da Tecnologia de Rádio Definido por Software (RDS) e sua implementação via GNU Radio.....	4
Análise Comparativa das Propostas MB-OFDM e DS-UWB para Sistemas Ultra Banda Larga.....	9
O Papel dos Conversores Sigma-Delta no Front-End dos Sistemas de Comunicação Digital.....	17

## NOTA DO EDITOR

Prezados Leitores,

Gostaríamos de agradecer nesta edição em especial pelo bom retorno que estamos tendo dos nossos leitores, que têm acessado cada vez mais os nossos artigos e enviando diversos e-mails com solicitações, dúvidas e contribuições.

Nossa “chamada para artigos (CFP)” para o próximo volume já está aberta até o dia 19/12/2005. Esperamos receber várias submissões de bom nível de nossos alunos de graduação de todo o país.

Trazemos mais um volume da Revista Digital Online com interessantes artigos, envolvendo temas emergentes. Assim, este volume publica um artigo versando sobre Rádio Definido por Software (SDR) e o GNU Radio. As Redes Pessoais sem Fio (WPAN), são abordadas em um artigo sobre Ultra-Wideband. Finalmente, um artigo descritivo sobre conversores sigma-delta encerra esta edição.

Boa leitura!

André Gustavo Monteiro Lima  
glima@revdigonline.com

# PRINCÍPIOS E PERSPECTIVAS DA TECNOLOGIA DE RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE (RDS) E SUA IMPLEMENTAÇÃO VIA GNU RÁDIO

LEANDRO G. B. FERREIRA

*Engenharia de Telecomunicações/Computação  
Instituto de Educação Superior de Brasília - IESB*

*<http://www.iesb.br>*

*e-mail: [leandro\\_bsb@hotmail.com](mailto:leandro_bsb@hotmail.com)*

**Resumo** - Com a evolução das tecnologias de comunicação móvel uma nova gama de produtos e serviços foi disponibilizada no mercado. A crescente necessidade de integração destes produtos e serviços, mais uma vez impulsionada pelo desenvolvimento militar, deu origem à tecnologia de Rádio Definido por Software (RDS), tecnologia essa capaz de atingir altos níveis de integração de hardware, concatenada com a enorme flexibilidade do software. Neste artigo será abordada uma plataforma de desenvolvimento aberta para a implementação de sistemas RDS, com especial foco na implementação do GNU RADIO. Abordar-se-á também as perspectivas e desafios dos sistemas RDS.

**Abstract** - With the evolution of the technologies, especially those related to mobile communication, a new generation of products and services had been launched. The increasing need of integration of these products and services, promoted by the military application development, has generated a new technology called Software Defined Radio (SDR), capable to reach high levels of integration on hardware, concatenated with the flexibility of software. This paper introduces the implementation of GNU RADIO, a platform of free development capable to offer SDR services. The challenges and perspectives of de SDR systems will also be presented.

**Keywords** - Software Defined Radio, GNU Radio, DSP, CORBA.

## 1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos vinte anos, são notáveis as formas com que as tecnologias relacionadas à comunicação móvel vêm evoluindo. Como quase todo desenvolvimento tecnológico que inicialmente é destinado a aplicações militares, na área de comunicação móvel não tem sido diferente. Vários são os equipamentos, protocolos e tecnologias voltados ao meio militar, adaptados para serem economicamente viáveis e úteis ao mercado civil. Esta crescente evolução tecnológica inseriu no mercado uma série de produtos e serviços que atualmente são bastante utilizadas por muitas pessoas no dia-a-dia. Não é difícil imaginar alguém que use, simultaneamente, celular e um notebook interligado a uma rede wireless, ou vendo sua localização via o sistema de GPS (Global Positioning System), enquanto continua com o rádio FM ligado. Entretanto, com toda essa gama de tecnologias e serviços, ainda se faz

necessária uma variedade de dispositivos específicos para cada aplicação. Todavia, sob o ponto de vista militar, onde é imprescindível transportar o mínimo possível de equipamentos e ter a maior quantidade de recursos disponíveis, que possam efetuar várias funções simultaneamente, apresenta-se então, em ambos os casos, a necessidade de uma tecnologia integradora, altamente compacta e de grande flexibilidade.

A tecnologia de Rádio Definido por Software (RDS), ainda é uma tecnologia emergente e em desenvolvimento, mas que demonstra um imenso potencial, não só para uso militar, mas também para uso civil. Neste artigo serão abordados aspectos técnicos dos sistemas RDS, dando ênfase à parte do software, e em especial à plataforma GNU RADIO, juntamente com algumas alterações do modelo clássico dos sistemas RDS que se acredita, em um primeiro instante, torná-lo mais eficiente e flexível.

## 2. CONCEITO RDS

O objetivo da tecnologia RDS é digitalizar o sinal o mais próximo possível da antena, e fazer todo o Processamento Digital do Sinal (PDS) via software. Como a flexibilidade e a independência fornecidas pelo software são enormes, as possibilidades de produtos e serviços que poderão ser oferecidos aos usuários, ou ainda, os níveis de customização que as empresas, ou mesmo os usuários, poderão alcançar, estarão disponíveis apenas substituindo ou selecionando um outro software para operar em seu hardware.

Ainda assim, é necessário explicar a diferença entre os sistemas RDS e os sistemas baseados em software. No caso do último, são sistemas que utilizam uma implementação via software, assemelhando-se muito com o conceito de RDS, exceto pelo ponto que, qualquer alteração na padronização de algum aspecto da comunicação, implicará na substituição e/ou ajuste no hardware, pelo mesmo não ser capaz de se adaptar de forma dinâmica, tornando este, o principal ponto de diferença entre os sistemas RDS e os sistemas de rádio baseados em software [1]. Abaixo, verifica-se um modelo híbrido de várias literaturas que auxiliará na conceituação e entendimento dos sistemas RDS.

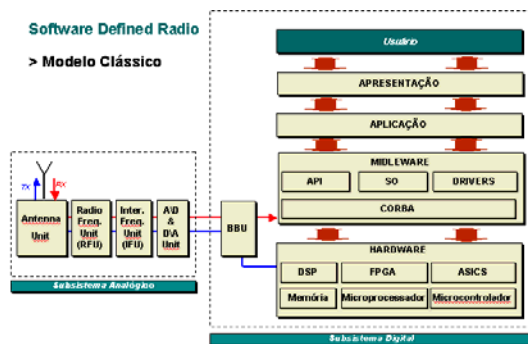


Figura 1 - Modelo RDS Clássico [2] [3]

O subsistema analógico é inicialmente composto pela AU (Antena Unit), que é um sistema de antenas inteligentes e multibanda. A RFU (Radio Frequency Unit), na transmissão, eleva os sinais recebidos à frequência necessária para a transmissão. Na recepção o sinal passa por um downconverter de forma a levá-lo a uma FI (Frequência Intermediária) ou para banda base [2].

A IFU (Intermedite Frequency Unit), na transmissão, é responsável por elevar o sinal recebido do ADC/DAC (Analog Digital Converters, Digital Analog Converters) e elevá-lo a uma frequência intermediária para que possa ser identificado e transmitido pela RFU e AU. Na recepção, o IF é responsável por filtrar os sinais para que eles possam ser tratados pelo DAC. Quando na transmissão, o sinal recebido da BBU (Base Band Unit) é convertido em sinal analógico via DAC, que dá seqüência à transmissão. Na recepção, após receber um sinal da IFU, ele é amostrado e transformado em um sinal digital, e posteriormente enviado a BBU [2]. Atualmente as limitações tecnológicas permitem ter um nível de reconfigurabilidade apenas a partir do ADC/DAC, o que de forma alguma limita a tecnologia. O subsistema analógico tem como foco a transmissão RF (Radio Frequency). A tecnologia de hardware empregada neste subsistema será descrita mais à frente, juntamente com a tecnologia de hardware usada na implementação do subsistema digital.

O subsistema digital é onde atualmente já existe uma total abstração do hardware, assegurando, assim, a flexibilidade conceitual existente no modelo clássico dos sistemas RDS.

O primeiro bloco do subsistema digital é a BBU. Na transmissão, o sinal é modulado, digitalmente, e enviado ao ADC, onde é preparado para a transmissão. Na recepção, a BBU demodula e decodifica o sinal, além de auxiliar na redução da interferência, dando maior confiabilidade ao sinal recebido [2].

## 3. O HARDWARE DO RDS

Não é tarefa simples definir as características mínimas do hardware para um sistema RDS. Como todo projeto, a definição de uma estrutura básica vai depender das necessidades específicas de cada caso. Apesar de estar intimamente vinculado à definição do projeto, há características que são recomendadas para a implementação de um sistema RDS. Os sistemas de PDS, que são uma das bases dos sistemas RDS, necessitam de uma grande eficiência de operações em tempo real, velocidade superior aos microprocessadores em operações genéricas, e uma alta capacidade de processar números em tempo reduzido,



sendo necessária ainda uma alta capacidade de reconfigurabilidade para facilitar a sua implementação de sistemas RDS [1].

Sensível a este mercado potencial, as indústrias buscam desenvolver dispositivos capazes de atender a esses princípios básicos. A seguir, serão descritos superficialmente os três principais tipos de dispositivos voltados para esta necessidade.

Os dispositivos DSP (Digital Signal Processing) tornam a solução flexível e com um bom desempenho, mas traz, em contra partida, o alto consumo de potência. A tecnologia ASIC (Application Specific Integrated Circuits) oferece um baixo consumo e uma boa capacidade de miniaturização. Porém, a ausência da possibilidade de reconfiguração torna seu uso bem restrito em sistemas RDS. Como uma solução intermediária temos a tecnologia FPGA (Field-Programmable Gate Array), que utiliza VHDL (VHSIC Hardware Description Language), que é menos popular que a linguagem C e que tem como um dos problemas o fato da reconfigurabilidade não ser tão dinâmica quando em um DSP [1].

O fato de esses dispositivos serem exemplos para a implementação de sistemas RDS, não exclui a possibilidade da utilização de qualquer outro tipo de processador, desde que eles atendam aos requisitos de projeto, ou à utilização de projetos híbridos dessas tecnologias, auxiliados ainda, por processadores clássicos e memórias. Vale lembrar que devido às características apontadas, estes processadores, DSP, FPGA e ASICS, também são empregados no subsistema analógico para a execução de operações específicas.

#### 4. O SOFTWARE DO RDS

Considera-se aqui, para fins didáticos, que o sistema de software do RDS seja composto apenas pelo subsistema digital, descrito no modelo de referência (Figura 1). A porta de entrada para os sinais tratados pela BBU é o bloco Middleware. Este bloco é responsável por toda a interface entre a aplicação e o hardware, onde se tem: a função de API (Application Programming Interface), responsável pela interface entre as aplicações e o Middleware, o SO (Sistema Operacional), que pode ser desde

um Kernel Linux<sup>1</sup> até algo proprietário, os “DRIVERS”, responsáveis pelos parâmetros de configuração do sistema RDS, e o CORBA2 (Common Object Request Broker Architecture) que é uma arquitetura que permite às aplicações fazerem solicitações a objetos [3].

O bloco de aplicação é a camada responsável pela comunicação com o Middleware, via API. Entretanto, neste bloco não existe a preocupação com o hardware, o que facilita o desenvolvimento de aplicações de alto desempenho voltadas às mais diversas necessidades [3].

O bloco de apresentação/usuário é onde efetivamente ocorre a interação com o usuário, neste ponto todo o trabalho de processamento digital do sinal é convertido em algo palpável para o usuário, desde uma ligação “voz” até a visualização de HDTV (High Definition Television), passando ainda pela atualização de um documento na rede via 802.11.

O bloco de hardware, como já visto, pode ser composto por DSP’s, FPGA’s, memórias, processadores e etc.

#### 5. O GNU RADIO

O potencial da tecnologia RDS fomentou, inicialmente, o interesse de instituições militares e, conseqüentemente, o interesse da comunidade acadêmica e de empresas privadas. Com o intuito de fortalecer e estudar esta tecnologia fora do meio militar, vários grupos de estudos foram criados ao redor do mundo, unindo esses interesses em prol da maturação da tecnologia em questão.

Partindo deste princípio, surgiu o GNU RADIO, ou seja, uma plataforma modular e aberta de desenvolvimento, para a criação e implementação de blocos, para o processamento de sinais focado em sistemas RDS.

A grande vantagem do GNU RADIO é o fato de se tratar de uma tecnologia aberta, o que permite o desenvolvimento modular e descentralizado, que conseqüentemente facilita sua implementação em uma mesma base (Kernel Linux), o que ajuda em muito nos testes e na melhoria contínua dos sistemas. Os blocos de processamento são desenvolvidos para as mais variadas aplicações dentro do subsistema digital, desde o tratamento de sinais na entrada,

<sup>1</sup> Caso do GNU RADIO.

<sup>2</sup> Será tratado mais à frente item seis.

decodificação, demodulação até sua saída em forma de HDTV, FM, GPS e voz. Outro fator que amplia e acelera o desenvolvimento dos módulos é o fato de seu desenvolvimento ser em C++, uma linguagem bem popular e já amplamente utilizada em outras aplicações.

Apenas para ilustrar o potencial do que pode ser desenvolvido com certa facilidade, usando como base alguns blocos, classes e subclasses já existentes, padronizadas e disponíveis pelo GNU RADIO ([www.gnuradio.org](http://www.gnuradio.org)), será exibido as linhas necessárias para se criar duas ondas senoidais de 350Hz e 440Hz [4].

```
Src0 = gr.sig.source_f (sampling_freq, gr
GR_SIN_WAVE, 350, ampi)
Src1 = gr.sig.source_f (sampling_freq, gr
GR_SIN_WAVE, 440, ampi)
```

É evidente que a amostra acima sozinha, sem os demais parâmetros necessários, não tem utilidade. A implementação de todas as funções realizadas analógicamente é feita a partir do desenvolvimento de modelos matemáticos dos sistemas analógicos que se deseja construir e estas funções devem representar, da forma mais próxima possível, a realidade dos sistemas analógicos. Estes modelos permitem o desenvolvimento de softwares capazes de desempenhar digitalmente, com muita fidelidade, qualquer tipo de sistema de sinal analógico.

A composição desses modelos, no caso específica do GNU RADIO, gera como resultado a criação de classes, subclasses, pacotes e blocos que agilizam o desenvolvimento. Por exemplo, existem classes que fazem processamentos específicos, como criar uma onda senoidal com uma amplitude específica, poupando tempo e, de alguma forma, garantindo um padrão de tratamento da informação e conseqüente compatibilidade.

Outro fato importante que facilita a implementação de sistemas RDS baseado no GNU RADIO é o fato dele operar sobre um Kernel Linux, deixando todo o sistema bem “leve” e ainda com a possibilidade de ser implementado fora de PCs. O GNU RADIO ainda possui uma plataforma de desenvolvimento de interfaces gráficas, o Python. O site do GNU, além de disponibilizar um toolkit do Python, possui vários processos de comunicação interna, diversos blocos e classes, além de uma boa documentação que pode ser usada ou

aprimoradas durante o desenvolvimento destas interfaces [4].

Encaixando ao modelo apresentado no item cinco, o GNU RADIO é uma ferramenta que pode representar todos os blocos do subsistema digital, com exceção ao bloco de hardware. Essa capacidade de representar todas as etapas deste subsistema, juntamente com as facilidades de implementação, tornam o GNU RADIO hoje uma importante ferramenta de simulação.

## 6. PERSPECTIVAS

Com todas as estruturas que compõem um sistema RDS já descritas, seria relativamente simples descrever o seu potencial, perspectivas e benefícios de sua implantação. Todavia, ao longo do desenvolvimento deste trabalho, notou-se um ponto hipotético de relativa falta de flexibilidade no modelo clássico, ponto esse que em uma análise preliminar, poderia comprometer a total independência do software em relação ao hardware, que é base do conceito que se tem de RDS. Assim, serão descritas, brevemente, as possibilidades de interfaceamento entre as camadas do sistema RDS clássico, dando especial realce no ponto onde se entende que pode ser implementada uma melhoria. A interação do usuário com o sistema é feita através da camada de apresentação/usuário, que atua da mesma forma que em um PC, ou qualquer outro sistema, convertendo as informações processadas em algo palpável, ou encaminhando as informações recebidas para o processamento. A interface entre a camada de apresentação e aplicação funciona da forma tradicional, coordenada para a obtenção dos resultados desejados. Como já foi dito anteriormente, a camada de aplicação se comunica com o middleware via uma API. Neste ponto, já se nota que poderá existir uma possível falta de compatibilidade entre a aplicação e o middleware. Imaginando que cada fabricante tende a desenvolver um middleware de maneira a potencializar seus recursos de hardware e que ainda há a possibilidade do desenvolvimento independente, como o GNU RADIO, há uma grande possibilidade de problemas. Assim, não seria lógico e economicamente viável desenvolver uma aplicação com várias versões para os vários middlewares. No sentido de reduzir este problema, pode-se adotar a implementação de MV's (Máquinas

Virtuais), amplamente utilizadas atualmente nos PCs. Um bom exemplo é a máquina virtual Java JVM (Java Virtual Machine), utilizada em muitos PCs portáteis e outros vários tipos de equipamentos e sistemas. A principal vantagem de uma aplicação baseada em uma MV é a liberdade que se ganha no desenvolvimento de aplicações, tornando-se possível, então, o desenvolvimento das aplicações sem a necessidade de se preocupar com a eventual compatibilidade, ou não do middleware, tornando como único requisito que o middleware suporte a MV convencional.

Teoricamente resolvido os problemas com a camada de middleware e de aplicação, a próxima parte é como compatibilizar as inúmeras possibilidades de middleware com a grande variedade de hardware em que se pode implementar um sistema RDS. Inicialmente, observa-se que algumas vertentes acadêmicas e da literatura sugerem para esta interface a arquitetura CORBA, definida pela OMG (Object Management Group). A OMG é uma organização internacional que fornece diretrizes e especificações para o desenvolvimento de aplicações. Por definição, a arquitetura CORBA permite que aplicações façam solicitações a objetos de uma forma transparente, estando este objeto local ou não. Baseado nesta definição pode-se dizer que o foco da arquitetura CORBA é o processamento distribuído, onde os objetos se comunicam e são desenvolvidos em uma linguagem própria, independente da estrutura de software e hardware. Essa linguagem é o IDL (Interface Definition Language).

Simplificadamente, o processo do CORBA funciona da seguinte maneira: o cliente requisita um serviço de implementações de objetos (Servant) através de um ORB (Object Request Broker). Este, por sua vez, encaminha ao objeto responsável pela execução do processo, estando ele local ou remoto. Após a conclusão do processo, a ORB entrega ao cliente o resultado de forma transparente, independente de onde ele foi obtido [5].

Outro aspecto importante a ser notado, é que imagina-se poder obter uma implantação mais eficiente se fosse optado pelo desenvolvimento de uma MV, cujo ambiente de execução simula uma certa arquitetura computacional que seja passível de ser implantada nos vários tipos de hardware e que forneça uma saída uniforme para os desenvolvedores de

middleware. Desta forma, estaria garantida a independência total do software em relação ao hardware [6].

Um questionamento apropriadamente levantado é definir qual a necessidade de criar uma interface baseada em MV se é possível fazer essa interface usando CORBA, que já está bem mais desenvolvido? Argumenta-se então que o CORBA é muito eficiente em seu propósito de processamento distribuído no caso de usá-lo como interface com o middleware, e é difícil de imaginar que ao solicitar um processamento, por mais limitado que seja o seu hardware, ele não consiga fazê-lo. No caso desta incapacidade, o repasse nesse nível levaria este processo de hardware específico para rodar em outro lugar, tornando o sistema mais lento e aumentando a possibilidade de erros e falhas, pois essa comunicação depende de rede. No caso de uma indisponibilidade da rede poderia se inviabilizar a execução de algum objeto fundamental para o middleware. Isso paralisaria o sistema, limitando a sua operacionalidade. Mesmo no caso de todos os objetos estarem localmente no equipamento, acredita-se que a complexidade do CORBA torna o processamento mais lento do que se fosse feito em uma MV.

Já com a implementação de uma MV, acredita-se que todo o processamento seria feito de forma mais eficiente. Porém, seria necessário um grande esforço inicial para a padronização. Este esforço deve ser de forma conjunta, como a que foi feita no desenvolvimento do CORBA e da Java JVM, onde todos os principais fabricantes opinaram e encontraram um padrão, que é referência no mercado atualmente. Como consequência, este padrão seria tomado como base para o desenvolvimento de middlewares independente do desenvolvedor ou da plataforma.

Ainda, em relação ao CORBA, seria muito interessante sua adoção no desenvolvimento do middleware. Imagina-se um cenário em que seja necessário executar algum algoritmo, incubado em um objeto IDL, que não esteja local ou que seja dinâmico, como uma chave de criptográfica. Seria possível, de forma transparente e simultânea, executá-lo e/ou gerá-lo remotamente. Com a utilização da arquitetura CORBA, pode-se então compor uma informação que seu sistema tenha capacidade de transmitir, mas não poderia gerá-la localmente, pelos mais diferentes motivos. A seguir verifica-se o modelo de



um sistema RDS com as observações e ajustes que foram evidenciadas neste item.

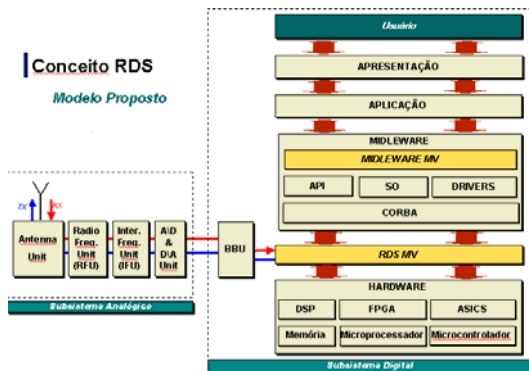


Figura 2 - Modelo sistema RDS - Proposto

Ficam registradas assim, as considerações ao modelo clássico, não esgotando, portanto, o assunto que, evidentemente necessita de mais pesquisas, simulações e testes para que as considerações feitas aqui sejam comprovadas.

## 7. CONCLUSÃO

Este artigo abordou de maneira superficial, as principais características e técnicas dos sistemas RDS e alguns modelos para sua implementação. Este trabalho teve como proposta contribuir para a maturação desta tecnologia que se entende tornar-se uma revolução nos sistemas de comunicação móvel.

A consolidação dos sistemas RDS não está vinculada apenas à evolução das tecnologias de hardware e software, necessárias para sua implementação, mas também aos aspectos regulatórios internacionais e de segurança, que são de extrema importância e devem ser estudados com maior profundidade, para não comprometer a imagem da tecnologia em questão. Neste ponto, a tecnologia GNU RADIO será de grande utilidade para simulações e testes.

A tecnologia RDS, sob outra perspectiva, servirá também para o nivelamento das tecnologias entre os países com maior desenvolvimento tecnológico e os países subdesenvolvidos, uma vez que, a única limitação desta tecnologia é o desenvolvimento de software.

Deve-se ressaltar, também, que toda tecnologia integratória é recebida com certa resistência no mercado civil, cabendo assim à indústria, buscar a melhor forma de abordagem em seus produtos, de maneira

a não “depreciar” a tecnologia junto ao público civil.

Admitindo-se um cenário ideal, no auge da maturação, se teria um sistema RDS capaz de oferecer qualquer informação a qualquer tempo em qualquer lugar.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Eduardo Wolski pela grande ajuda na transição das abstrações sobre o tema em idéias palpáveis, aplicáveis à tecnologia em questão e ao amigo Denard Costa Soares pela ajuda no entendimento do universo das máquinas virtuais.

## REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, André G. M. Rádio Definido por Software: o próximo salto no mundo das telecomunicações e computação. Disponível em: [www.revdigonline.com](http://www.revdigonline.com). Acesso em: junho, 2004.
- [2] HARADA, Hiroshi; PRASAD, Ramjee. Simulation and software radio communications. Boston: Artech House, 2002.
- [3] Corrêa Júnior, Rivaldo G.; Oliveira Jansen C. A tecnologia do Processador Digital de Sinal (PDS) aplicada ao Rádio Definido por Software (RDS) - 3G. Disponível em: [www.revdigonline.com](http://www.revdigonline.com). Acesso em: junho, 2004.
- [4] BLOSSOM, Eric. Exploring GNU Radio. Disponível em: [www.gnu.org/software/gnuradio/exploring-gnuradio.html](http://www.gnu.org/software/gnuradio/exploring-gnuradio.html). Acesso em: junho, 2005.
- [5] ARQUITETURA CORBA. 2001. Disponível em: [www.ic.unicamp.br/ra07293/corba/corba.htm](http://www.ic.unicamp.br/ra07293/corba/corba.htm). Acesso em: maio, 2005.
- [6] MÁQUINA Virtual Java (JVM). Disponível em: [www.infowester.com/jvm.php](http://www.infowester.com/jvm.php). Acesso em: junho, 2005.

## AUTOR



Leandro Ferreira, cursando o 7º semestre de Engenharia de Telecomunicações no IESB, Brasília-DF, Administrador de Redes da CNI, Brasília-DF.

## Análise Comparativa das Propostas MB-OFDM e DS-UWB para Sistemas Ultra Banda Larga

VINÍCIUS O. D. BESSA  
FRANCISCO DIAS

*Departamento de Engenharia  
Instituto de Educação Superior de Brasília – IESB*

*<http://www.iesb.br> e-mail: [vinicius.bessa@gmail.com](mailto:vinicius.bessa@gmail.com)  
[francisco.dias@fcpd.eng.br](mailto:francisco.dias@fcpd.eng.br)*

**Resumo** – A recente incorporação da técnica Ultra WideBand (UWB) para os serviços Wireless Personal Area Network (WPAN), proporcionou uma grande disputa entre propostas baseadas em técnicas OFDM e DS-CDMA. Este artigo apresenta uma análise comparativa entre as duas técnicas MB-OFDM e DS-UWB, considerando um canal Aditivo Gaussiano Branco (AWGN).

**Abstract** – The recent incorporation of the Ultra WideBand (UWB) technique to the Wireless Personal Area Network (WPAN) services has provided a great dispute between proposals based on OFDM and DS-CDMA techniques. This paper presents a comparative analysis between both techniques MB-OFDM and DS-UWB considering an Additive White Gaussian channel (AWGN).

**Keywords** – MB-OFDM, DS-UWB, WPAN, BER, FEC

### 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por novas soluções para comunicação sem fio, tem demandado a necessidade de criar novas tecnologias com alta capacidade de transmissão, ou seja, que possibilite inovações sem perder qualidade de serviço.

A demanda por uma tecnologia que substitua o bluetooth, atualmente utilizada em redes WPAN, vem crescendo devido à necessidade de maiores taxas de transmissão a serem aplicadas em equipamentos domésticos.

O IEEE pretende, através do grupo de tarefa TG3a, padronizar as redes sem fio em WPAN para taxas acima de 55Mbps, chamada de 802.15.3a. Para isso o IEEE adotou a tecnologia UWB – Ultra Banda Larga [1].

Atualmente, existem duas técnicas que estão sendo estudadas para a definição do UWB em WPAN: *MB-OFDM* e *DS-UWB*. Enquanto a primeira tira proveito da multiplexação de portadoras em frequências ortogonais para resistir aos efeitos do multipercurso, a segunda realiza o espalhamento espectral através da multiplicação do sinal por um código em

seqüência direta, espalhando o sinal por uma larga faixa de frequências.

O IEEE criou alguns critérios de seleção, usados pelo TG3a, para a avaliação das respectivas propostas. Os critérios gerais da solução para aceitação das propostas são: custo na implementação das camadas; interferência; coexistência; facilidade técnica; complexidade na fabricação dos dispositivos; tempo para tornar-se disponível no mercado; impactos na regulamentação em outros países; escalabilidade; e capacidade de reconhecer a localização de outros dispositivos [2].

Os dispositivos UWB se comunicam formando uma rede denominada *piconet*. As *piconets* são redes locais com cobertura limitada e sem a necessidade de uma infraestrutura. Na figura 1 está exemplificado um tipo de *piconet*.

### 2. MULTIBAND OFDM

A proposta *MB-OFDM* está sendo desenvolvida pelo grupo *MBOA (MultiBand OFDM Alliance)* com faixa de frequência que vai de 3.1 a 10.6 GHz. A *MB-OFDM* utiliza-se da técnica de multiplexação

*OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*, usando 122 subportadoras moduladas em *QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)*, suportando taxas de 30, 53.3, 110, 160, 200, 320, 400, e 480 Mbps, sendo que as taxas de 53.3, 110 e 200 Mbps são obrigatórias para transmissão e recepção e as outras são obrigatórias somente na recepção. Para alcançar essas taxas é utilizado um puncionamento – *Puncturing* – que omite temporariamente alguns bits codificados na transmissão, reduzindo, deste modo, o número de bits transmitidos e aumentando a taxa de codificação. Como exemplo, a uma taxa de transmissão de 53.3 Mbps, utiliza-se o esquema de modulação *QPSK*, um *FEC (Forward Error Correction)* de razão 1/2 e um fator de espalhamento 2, obtendo-se uma taxa de 100 Bits codificados por símbolo. Nesta combinação, o *FEC* é um codificador convolucional e o fator de espalhamento espectral é utilizado para propiciar uma maior robustez aos dados transmitidos [1]. A Tabela I apresenta os principais parâmetros do MB-OFDM para as taxas de 100, 200 e 480 Mbps.



Fig. 1. Piconet Doméstica

### 3. DIRECT SEQUENCE UWB

A proposta *DS-UWB*, também utiliza uma faixa de frequência que vai de 3.1 a 10.6 GHz e está sendo apresentada ao grupo TG3a do *IEEE*.

O *DS-UWB* provê uma rede *WPAN* com capacidade de comunicação de dados da ordem de 28, 55, 110, 220, 500, 660, 1000 e 1320 Mbps. Assim como o *MB-OFDM*, o

*DS-UWB* utiliza um puncionamento para atingir essas taxas de transmissão, reduzindo a taxa de bits transmitidos e aumentando a taxa de codificação. Para uma taxa de transmissão de 55 Mbps, utilizando modulação *BPSK*, taxa *FEC* de 1/2, tem-se uma taxa de símbolo de  $F_{esp}/12$  ( $F_{esp}$  = Frequência de espalhamento) [1].

TABELA 1 – Parâmetros do MB-OFDM

Taxa (Mbps)	110	200	480
Modulação	QPSK	QPSK	QPSK
Taxa FEC	11/32	5/8	3/4
Fator de Espalhamento	2	2	1
Bits codificados por símbolo OFMD	200	200	200
Codificação convolucional	K=7	K=7	K=7
Polinômio Gerador	133 <sub>8</sub> 165 <sub>8</sub> 171 <sub>8</sub>	133 <sub>8</sub> 165 <sub>8</sub> 171 <sub>8</sub>	133 <sub>8</sub> 165 <sub>8</sub> 171 <sub>8</sub>
Entrelaçamento Matricial - OFDM	10 X 10	10 X 10	10 X 10
Frequência de espalhamento (MHz)	528	528	528

Na proposta *DS-UWB* é empregada a técnica de espalhamento espectral por seqüência direta, de forma a reduzir ao máximo a interferência em outros equipamentos que possam estar sendo utilizados no mesmo ambiente. A proposta utiliza os esquemas de modulação *BPSK* e *4-BOK*. A Tabela II apresenta os principais parâmetros do DS-UWB para as taxas de 100, 200 e 480 Mbps.

### 4. SIMULAÇÕES

Para oferecer suporte para comparações, foram realizadas simulações com as duas propostas, *MB-OFDM* e *DS-UWB*. Foram realizadas 3 simulações diferentes para o *MB-OFDM* considerando as taxas de transmissão de 110, 200 e 480 Mbps, obedecendo aos parâmetros da Tabela 1. Os parâmetros comuns às três simulações são:

- Codificação Convolucional com K=7 e polinômio gerador (133<sub>8</sub>, 165<sub>8</sub>, 171<sub>8</sub>).
- Entrelaçamento Matricial ao longo dos símbolos *OFDM* de 100 x 3.
- Entrelaçamento Matricial dentro de cada símbolo *OFDM*, de 10 x 10.

- Modulação *QPSK*.
- Freqüência de espalhamento de 528 MHz.

TABELA 2 – Parâmetros do DS-UWB

Taxa (Mbps)	110	220	500
Modulação	BPSK	BPSK	BPSK
Taxa FEC	1/2	1/2	3/4
Comprimento do código	L=6	L=3	L=2
Bits por símbolo OFMD	1	1	1
Taxa de símbolo	$F_{esp}/6$	$F_{esp}/3$	$F_{esp}/2$
Codificação convolucional	K=6	K=6	K=6
Polinômio Gerador	$65_8$ $57_8$	$65_8$ $57_8$	$65_8$ $57_8$
Entrelaçamento Convolucional	10 X 7	10 X 7	10 X 7
Frequência de espalhamento (MHz)	1313	1313	1313

De forma análoga, foram realizadas 3 simulações diferentes para o *DS-UWB* considerando as taxas de transmissão de 110, 200 e 500 Mbps, obedecendo aos parâmetros da Tabela 2.

Os parâmetros comuns às três simulações são:

- Codificação Convolucional com K=6 e polinômio gerador ( $65_8$ ,  $57_8$ ).
- Entrelaçamento Convolucional de 10 x 7.
- Modulação *BPSK*.
- Freqüência de espalhamento de 1313 MHz.

Neste estudo inicial foi utilizado um modelo de canal AWGN em todas as simulações, como canal de transmissão. Os Resultados obtidos nas respectivas simulações são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3.

Na figura 2 é comparado o desempenho em termos de taxa de erros - *BER* - a uma taxa de transmissão de 110Mbps em função da relação sinal/ruído [dB]. Observa-se que, nestas condições, a *BER* do *MB-OFDM* é praticamente zero em 6 dB, enquanto no *DS-UWB* o *BER* será praticamente zero em 3db.

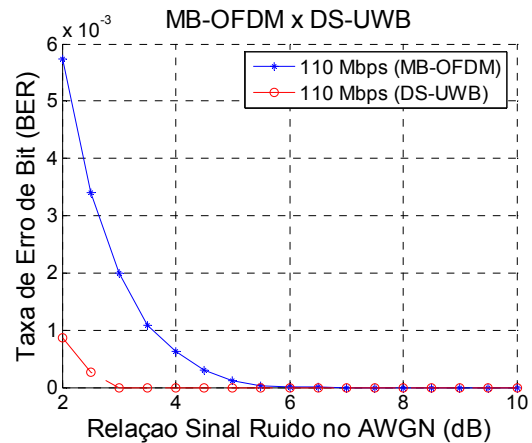


Fig. 2. 110 Mbps MB-OFDM x 110 Mbps DS-UWB

Já a uma taxa de transmissão de 200 Mbps para o *MB-OFDM* e a uma taxa de 220 Mbps para o *DS-UWB*, a *BER* é praticamente zero em 4.5 dB e 2.5 dB, respectivamente, conforme se pode visualizar na figura 3.

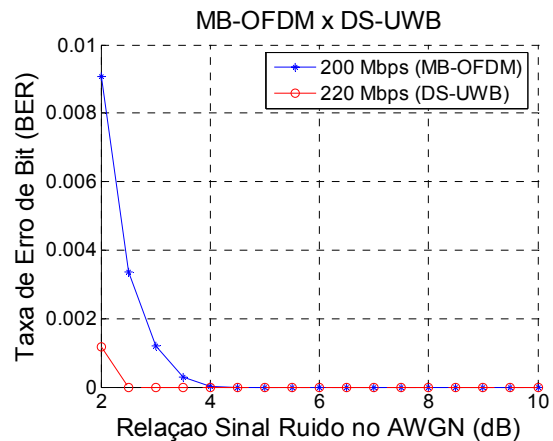


Fig. 3. 200 Mbps MB-OFDM x 220 Mbps DS-UWB

Finalmente, verifica-se na figura 4 que nas taxas de transmissão de 480 e 500 Mbps, obtém-se uma *BER* aproximada de zero para *MB-OFDM* e *DS-UWB*, em 10 dB e 8 dB, respectivamente.

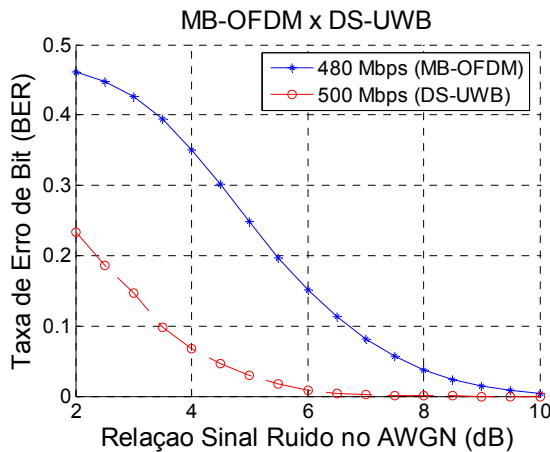


Fig. 4. 480 Mbps MB-OFDM x 500 Mbps DS-UWB

### 5. ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPOSTAS

Como parâmetro para análise, foram utilizados alguns dos critérios que o *IEEE* está utilizando para avaliação das tecnologias. Para a escolha de cada critério, foi analisado o grau de importância deles para o consumidor final, numa possível implementação de uma rede *WPAN*.

Os itens avaliados foram:

1. as taxas de transmissão que o dispositivo poderá suportar;
2. a quantidade e a duração de informações extras necessárias ao estabelecimento da conexão;
3. a quantidade de *piconets* que poderão ser formadas;
4. as características do enlace de rádio;
5. a sensibilidade do receptor;
6. a taxa de erro de bits (*BER*);
7. a imunidade a multipercursos;
8. os modos de gerenciamento da energia;
9. o consumo de potência;

**1. Taxas de Transmissão:** a taxa de transmissão foi avaliada através dos dados da Tabela 3 [3,4]. Verifica-se que tanto o *MB-OFDM* quanto o *DS-UWB*, atendem aos pré-requisitos estipulados pelo *IEEE*. Entretanto, o *DS-UWB* leva vantagem nessa análise, visto que sua taxa de transmissão atinge valores bem maiores que o *MB-OFDM*.

TABELA 3 – Taxas de Transmissão do MB-OFDM e do DS-UWB

Taxa de Trasmissão	
<i>MB-OFDM</i>	<i>DS-UWB</i>
53.3 Mbps	28 Mbps
80 Mbps	55 Mbps
110 Mbps	110 Mbps
160 Mbps	220 Mbps
200 Mbps	500 Mbps
320 Mbps	660 Mbps
400 Mbps	1000 Mbps
480 Mbps	1320Mbps

**2. Informações Extras:** trata-se dos pacotes de preâmbulo que precisam ser enviados antes do estabelecimento da conexão e envio de dados. Serão avaliados nesse tópico quais das tecnologias necessita de enviar o menor número de bits de informações extras.

Foi verificado que o preâmbulo médio para a banda baixa (3.1 a 4.85 GHz) do *DS-UWB* tem aproximadamente 737 bits por símbolo, enquanto o preâmbulo padrão do *MB-OFDM* possui 3.840 bits por símbolo, o que leva a concluir que a tecnologia *DS-UWB* é superior à *MB-OFDM* nesse aspecto.

**3. Piconets:** o grupo de tarefa TG3a definiu que o futuro protocolo 802.15.3a deverá permitir um número mínimo de 4 *piconets* operando sobrepostas e simultaneamente. Baseado nisso, a quantidade de *piconets* de cada proposta será de acordo com solução de cada proposta com quanto a divisão da faixa de 3.1 a 10.6 GHz.

A proposta *MB-OFDM* divide a faixa de 7.5 GHz em 5 canais, sendo que os 4 primeiros canais são divididos em 3 faixas de frequência e o último canal é dividido em somente 2 faixas de frequência, conforme figura 5 [1]. Esta proposta prevê um total de 4 códigos por canal, o que resulta em um número de 20 *piconets*. Porém, dessas 20 *piconets*, somente 4 podem trabalhar sobrepostas, atingindo então a quantidade mínima exigida.

Já a proposta *DS-UWB* divide a faixa de frequência de 3.1 a 10.6 GHz em duas partes, uma chamada de banda baixa que vai de 3.1 a 4.85 GHz e outra chamada de banda alta que vai de 6.2 a 9.7 GHz, conforme a figura 6. Em cada banda são definidos 6 códigos de *piconet*, totalizando



12 *piconets*, podendo somente 6 delas trabalharem sobrepostas.

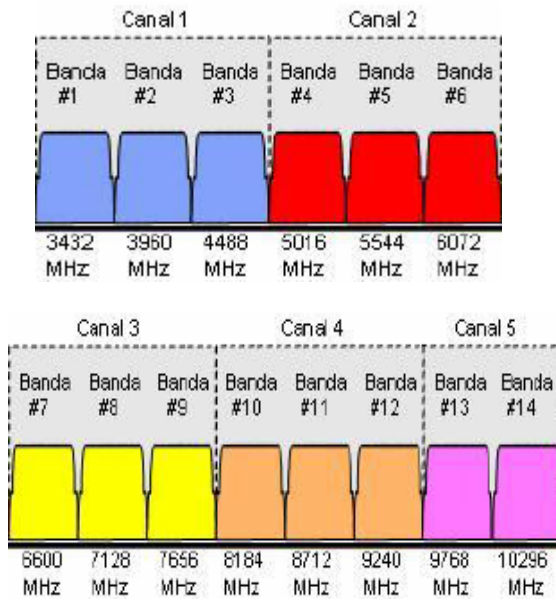


Fig. 5. Divisão de Piconets em MB-OFDM

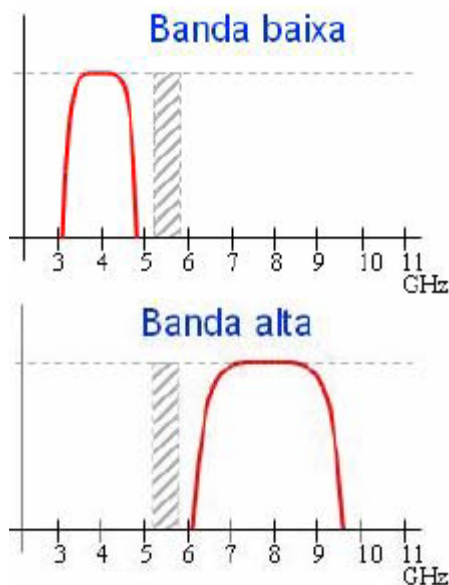


Fig. 6. Divisão de Piconets em DS-UWB

Conforme verificado, a proposta *MB-OFDM* pode oferecer um número de *piconets* maior que o *DS-UWB*, porém no *DS-UWB* um número maior de *piconets* pode trabalhar de maneira sobreposta. A vantagem de se trabalhar com maior número de *piconets* sobrepostas é que com a mesma banda de espectro, consegue-se alocar um maior número de usuários.

**4. Enlace de rádio:** com relação ao enlace de rádio, para o *MB-OFDM* foram

consideradas taxas de 110, 200 e 480 Mbps e para *DS-UWB* foram utilizadas taxas de 110, 220 e 500 Mbps. Dentre outros parâmetros, foram utilizados à uma taxa de 110 Mbps para o *MB-OFDM*, a potência média de transmissão igual a -10.3 dBm, o ganho da antena de 0dB e a perda considerada em *AWGN* no valor de 2.9 dB. Já para o *DS-UWB*, na mesma taxa, utilizou-se a potência média de transmissão de -10 dBm, um ganho da antena de 0dB e uma perda *AWGN* de 2.9 dB [2].

Analisando as duas propostas não foram encontradas diferenças significativas entre as mesmas.

**5. Sensibilidade do receptor:** quanto maior a sensibilidade, maior deve ser a relação sinal/ruído e, em uma mesma potência do transmissor, implicará num alcance menor ou numa taxa de erro maior. A Tabela IV apresenta os valores de sensibilidade em dBm em função da taxa de transmissão em Mbps para cada proposta. Pode-se concluir, desta tabela, que as duas propostas são equivalentes quanto a este parâmetro.

TABELA IV – Sensibilidade do MB-OFDM e do DS-UWB em função da taxa de transmissão

Taxa	MB-OFDM	Taxa	DS-UWB
110 Mbps	-76,08 dBm	110 Mbps	-76,18 dBm
200 Mbps	-72,79 dBm	220 Mbps	-72,87 dBm
480 Mbps	-68,19 dBm	500 Mbps	-68,31 dBm

**6. Taxa de erro de bit (BER):** após a análise dos resultados das simulações realizadas no item IV, figuras 2, 3 e 4, percebe-se que o *DS-UWB* é superior ao *MB-OFDM* em relação a taxa de erro de bit para as taxas de transmissão utilizadas nas simulações em um canal *AWGN*.

**7. Imunidade a multipercursos:** A técnica de multiplexação *OFDM* possui uma maior quantidade de mecanismos e características para lidar com os problemas relacionados com o canal multipercurso. Para a técnica de espalhamento espectral, utilizada no *DS-UWB*, é necessária a adição de um receptor do tipo *RAKE*, o qual combina os sinais que chegam em tempos e caminhos diferentes em um sinal

mais forte e limpo. Como na proposta *MB-OFDM* também está previsto o espalhamento espectral dos dados utilizando saltos em frequência, pode-se concluir que a proposta *MB-OFDM* está mais bem preparada para lidar com os canais multipercurso. Entretanto, este não é um fato comprovado neste artigo. Tal estudo encontra-se ainda em andamento, através de simulações, para futuras conclusões mais precisas e embasadas, não sendo assunto deste artigo.

### 8. Gerenciamento da energia consumida:

é a capacidade de se ter diferentes taxas de consumo de energia para diferentes modos de operação dos equipamentos. As duas propostas são idênticas com relação ao gerenciamento da energia consumida. Ambas seguem os modos definidos na minuta do padrão 802.15.3<sup>a</sup>, quais sejam:

- *Active*: modo de transmissão
- *PSPS (Piconet Synchronized Power Save)*: permite economia durante o sincronismo das *piconets*.
- *SPS (Synchronous Power Save)*: economia simples de energia
- *Hibernate*: permite que se faça economia durante momentos ociosos.

**9. Consumo de Potência:** analisando o consumo de potência na transmissão e na recepção de informações, no modo *Current Control Amplifier (CCA)* e no modo em que o equipamento se encontra em *standby*, ou seja, não está transmitindo nem recebendo (modo de economia), pode-se verificar que a proposta *DS-UWB* possui menos consumo de potência do que a *MB-OFDM*, conforme as Tabelas V e VI [1].

TABELA V – Consumo de potência - MB-OFDM

Taxa	110 Mbps	200 Mbps	480 Mbps
Transmissão	117 mW	117 mW	180 mW
Recepção	205 mw	227 mW	323 mW
CCA	117 mW	117 mW	117 mW
Modo Econ.	18 $\mu$ W	18 $\mu$ W	18 $\mu$ W

TABELA VI – Consumo de potência – DS-UWB

Taxa	110 Mbps	220 Mbps	500 Mbps
Transmissão	93 mW	93 mW	145 mW
Recepção	155 mw	169 mW	236 mW
CCA	94 Mw	94 Mw	94 Mw
Modo Econ.	15 $\mu$ W	15 $\mu$ W	15 $\mu$ W

## 6. CONCLUSÃO

Conforme apresentado, em uma primeira análise, o DS-UWB apresenta melhores características para o serviço WPAN pretendido pelo GT TG3a. Como desafios futuros, uma análise mais profunda e cuidadosa deve ser realizada considerando canais multipercurso com perfis compatíveis com os prováveis ambientes de aplicação desta nova tecnologia, de forma a confirmar ou não a superioridade do DS-UWB sobre o MB-OFDM.

O UWB se configura como um fator de revolução das atuais tecnologias existentes para a formação de redes domésticas sem fio e em breve estará entrando no mercado nacional. Seu estudo, análise e domínio permitirão um uso mais preciso e apropriado dos serviços WPAN.

## 7. REFERÊNCIAS

[1] FRANCISCO CARLOS PEREIRA DIAS, “Análise Comparativa das Propostas MB-OFDM e DS-UWB”, Trabalho de Graduação realizado no IESB,, Dezembro 2004.

[2] ELLIS; SIWIAK; ROBERTS. *P802.15.3a Alt PHY Selection Criteria. EUA, Dezembro 2002.*

[3] AL., A. B. *et. Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a. [S.l.], Setembro 2004.*

[4] FISHER,R. *et al. DS-UWB Physical Layer Submission to 802.15 Task Group 3a. [S.l.], Julho 2004.*

## 8. BIOGRAFIA



Vinícius Oliveira Diógenes Bessa, atualmente cursando o nono semestre de Engenharia Elétrica no Instituto de Educação Superior de Brasília - IESB, e trabalhando na Brasil Telecom.



Francisco Carlos Pereira Dias, Engenheiro de Telecomunicações pelo IESB, atualmente trabalhando como consultor técnico pela JFM Informática no Ministério da Agricultura.

## O PAPEL DOS CONVERSORES SIGMA-DELTA NO FRONT END DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL

EDUARDO AUGUSTO DIAS FONSECA  
LUIZ ALBERTO PORTILHO DE LIMA

Engenharia de Telecomunicações  
Instituto de Educação Superior de Brasília - IESB

<http://www.iesb.br>

e-mails: [eduardo.fonseca@inbox.com](mailto:eduardo.fonseca@inbox.com)  
[luizplima@pop.com.br](mailto:luizplima@pop.com.br)

**Resumo** – A maioria dos equipamentos utilizados nos sistemas de comunicação nos dias atuais possui processamento digital de sinais. Esse processamento é possível graças a um dispositivo que é implantado na interface que realiza recepção e transmissão dos sinais, o conversor A/D/A, que tem como papel principal transformar sinais analógicos em sinais digitais e vice-versa. O desempenho do processamento digital de sinais está diretamente ligado à precisão e velocidade na qual essa transformação é realizada. Dentre os vários dispositivos que realizam essa tarefa, um tem mostrado melhores resultados com custo reduzido, graças à sua simplicidade e eficiência, fazendo dele um dos mais utilizados, o conversor Sigma-Delta ( $\Sigma-\Delta$ ). Portanto, serão mostradas algumas de suas características e aplicações.

**Abstract** – Most of the equipments used in the communication systems nowadays, processes digitally the signals. That processing is possible due to one device that is implanted in the interface that accomplishes the reception and transmission of the signals, the A/D/A converter, which has as main function to transform analogical signals in digital signals and vice-versa. The digital processing performance is directly related with the precision and speed in which that transformation is accomplished. Among the several ones devices that accomplish that task, one has been showing better results with reduced cost, thanks to your simplicity and efficiency, the Sigma-Delta ( $\Sigma-\Delta$ ) converter. Therefore, some of its characteristics and applications will be shown.

**Keywords** – Front End RF, A/D D/A Converter, Sigma-Delta converter.

### 1. Introdução

Por muito tempo os sistemas de comunicação utilizaram tecnologia puramente analógica. As rádios AM e FM, as redes telefônicas e até mesmo a televisão, utilizavam esse tipo de tecnologia no processamento de suas informações. Evoluções ocorridas em diversos campos da tecnologia (eletrônica, computação, etc), possibilitaram que essas informações pudessem ser processadas de forma digital. Atualmente, os sistemas e meios de telecomunicação, em sua grande maioria, apóiam-se nas vantagens do processamento digital de sinal em seus equipamentos. Para isso, existe a necessidade indispensável de um processo que possa realizar a tradução das grandezas naturais, analógicas, para o domínio digital, bits. Nesse processo, essa conversão é então realizada pelos

conversores analógicos/digitais (A/D) ou digitais/analógicos (D/A) [7].

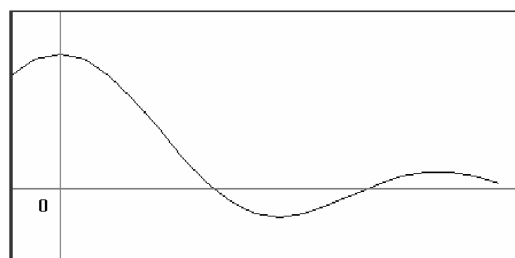


Figura 1 – Sinal em tempo contínuo  $x(t)$

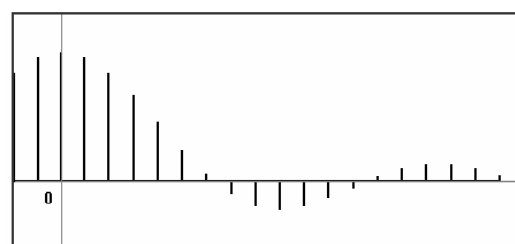


Figura 2 – Sinal em tempo discreto  $x[n]$

Pode-se citar a comunicação sem fio como uma das tecnologias que mais utiliza esse tipo de dispositivo. A telefonia móvel, os sistemas de posicionamento global (GPS), sistemas de comunicação de dados por tecnologia bluetooth, entre outros o utilizam como parte integrante de seu hardware. Este dispositivo está implementado na interface que realiza a transmissão e a recepção dos sinais, o chamado Front-End RF, o qual possui como parte integrante de sua configuração básica a antena, filtros, amplificadores de potência e os conversores AD/DA. O Front End RF (figura 3), em seu modo transmissão, tem como papel receber bits de uma determinada aplicação do equipamento, transformá-los em sinal analógico através do conversor D/A (digital/analógico) e, posteriormente, amplificar o sinal (utilizando amplificadores de potência) e encaminhá-lo para a antena para que o mesmo possa ser transmitido. Porém, no modo de recepção o Front End exerce papel quase inverso. Um sinal analógico captado pela antena, será tratado através da utilização de filtros, e amplificadores de baixo ruído e encaminhado ao conversor A/D para que ele possa ser digitalizado e então entregue ao processador para que faça a coleta da informação recebida.

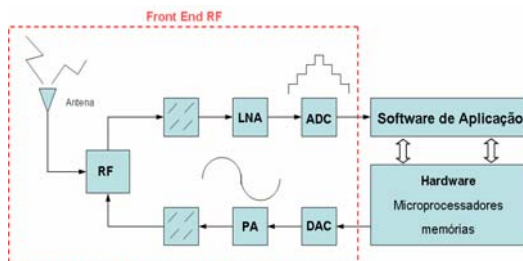


Figura 3 – Caracterização do Front End RF

A utilização de sinais digitalizados pelo sistema faz com que o processamento se dê de forma mais fácil e precisa, melhorando a qualidade da informação desejada. No entanto, o processo de digitalização do sinal é fator limitante da velocidade e resolução do sistema como um todo. Como resultado, tem se buscado desenvolver conversores que apresentem tanto uma alta velocidade quanto uma ótima resolução.

## 2. Conversores AD/DA

Os conversores Analógicos/Digitais são componentes chaves presentes nos modernos equipamentos eletrônicos. Eles

promovem a crítica transformação de um sinal analógico mensurável em uma representação digital. Essa transformação é caracterizada como quantização [2]. O processo de quantização não é perfeito em sua totalidade, fazendo com que o sinal obtido não seja representado fielmente. Isso se dá ao fato da representação digital de um sinal analógico ocorrer de forma discreta no tempo (número finito de pontos). Além disso, são introduzidos erros na informação durante esse processo. Esses erros são conhecidos como “erros de quantização” ou “ruídos de quantização”.

A figura 4 apresenta um modelo simples de um processo de conversão A/D. Neste processo, ocorre a conversão de um sinal de entrada analógico  $x(t)$  em uma seqüência de códigos digitais  $x[n]$  utilizando uma taxa de amostragem de  $F_s = 1/T$ , onde  $T$  representa o intervalo de tempo de amostragem. Em cada intervalo de amostragem é colhida uma informação (amostra) da onda analógica para que ela possa ser quantizada.

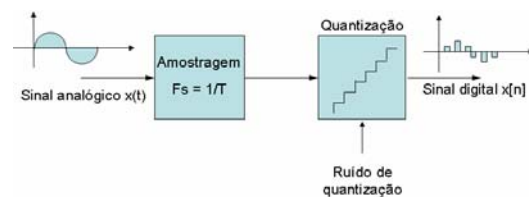


Figura 4 – Modelo simples do processo de conversão Analógico-Digital

De acordo com o Teorema de Nyquist, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado para que este possa ser reproduzido sem erro de aliasing. A metade da frequência de amostragem é chamada frequência de Nyquist e corresponde ao limite máximo da frequência do sinal que pode ser reproduzido. Como não é possível garantir que o sinal não contenha sinais acima deste limite (distorções, interferências, ruídos, etc), é necessário filtrar o sinal (filtro anti-aliasing).

Para quantizar o sinal amostrado, é necessário dividir o possível intervalo de variação do sinal em níveis que serão posteriormente codificados binariamente. Quanto maior o número de níveis, maior será o número de quantização, ou seja, maior será a quantidade de amostras do sinal ao longo do tempo [8-9]. A este



número de bits que codificam a quantização damos o nome de resolução. Em algumas aplicações, o uso de conversores A/D de alta resolução não é possível devido à necessidade de uma precisão analógica de tensão maior do que a da aplicação pode fornecer (Figura 5).

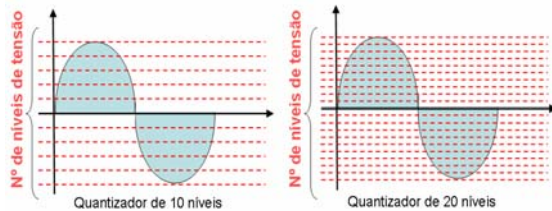


Figura 5 – Precisão de conversão A/D, níveis de quantização.

### 3. Processos de quantização utilizando super-amostragem e decimação

A quantização em um conversor A/D pode se dar de duas maneiras diferentes. Isso porque existem conversores que trabalham com superamostragem (alta taxa de amostragem) e conversores que trabalham com a taxa de Nyquist. Os que trabalham com alta amostragem utilizam-se de uma seqüência de dados quantizados a uma taxa N vezes maior que a freqüência de Nyquist, que, após serem quantizados, são submetidos ao processo de decimação, que é a seleção e descarte de algumas amostras através de um algoritmo específico (algoritmo de decimação), visto que a quantidade de amostras obtidas na superamostragem torna o processo mais difícil e lento, podendo causar perda de desempenho no processo de conversão. Pode-se observar esse processo na figura 6 [3,4,6].

Já os que trabalham com a taxa de Nyquist realizam o processo de quantização utilizando toda precisão oferecida pelo conversor em um único intervalo de tempo de amostragem, ou seja, esses conversores colhem uma amostra do sinal de entrada e fazem sua conversão.

O processo de superamostragem possui algumas vantagens, principalmente na elaboração dos filtros anti-aliasing. O filtro anti-aliasing têm como responsabilidade eliminar as freqüências maiores que  $F_s/2$  (metade da freqüência de amostragem).

O desenvolvimento da tecnologia de processamento digital de sinais tem sido um dos principais motivadores no desen-

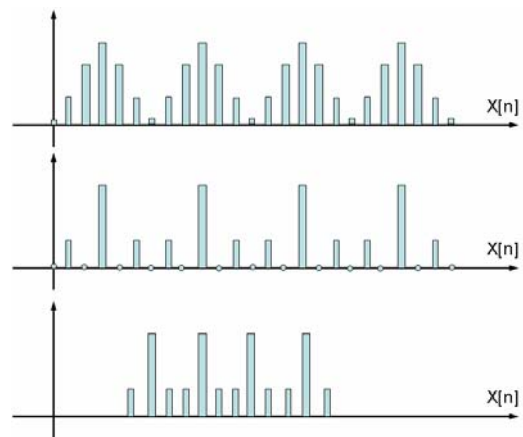


Figura 6 – Processo de decimação

volvimento de conversores A/D de alta precisão (ou resolução), os quais podem ser integrados em um mesmo chip, juntamente com o processador digital de sinais. O crescente uso das técnicas desse processamento nas comunicações e nas aplicações de áudio contribuiu para a necessidade da construção de conversores A/D de alta precisão a baixo custo.

Os conversores A/D de alta resolução convencionais, como os de Aproximação Sucessiva e os conversores do tipo flash, operam na taxa de Nyquist e geralmente não fazem uso da alta velocidade alcançada através da tecnologia VLSI.

### 4. Modulação Sigma-Delta ( $\Sigma-\Delta$ )

Com o aparecimento dos poderosos processadores de sinal, implementados em VLSI (Very Large Scale Integration), na tecnologia CMOS, criou-se uma necessidade por conversores A/D de alta resolução e que possam ser integrados de forma otimizada em circuitos digitais e sistemas. Dentre os conversores A/D existentes, os que mais ganharam popularidade foram os baseados na modulação sigma-delta. Essa idéia de modulação já é antiga, datada de quase meio século, mas que só passou a ser mais utilizada com a possibilidade de sua integração em grande escala (VLSI). Esses conversores são especialmente insensíveis à imperfeições do circuito e à disparidade dos componentes. Fornecem maneiras de explorar a densidade alcançada e a velocidade proporcionada por um circuito digital integrado, evitando a difícil implementação de funções complexas em circuitos analógicos, além do limitado dinamismo analógico. No entanto, esses conversores, por sua vez, requerem

rápido e complexo estágio de processamento digital de sinais [5]. A modulação sigma-delta foi desenvolvida como uma evolução da modulação delta, onde o valor a ser quantizado é obtido da mudança de uma amostra para outra posterior. A figura 7 mostra o esquemático da modulação delta.

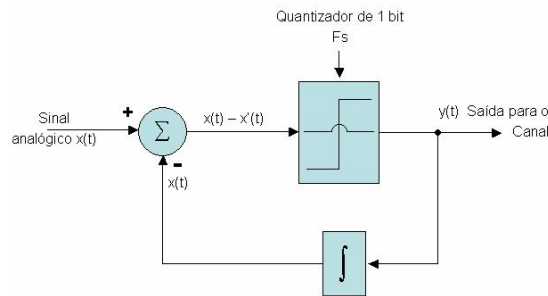


Figura 7 – Modulação Delta

A saída do integrador no loop de realimentação tenta prever a entrada  $x(t)$ , trabalhando então como um preditor. O termo, erro de predição  $(x(t) - x'(t))$ , na predição atual, é quantizado e usado para realizar a próxima predição. A figura 8 mostra um exemplo do sinal delta-modulado.

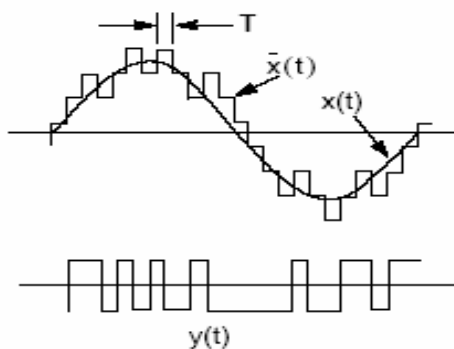


Figura 8 – Sinal após a modulação delta

O erro de predição quantizado (saída do modulador delta) é integrado no receptor exatamente como encontrado no loop de realimentação, ou seja, o receptor prediz o sinal de entrada, gerando o sinal de saída em banda base analógica após a passagem por um filtro passa-baixa, conforme ilustrado na figura 9. É importante lembrar que o desempenho dos moduladores delta é dependente da variação do sinal de entrada.

A modulação delta necessita de dois integradores: um para a modulação e outro para a demodulação, conforme ilustrado nas figuras 8 e 10. Sendo o processo de

integração uma operação linear, o segundo integrador pode ter sua posição alterada para antes do modulador, conforme a figura 10.

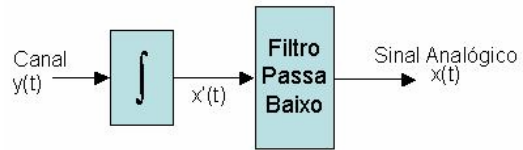


Figura 9 – Demodulação no receptor

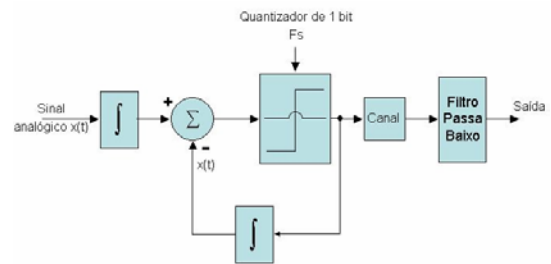


Figura 10 – Derivação da modulação Delta

Esta alteração não modifica as características gerais de entrada e saída, sendo possível a união dos dois integradores em um único integrador. Dessa união surge a modulação Sigma-Delta, conforme a figura 11.

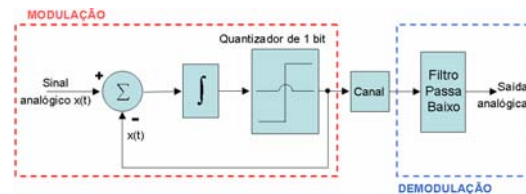


Figura 11 – Diagrama de blocos da modulação Sigma-Delta

Nesse tipo de modulação, o ruído de quantização é dependente da frequência do sinal de entrada, em contraste com a modulação delta. O modulador sigma-delta utiliza um comparador como quantizador, codificando a integral do próprio sinal, sendo sua performance indiferente à variação da taxa de variação do sinal.

## 5. Conclusão

O desenvolvimento de novas tecnologias e novas aplicações no mundo das telecomunicações só é possível com a utilização dos conversores A/D D/A. A busca de uma alta performance, onde a velocidade e capacidade de processamento, juntamente com custo reduzido, são de suma importância em qualquer projeto, tornaram a tecnologia de

conversão analógico-digital Sigma-Delta umas das mais utilizadas [9].

Essa tecnologia possui inúmeras vantagens, dentre elas, a mais importante está no fato da tecnologia ser baseada predominantemente no processamento digital de sinais, fazendo com que os custos de implementação do projeto sejam ainda menores. Além disso, por possuírem natureza digital e uma configuração simplificada, os conversores sigma-delta podem ser integrados em outros dispositivos digitais, trazendo maior facilidade ao projeto.

### Referências Bibliográficas

- [1] Park, Sangil, Principles of Sigma-Delta Modulation for Analog-to-Digital Converters, Strategic Applications – Motorola.
- [2] Eric T. King, Aria Eshraghi, Member, IEEE, Ian Galton, Member, IEEE, and Terri S. Fiez, Senior Member, IEEE: A Nyquist-Rate Delta-Sigma A/D Converter IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 33, NO. 1, JANUARY 1998
- [3] [www.deetc.isel.ipl.pt/analisedesinai/pdsii/downloads/doc/PDS\\_9899.pdf](http://www.deetc.isel.ipl.pt/analisedesinai/pdsii/downloads/doc/PDS_9899.pdf)
- [4] [www.dei.uminho.pt/lic/ps/slides/cap4.pdf](http://www.dei.uminho.pt/lic/ps/slides/cap4.pdf)
- [5] [www.inf.ufrgs.br/~girardi/artigos/01030189.pdf](http://www.inf.ufrgs.br/~girardi/artigos/01030189.pdf)
- [6] [www.ee.pucrs.br/~decastro/pdf/cd6.pdf](http://www.ee.pucrs.br/~decastro/pdf/cd6.pdf)
- [7] [www.revdigonline.com/artigos\\_download/art\\_13.pdf](http://www.revdigonline.com/artigos_download/art_13.pdf)
- [8] Oppenheim, A. V. Digital Signal Processing, Prentice-Hall, 1975.
- [9] Lathi, B. P. Modern Digital and Analog Communication Systems. Oxford University Press, 1998.

### Biografias



Eduardo Augusto Dias Fonseca, cursando o 8º semestre Engenharia de Telecomunicações no IESB, Brasília/DF. Atualmente trabalhando na empresa de telefonia móvel VIVO na Diretoria de Redes de Comunicação/ Gerência de RadioFrequência.



Luiz Alberto Portilho de Lima, cursando o 8º semestre de Engenharia de Telecomunicações no IESB, Brasília/DF. Trabalhando na área de automação de sistemas eletrônicos na INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária.