

AVALIAÇÃO DO ERRO DE QUANTIZAÇÃO DA CONVERSÃO A/D
PARA SINAIS ELETROENCEFALOGRÁFICOS

S. M. CARDOSO¹, J. NADAL² e A. F. C. INFANTOSI²

RESUMO -- O processamento digital de sinais eletroencefalográficos requer a prévia conversão A/D destes sinais. A variabilidade de amplitudes do EEG ao longo do tempo, conjugada com a necessidade de processar simultaneamente várias derivações de diferentes amplitudes, com mesma amplificação, impede a utilização eficiente da faixa dinâmica do conversor. Há uma perda de resolução do sinal digitalizado e o erro de quantização pode tornar-se significativo. O presente trabalho apresenta uma metodologia para avaliação do erro de quantização em sinais de EEG, resultante da utilização de conversores A/D de 12, 10 e 8 "bits". Os sinais digitalizados com 12 "bits" foram tomados como referência, a partir da qual, sinais de 10 e 8 "bits" foram obtidos ignorando-se os "bits" menos significativos. Utilizando-se as estimativas espectrais de potência dos sinais o erro relativo ao sinal de 12 "bits" foi determinado para cada componente espectral e ritmo do EEG. Os resultados demonstram o progressivo aumento do erro com a redução do número de "bits" e da amplitude do EEG. Procedimentos auxiliares à adequada utilização e escolha de conversores A/D são propostos para a digitalização de sinais eletroencefalográficos.

INTRODUÇÃO

A eletroencefalografia tem sido utilizada como um método básico na investigação clínica de funções cerebrais, através do reconhecimento visual de padrões temporais e de ritmos corticais que constituem o sinal eletroencefalográfico (EEG). Classicamente, o EEG é subdividido em ritmos, com faixas de frequência e amplitudes distintas, denominados de delta, teta, alfa e beta.

O ritmo delta, com frequências inferiores à 4 Hz, é característico de crianças normais menores de seis meses, com amplitude de até 300 μ V (Lairy, 1975), ou de adultos, particularmente, em situações patológicas de sofrimento cerebral (Sepúlveda, 1986). O ritmo teta, na faixa de frequência de 4 a 7,5 Hz, apresenta-se em crianças com mais de 6 meses, com variações de amplitude entre 25 e 100 μ V (Lairy, 1975). Em adultos normais, observa-se ondas teta durante a mudança do estado de vigília para sonolência (Chatrian e Lairy, 1976). Com o amadurecimento do sistema nervoso, o EEG da criança passa a apresentar ritmos com maiores frequências e menores amplitudes, apresentando-se, a partir de dez anos, similar ao do adulto (Sepúlveda, 1986).

-
1. Mestranda do Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ
 2. Docentes do Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68.510, 21944 - Rio de Janeiro - RJ

O ritmo alfa é característico do EEG de indivíduos normais despertos, em repouso, com atividade cerebral moderada, na região occipito-parieto-temporal e nas áreas sagitais (Sepúlveda, 1986). Segundo Chatrian e Lalry (1976), a faixa de frequência de alfa é de 7,5 a 13 Hz e sua amplitude varia entre 5 e 100 μ V. O ritmo beta (13 a 35 Hz) é característico do lobo frontal, com variações de amplitude entre 5 e 30 μ V (Chatrian e Lalry, 1976). Alguns autores, como Ethevenon (1982), sub-dividem o ritmo beta em beta1 (13 a 20 Hz) e beta2 (20 a 35 Hz).

A análise quantitativa do EEG, através de computadores digitais, tem como principal objetivo a identificação e extração de características relevantes ao diagnóstico clínico; informações estas não facilmente identificáveis à inspeção visual do eletroencefalograma. O EEG é um sinal contínuo e não quantizado, que para ser processado deve ser discretizado via conversão analógico-digital (A/D). Entre as especificações consideradas na escolha do conversor A/D, são de fundamental importância o número de "bits" (resolução), a faixa dinâmica e o tempo de conversão. Em particular, a resolução determina o erro de quantização da conversão A/D.

No processamento de sinais eletroencefalográficos, dois aspectos contribuem para evidenciar o erro de quantização. Primeiro, um conjunto de sinais é captado simultaneamente em sítios distintos do escalpo (derivações) utilizando-se um mesmo fator de amplificação. Como as derivações não apresentam a mesma relação de amplitude, algumas destas utilizarão uma fração pequena da faixa dinâmica do conversor. Segundo, em cada derivação, o EEG apresenta variações temporais significativas de amplitude. A conjugação destes dois aspectos faz com que a resolução do sinal seja reduzida, justificando assim investigar-se o erro de quantização.

O objetivo do presente trabalho é descrever uma metodologia de análise do erro de quantização nos ritmos (delta, teta, alfa, beta1 e beta2) e nas componentes espectrais de sinais eletroencefalográficos, discretizados com conversores A/D de 12, 10 e 8 "bits".

METODOLOGIA

O procedimento de avaliação dos efeitos do erro de quantização em sinais eletroencefalográficos, digitalizados com diferentes resoluções, pode ser subdividido em três etapas: (i) o protocolo experimental para a captação do EEG; (ii) a conversão analógico-digital e preparação dos sinais; e (iii) o processamento, baseado em análise espectral.

Aquisição do sinal eletroencefalográfico

O protocolo adotado consistiu na captação do EEG de paciente adulto normal, consciente e não sujeito a nenhum tipo de medicamento. O EEG foi captado, utilizando-se um eletroencefalógrafo BERGER de 16 canais, com eletrodos localizados em sítios distintos do escalpo segundo o Sistema Internacional 10-20 (Ávila, 1988).

Os sinais das 16 derivações unipolares (referência auricular) foram registrados continuamente em papel, e analisados por especialista para a seleção das derivações a serem processadas. As derivações selecionadas foram O1, P3, F3 e F7 no hemisfério cerebral esquerdo, e as simétricas do hemisfério direito (O2, P4, F4 e F8). Esta escolha justifica-se pelas características topográficas do EEG: o ritmo alfa é considerado dominante nas regiões occipital (O1 e O2) e parietal (P3 e P4), normalmente apresentando menores amplitudes na região frontal (F3 a F8), onde pode-se identificar a presença de ritmo beta.

Conversão analógico-digital

Os sinais obtidos das 8 derivações selecionadas foram condicionados para a conversão A/D, através de pré-amplificação e filtragem passa-faixa de primeira ordem com frequências de corte de 0,5 e 50 Hz. O EEG foi digitalizado a 120 amostras por segundo, utilizando-se um conversor de 12 "bits", com excursão de 10 V e tempo de conversão de 100 μ s, e armazenado em um microcomputador AT compatível. Os sinais foram amplificados de modo a aproveitar em torno de 80% da faixa dinâmica do conversor, evitando-se assim a ocorrência de saturação.

O erro de quantização máximo teórico na conversão A/D corresponde à metade do intervalo entre dois níveis de quantização consecutivos (Bendat e Piersol, 1971). No caso do conversor de 12 "bits", de 10 V, este erro resulta em 1,22 mV (0,01% do fundo de escala). Desse modo, mesmo que o sinal digitalizado ocupe apenas 10% da resolução do conversor, o erro relativo à amplitude do sinal será da ordem de 0,1%, portanto insignificante em comparação à outras fontes de ruído e erros intrínsecos ao processamento de sinais. O sinal digitalizado com 12 "bits" de resolução foi tomado como referência para a estimativa do erro produzido pela quantização do EEG em 10 e 8 "bits". Para a análise deste erro, sinais de 10 e 8 "bits" foram obtidos a partir do sinal de referência, desprezando-se os "bits" menos significativos. Este procedimento permite simular o uso de conversores A/D de 10 e 8 "bits" tomando-se amostras no mesmo instante de tempo para os três sinais e mantendo-se a utilização de 80% da faixa dinâmica.

Processamento do EEG

Para a avaliação do erro de quantização foram estimados os espectros de potência utilizando-se o método de periodogramas modificado (Rabiner e Gold, 1975), tomando-se 1024 amostras do sinal (8,53 s) para a obtenção de 64 componentes espectrais. Deste modo procurou-se respeitar a característica de estacionariedade do EEG, válida para trechos inferiores a 20 s (Lopes da Silva, 1987), e reduzir a variabilidade da estimativa espectral, no caso efetuada com 16 graus de liberdade.

Cada trecho do EEG utilizado foi normalizado de modo a obter-se um sinal de média nula e variância unitária. O erro de quantização relativo, em percentagem, para cada componente espectral, foi calculado por

$$E_b(f) = \left| \frac{S_{12}(f) - S_b(f)}{S_{12}(f)} \right| \cdot 100 \quad (1)$$

onde $S_{12}(f)$ = estimativa de potência normalizada do sinal de 12 "bits", para cada frequência f ;
 $S_b(f)$ = estimativa de potência normalizada do sinal de b "bits", para cada frequência f ;
 $E_b(f)$ = erro de quantização, na frequência f , do sinal com b "bits" relativo ao sinal de 12 "bits".

Para a estimação do erro de quantização por faixa de frequência, optou-se pelo cálculo do valor "rms" do erro, dado pela expressão (Bendat e Piersol, 1971):

$$\text{Erms}_b(B) = \left\{ \frac{\sum_B [S_{12}(f) - S_b(f)]^2}{\sum_B S_{12}^2(f)} \right\}^{1/2} \cdot 100 \quad (2)$$

sendo $\text{Erms}_b(B)$ = erro "rms" percentual correspondente à faixa de frequência (B) dos diferentes ritmos do EEG.

RESULTADOS

Um resultado típico da metodologia de avaliação do erro de quantização do EEG, utilizando-se técnica de análise espectral, é apresentado na figura 1. Um trecho de EEG de 8,53 s é mostrado na figura 1A com resolução de 8 "bits". O mesmo trecho com 12 e 10 "bits", quando comparado ao da figura 1A, não apresentou diferenças significativas à inspeção visual, justificando assim avaliação quantitativa efetuada através da análise espectral. Esse trecho refere-se à derivação unipolar O1, com protocolo de olhos fechados. Nestas condições, o ritmo alfa é dominante, como pode ser observado no espectro normalizado do sinal de 12 bits (figura 1B), onde aproximadamente 81% da potência total encontra-se na faixa de 7,5 a 13 Hz. Os erros relativos das estimativas espectrais dos sinais quantizados variam significativamente ao longo de toda a faixa de frequência em estudo, apresentando valores máximos, em torno de 30 Hz (ritmo beta2), de 2,7 e 9,3% em 10 e 8 "bits", respectivamente (figuras 1C e 1D).

Resultados similares aos descritos acima, porém para um trecho de EEG da derivação F7, são mostrados na figura 2. Em F7 o ritmo alfa apresenta-se menos evidente, quando comparado à derivação O1; em termos percentuais (Figura 2B), o pico em alfa tem maior amplitude devido à normalização empregada. Além disso, o protocolo experimental "olhos fechados" é caracterizado pela maior contribuição de alfa em todas as derivações.

A tabela 1 apresenta o erro "rms" normalizado para quantização em 10 e 8 "bits", calculado pela expressão (2), das estimativas espectrais do sinal mostrado na figura 1A. Resultados similares aos mostrados nesta tabela foram determinados para diferentes trechos de EEG da derivação O1.

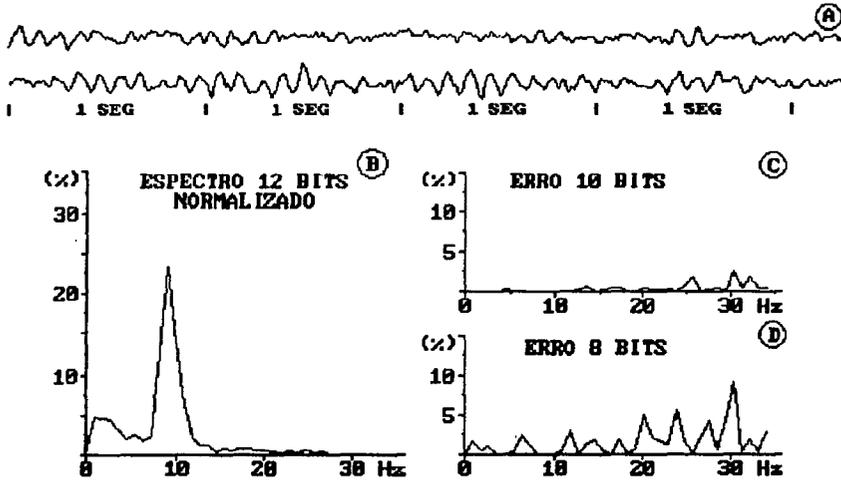


Figura 1. Avaliação do erro de quantização do EEG através da análise espectral. (A) Trecho de EEG, derivação O1, de 8,53 s, com resolução de 8 "bits". (B) Estimativa espectral de potência relativa do EEG mostrado em (A). (C) e (D) Erro relativo ao espectro de 12 "bits", para quantização em 10 e 8 "bits", respectivamente.

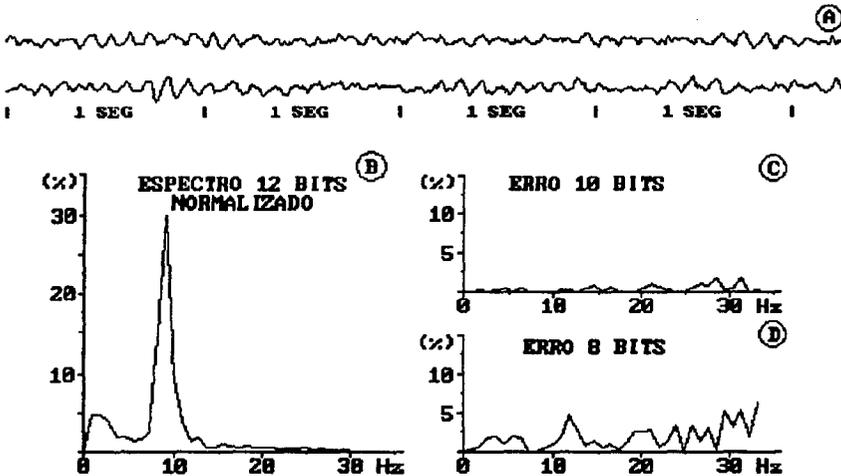


Figura 2. Avaliação do erro de quantização de trecho de EEG, derivação F7.8 "bits", calculado pela expressão (2), das estimativas espectrais do sinal mostrado na figura 1A. Resultados similares aos mostrados nesta tabela foram determinados para diferentes trechos de EEG da derivação O1.

Tabela 1. Erro de quantização "rms" por ritmo do EEG

RITMO	Potencia relativa (%) 12 "bits"	Erro "rms" (%) 10 "bits"	Erro "rms" (%) 8 "bits"
delta	17.71	0.63	1.19
teta	9.27	0.28	1.24
alfa	60.91	0.10	0.29
beta1	7.16	0.42	1.10
beta2	4.95	0.76	3.43

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O erro devido à quantização em 10 "bits" é menor do que o erro relativo à 8 bits, tanto para as componentes espectrais discretas, quanto em termos dos ritmos do EEG. Estes resultados concordam com o esperado teoricamente. A comparação destes resultados com o sinal de 12 "bits" (tomado como referência) indica que o erro de quantização é mais significativo para as componentes espectrais e ritmos do EEG de menor contribuição relativa.

A metodologia de análise espectral utilizada permitiu a avaliação do erro de quantização por faixa de frequência, bem como, a investigação de sua morfologia em todo o espectro de interesse. Os resultados obtidos podem ser estendidos para estimar o erro de quantização devido a utilização inadequada da faixa dinâmica de conversores A/D. Tal assertiva torna-se evidente, como demonstra a seguinte situação: digitalizar um sinal com excursão igual a 25% da faixa dinâmica de um conversor de 10 "bits" equivale, para efeitos práticos, à utilização de um conversor de 8 "bits", implicando portanto em aumentar-se o erro de quantização, conforme visto anteriormente.

Na prática, a escolha de um conversor A/D depende fundamentalmente da aplicação desejada. A inspeção visual de sinais de EEG digitalizados com resolução de 8 "bits" não apresenta diferenças com relação àqueles de maior resolução, sugerindo que, para este objetivo, conversores de 8 "bits" são suficientes. O mesmo ocorre para a análise qualitativa da morfologia espectral de sinais de EEG, por exemplo, na obtenção de Arranjos Espectrais Comprimidos (Ávila, 1988). Entretanto, para análises quantitativas e/ou extração de parâmetros espectrais, como no mapeamento da atividade elétrica cerebral (Ávila, 1988), conversores com no mínimo 10 "bits" seriam mais indicados. No caso da faixa beta2, o conversor de 10 "bits" produz erro inferior a 1%, enquanto que digitalizar à 8 "bits" resulta em erro superior a 3%.

Propostas alternativas para reduzir o erro de quantização na conversão A/D, utilizando instrumentação analógica, podem ser encontradas na literatura. Smith e Johnson (1986), propõe o uso de circuitos de pré-ênfase e de-ênfase sintonizados na faixa beta. Garib e Kohn (1985), utiliza conversores A/D logarítmicos. Finalmente, ao contrário do procedimento usual, pode-se utilizar maiores amplificações nas derivações de EEG com sinais de baixas amplitudes, fazendo-se a digitalização prévia de pulsos de

calibração. Como estes apresentam amplitude conhecida, pode-se efetuar a posterior correção de amplitudes, e deste modo melhorar a utilização da faixa dinâmica dos conversores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsa de estudo, e a Antonio Carlos Guimarães de Almeida e Antonio Sergio Resende Ávila pelo apoio na aquisição e análise visual dos sinais.

REFERÊNCIAS

- AVILA, A. S. R., CAVALCANTI, S. G. e NADAL, J. (1988), "Sistema Experimental de Eletroencefalografia com Análise Espectral e Mapeamento da Atividade Cortical Baseado em Microcomputador", Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Engenharia Biomédica, Volume 5, Número 1, Páginas 91-103.
- BENDAT, J. S. e PIERSOL, A. G. (1971), Random Data Analysis and Measurement Procedures, Wiley-Interscience, New York.
- CHATRIAN, G. E. e LAIRY, G. G. (1976), "The EEG of the Waking Adult", in Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, M. Brazier (Ed.), Elsevier, Volume 6A.
- ETEVENON, P., PIDOUX, B., PERON-MAGNAN, P., RIOUX, P., VERDEAUX, G. and DENIKER, P. (1982), "Computerized EEG in Schizophrenia and Pharmacopsychiatry", in Kyoto Symposia, P.A. Buker (Ed.)
- GARIB, M. A. e KOHN, A. F. (1985), "Sistema de Aquisição de Sinais para Pesquisa em Neurofisiologia. I - Aquisição ponto a ponto", Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, Campinas, Páginas 69-74.
- LAIRY, G. G. (1975), "The Evolution of the EEG from Birth to Adulthood", in Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, M. Brazier (Ed.), Elsevier, Volume 6B.
- LOPES DA SILVA, F. H. (1987), "Computerized EEG Analysis: A Tutorial Overview", in A Textbook of Clinical Neurophysiology, A. M. Halliday, S. R. Butler and R. Paul (Eds.), John Wiley & Sons Ltd.
- RABINER, L. R. and GOLD, B. (1975), Theory and Application of Digital Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- SEPÚLVEDA, F.C.A. (1986), Compêndio de eletroencefalografia, Colina Livraria Editora Ltda, Rio de Janeiro.
- SMITH, J. R. e JOHNSON, A. S. (1986), "A Method for Reducing the Noise Generated in Digitizing or Analog Recording of EEG Data", Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Volume 64, Páginas 375-377.

QUANTIZATION ERROR EVALUATION FOR A/D CONVERSION
OF ELECTROENCEPHALOGRAPHIC SIGNALS

ABSTRACT -- Digital signal processing techniques applied to EEG data requires previous A/D conversion. The adequate use of the dynamic range of A/D converters depends on the amplitude variability of the EEG signals, and the needs of simultaneously processing several derivations - with different amplitude ranges using a same amplification. This consideration can imply in reducing resolution, and so the quantization error can result significant. This paper endeavours to develop a methodology to evaluate the quantization error in EEG signals digitized with 12, 10 and 8 bits. The 12 bits EEG was taking as a reference whereby 10 and 8 bits signals were obtained by ignoring the less significant bits. Using the estimated power spectra, the relative error to 12 bits signal was determined for each spectral component and rhythms of the EEG. The results indicate that the error increases by decreasing the number of bits and the amplitude of the signals. From this analysis, procedures for the adequate use of A/D converters for digitizing EEG data could be suggested.