

## 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].

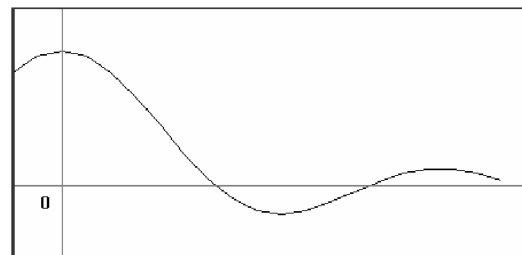


Figura 1 – Sinal em tempo contínuo  $x(t)$

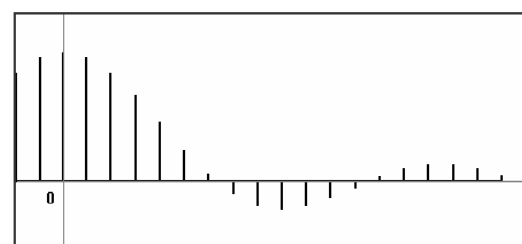


Figura 2 – Sinal em tempo discreto  $x[n]$

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.

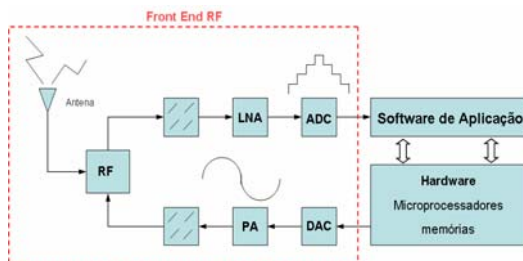


Figura 3 – Caracterização do Front End RF

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.

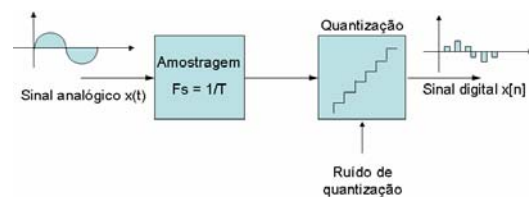


Figura 4 – Modelo simples do processo de conversão Analógico-Digital

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).

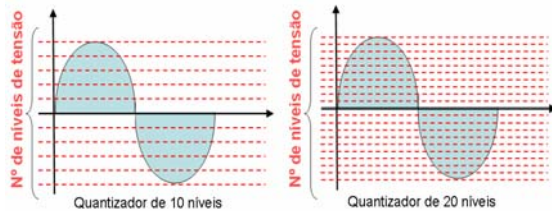


Figura 5 – Precisão de conversão A/D, níveis de quantização.

### 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-

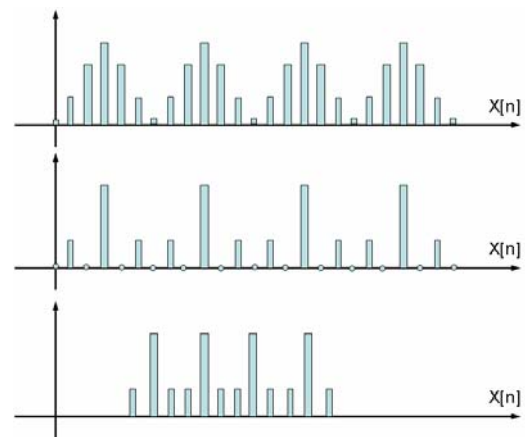


Figura 6 – Processo de decimação

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.

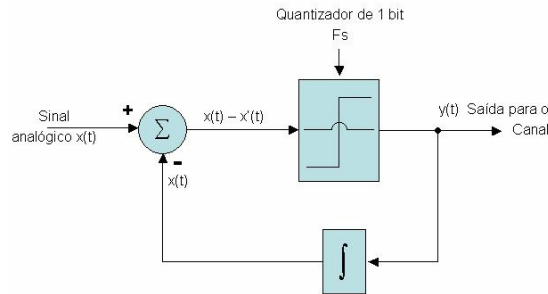


Figura 7 – Modulação Delta

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.

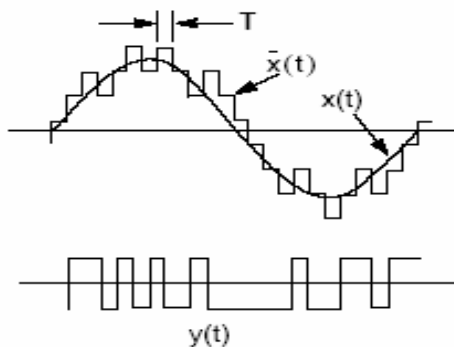


Figura 8 – Sinal após a modulação delta

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.

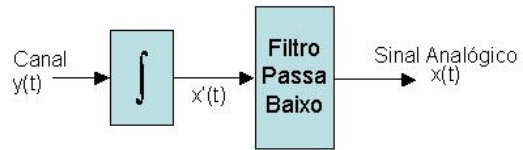


Figura 9 – Demodulação no receptor

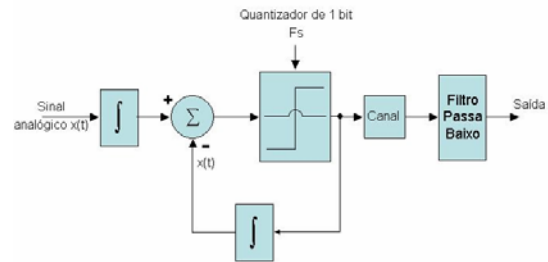


Figura 10 – Derivação da modulação Delta

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.

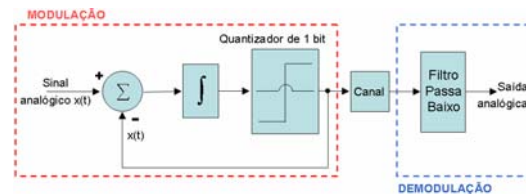


Figura 11 – Diagrama de blocos da modulação Sigma-Delta

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.