

SISTEMA EXPERIMENTAL DE ELETROENCEFALOGRAFIA COM ANÁLISE ESPECTRAL
E MAPEAMENTO DA ATIVIDADE CORTICAL BASEADO EM MICROCOMPUTADOR

A. S. R. ÁVILA¹, S. C. CAVALCANTI² e J. NADAL³

RESUMO -- Este trabalho apresenta um sistema desenvolvido para o processamento simultâneo de 16 derivações unipolares do EEG, obtidas em um dos hemisférios cerebrais, através de um eletroencefalógrafo comum. Os sinais captados são transferidos para um microcomputador comercial de 16 "bits" por meio de uma interface que compreende filtros analógicos, amplificadores, circuitos de amostra e retenção e um conversor A/D. O sistema permite a exibição dos sinais em tempo real, em conjuntos de 4 derivações simultâneas. As estimativas espectrais instantâneas de cada derivação, calculadas para até 50 trechos consecutivos de 256 amostras de sinal, são apresentadas em um único gráfico, de aspecto tridimensional, que facilita a observação da evolução temporal dos espectros. O sistema inclui ainda um módulo de Topografia Cerebral, permitindo o mapeamento de parâmetros espectrais em uma superfície correspondente às projeções laterais do hemisfério cerebral. O cálculo dos valores do parâmetro, nos pontos do mapa que não correspondem às posições dos eletrodos, é feito através de interpolação espacial. Os topogramas são apresentados em cores, no monitor do microcomputador, podendo ser obtidas cópias da tela através de uma impressora gráfica comum.

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico observado nas últimas décadas em várias áreas, particularmente em informática, tornou possível a automatização de uma série de atividades que, quando exercidas pelo homem, são sujeitas às suas limitações intrínsecas. Nas áreas da medicina que utilizam a eletroencefalografia, existe o interesse em reconhecer funções hemisféricas difusas ou localizadas, a partir da atividade elétrica cerebral, captada em diferentes projeções através de eletrodos estrategicamente dispostos sobre a superfície craniana. No entanto, a automatização do exame eletroencefalográfico é dificultada pela inabilidade de sistematizar-se os passos seguidos pelo especialista, durante a análise visual do EEG. Nesta tarefa o eletroencefalografista procura interpretar os registros do EEG em papel, baseado em reconhecimento de padrões temporais ou de ritmos corticais, e no esforço de reconstruir mentalmente a atividade elétrica geradora, a partir das projeções observadas. A impressão diagnóstica subsequente constitui um gestaltismo, onde o resultado é alcançado sem que se utilize uma sistemática organizada e claramente definida (Kellaway, 1973). Atualmente, vários pesquisadores têm procurado desenvolver técnicas quantitativas, baseadas em processamento de sinais eletroencefalográficos, para o diagnóstico em distintos casos clínicos, como vítimas de acidentes vasculares e tumores cerebrais, fármaco-dependentes e pacientes mentalmente enfermos (Etevenon, 1984; Etevenon et alii, 1982, 1985; Fenton et alii, 1980; Morstyn et alii, 1983).

A relativa dificuldade em se estabelecer a correspondência entre os sinais fornecidos pelo eletroencefalógrafo e o conhecimento clínico e fisiológico do Sistema Nervoso Central, induz a demanda de meios de pesquisa

1. Mestrando do Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68510, CEP 21945 - Rio de Janeiro - RJ
2. Aluno do Departamento de Eletrônica - EE/UFRJ
3. Professor do Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ

//Trabalho recebido em 30/5/87 e aceito em 27/7/87//

que auxiliem na compreensão do funcionamento cerebral e permitam diagnosticar com eficiência as enfermidades nervosas.

Este trabalho apresenta um sistema experimental, concebido para a aquisição e processamento "em linha" do EEG, baseado no emprego de um eletroencefalógrafo e de um microcomputador comercial de baixo custo. O objetivo principal consiste em representar o EEG de forma mais estruturada e de mais fácil interpretação que a convencional. A utilização do computador no exame clínico permite a execução de técnicas de processamento, cujos resultados podem ser representados através de figuras auto-explicativas, como nos casos da Topografia Cerebral (Duffy et alii, 1979) e dos Arranjos de Espectros Comprimidos (CSA - Compressed Spectral Array) (Bickford et alii, 1973).

METODOLOGIA

Um esquema geral do sistema desenvolvido, ilustrando os vários módulos que o integram, é apresentado na Figura 1.



Fig. 1. Esquema geral do Sistema Experimental de Eletroencefalografia, mostrando as várias partes que integram o sistema.

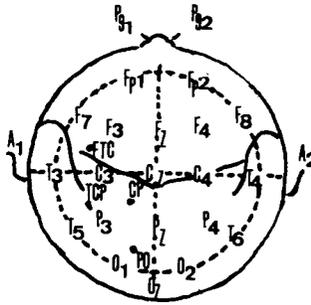
Aquisição de sinais

Com base nas dimensões médias do crânio de um indivíduo adulto normal, e tomando-se como referência os principais acidentes anatômicos do cérebro, os sinais são captados através de 16 eletrodos, colocados na superfície craneana de um dos hemisférios cerebrais conforme a Figura 2. Doze eletrodos seguem o Sistema Internacional 10-20 e os demais, buscando uma maior resolução, são colocados no centro dos quadriláteros formados pelos eletrodos P₃-P₂-O₂-O₁ (PO), C₃-C₂-P₂-P₃ (CP), T₃-C₃-P₃-T₅ (TCP) e F₃-C₃-T₃-F₇ (FTC), no hemisfério esquerdo, ou seus homólogos no direito (Buchsbaum et alii, 1982). Com esta montagem a aquisição do EEG pode ser efetuada utilizando-se um eletroencefalógrafo de 16 canais ou dois aparelhos de 8 canais em paralelo.

Pré-processamento analógico

A saída do eletroencefalógrafo os sinais, já filtrados e amplificados, passam por um novo estágio de filtração, de modo a compatizá-los com o módulo de digitalização. Após o pré-processamento o EEG fica restrito à faixa de frequência de 0,5 a 40 Hz e com amplitude máxima em torno de 10 V.

Digitalização dos sinais -- Os sinais dos 16 canais são amostrados simultaneamente por meio de circuitos sincronizados de amostra e retenção (S&H - "Sample and Hold"), na frequência de 120 Hz. As amostras analógicas, a seguir, são "multiplexadas" e digitalizadas por meio de um conversor A/D de 10 "bits" de precisão e transferidas para a memória do microcomputador.



CALOTA CRANIANA

Fig. 2. Posicionamento dos eletrodos no crânio, para aquisição do EEG (vista superior). Fonte: Buchsbaum et alii (1982)

Processamento digital

Todo o "software" para o processamento foi escrito na linguagem Turbo Pascal (Borland Inc.), com algumas rotinas em "Assembly", podendo ser executado em qualquer microcomputador compatível com o IBM PC/XT.

Calibração -- O sistema pode ser calibrado de dois modos distintos. Inicialmente o sinal obtido de cada derivação deve ser exibido em tempo-real, na tela do monitor, sendo indicados os níveis zero, positivo e negativo, de acordo com o sinal de entrada. O eletroencefalógrafo deve ser colocado no modo de calibração, com saídas teoricamente nulas, para a calibração de "off-set".

A calibração de amplitude e constante de tempo do sistema pode ser realizada utilizando-se o módulo de EEG digital, que permite a exibição "on-line" dos sinais, paralelamente ao procedimento de aquisição do EEG, efetuada por interrupção. Como o tempo máximo consumido na conversão A/D de uma amostra é de aproximadamente 40 μ s e o intervalo de amostragem é 8,33 ms, dispõe-se de mais de 7 ms para o armazenamento em memória e exibição das 16 amostras. Devido à limitação em resolução gráfica são exibidas apenas 4 derivações por vez, à livre escolha do usuário. O processo pode ser interrompido a qualquer tempo, com o congelamento da imagem na tela e a possibilidade de produção de cópia da mesma em papel, através de uma impressora gráfica. Neste módulo pode-se calibrar o sistema utilizando o pulso de calibração gerado pelo eletroencefalógrafo.

Rejeição de artefatos -- Sendo a presença de artefatos um problema inerente à eletroencefalografia, o sistema permite que seja armazenado em memória aproximadamente 100 s de sinal, em 50 trechos consecutivos de 256 amostras por derivação. O operador é habilitado a examinar os trechos, um a um, e selecionar aqueles que se apresentam livres de contaminações indesejáveis e serão utilizados no processamento posterior.

Estimativas espectrais -- São obtidas estimativas espectrais de cada segmento de 256 amostras, com superposição de 50% entre segmentos consecutivos (Wadbrook, 1977): processa-se um trecho de 256 amostras, a seguir processa-se as últimas 128 amostras deste trecho seguidas das primeiras 128 do trecho seguinte, depois toma-se o outro trecho; o procedimento é repetido

sequencialmente até processar-se todo o sinal previamente selecionado. A cada segmento é aplicada uma janela de Hanning, para evitar a ocorrência de "leakage", e calculada a Transformada Rápida de Fourier (FFT), utilizando-se um algoritmo escrito em "Assembly", capaz de processar 256 pontos em aproximadamente 160 ms, com um "clock" de CPU de 8 MHz. O resultado obtido é alisado através da decimação em frequência dada pela expressão (Bendat and Piersol, 1971):

$$X(n) = \frac{X(n-1) + 2 X(n) + X(n+1)}{4} \quad (1)$$

onde: $X(n)$ = n-ésima componente espectral do sinal
 $n = 2, 5, 8, \dots, 254$.

Processamento gráfico

CSA -- As várias estimativas espectrais instantâneas de cada derivação podem ser exibidas simultaneamente na tela do monitor, utilizando-se a técnica de Arranjo de Espectros Comprimidos, esquematizada na Figura 3. Pode-se também obter os espectros médios de cada derivação e exibí-los em conjuntos de 4.

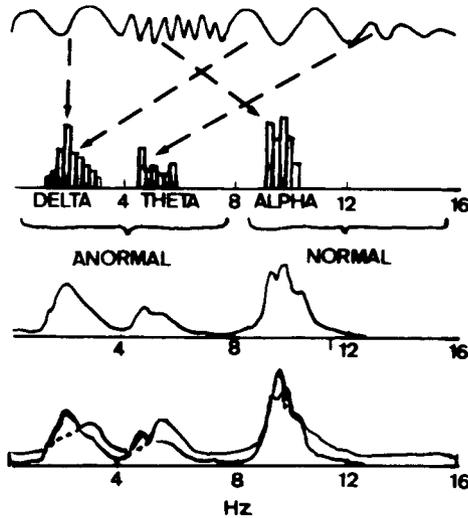


Fig. 3. Técnica de construção do Conjunto de Espectros Comprimidos (CSA). A 1ª linha apresenta um traçado de EEG hipotético, com frequências normais e patológicas misturadas. Estas são reordenadas durante a análise espectral, que tende a separar as frequências normais e patológicas, uma vez que estas últimas concentram-se nas faixas inferiores (à esquerda) do espectro: ritmos delta e teta (2ª linha). A estimativa espectral é alisada (3ª linha) para a seguir entrar no processo de plotagem (4ª linha). O espectro de cada trecho consecutivo de sinal é apresentado por trás dos anteriores, fazendo-se a supressão das linhas ocultas. Este artifício confere ao gráfico um aspecto tridimensional, que facilita a sua compreensão. Fonte: Bickford et alii (1973)

Topografia Cerebral -- A partir das estimativas espectrais médias, completas ou subdivididas em faixas de frequência correspondentes aos ritmos cerebrais delta (0,5 a 3,5 Hz), teta (3,5 a 7,5 Hz), alfa (7,5 a 12,5 Hz) e beta (12,5 a 25,0 Hz), vários parâmetros espectrais podem ser obtidos, tais como potência média, coeficiente de variação da potência, amplitude média e coeficiente de variação da amplitude.

A partir dos 16 valores discretos de cada parâmetro pode-se estimar a amplitude do mesmo em cada ponto do hemisfério cerebral em estudo, por meio de interpolação espacial não linear (Buchsbbaum et alii, 1982 e Etevenon, 1984). A técnica de interpolação implementada considera, para o cálculo do valor em um determinado ponto, apenas as amplitudes do parâmetro nos quatro eletrodos mais próximos, ponderados pelo inverso das distâncias do ponto aos eletrodos em questão.

Os mapas resultantes podem ser exibidos no próprio monitor do sistema, com as amplitudes quantizadas em dez níveis, representados por distintos padrões de cor. Opcionalmente os topogramas podem ser exibidos em monitor monocromático ou reproduzidos em papel através da impressora gráfica, sendo cada nível de amplitude expresso em diferentes níveis de cinza.

Os sinais, durante o processamento, podem ser armazenados em disco magnético, constituindo um banco de dados útil para processamentos futuros.

RESULTADOS

A Figura 4 apresenta a tela de controle do sistema, exibida logo após a inicialização. Nesta tela procurou-se colocar as principais operações que podem ser realizadas. A programação das teclas F1 a F10 do microcomputador foi feita de modo a facilitar a execução das principais funções do sistema.

O EEG digitalizado é exibido na tela do monitor, apresentando 4 derivações simultâneas, à escolha do operador. Pode-se obter reproduções da tela em papel, como o exemplo mostrado na Figura 5. O sistema permite ainda a leitura das amplitudes das amostras exibidas, em pontos escolhidos com o auxílio de um cursor, bem como a seleção de trechos livres de artefatos.

A evolução da informação espectral do sinal de cada derivação é exibida através do módulo CSA (Figura 6). Este módulo permite a escolha, pelo usuário, de diferentes perspectivas (posição relativa do observador).

A Figura 7 apresenta 4 estimativas espectrais médias, mostrando a utilização do cursor para a verificação da amplitude de cada harmônico. A partir dos espectros médios, podem ser extraídos diferentes parâmetros para a Topografia Cerebral. No estágio atual do sistema somente está implementado o cálculo da amplitude média do espectro, para as faixas de frequência correspondentes aos ritmos cerebrais alfa, beta, teta e delta.

A Figura 8 apresenta o topograma cerebral da amplitude média do ritmo alfa, no hemisfério direito de um paciente. Este topograma exibe amplitudes anormalmente elevadas, quando comparado ao resultado equivalente ao hemisfério esquerdo (Figura 9). Estes mapas foram obtidos a partir do EEG de um paciente acometido de Acidente Vascular Cerebral com hemiplegia à direita. As regiões de maior intensidade delta, no hemisfério direito, representam focos de lesão no território profundo da artéria cerebral média, confirmados por tomografia computadorizada. Os valores dos parâmetros para a obtenção dos topogramas foram extraídos do trabalho de Etevenon (1984), e os mapas apresentaram-se compatíveis com os originais publicados por este autor.

SISTEMA MONITOR TOPOGRAFO CEREBRAL

maio 87 , revisao 1.7

T - Topografia Cerebral

- 1- Impressao :nao
- 2- Tipo :Potencia Media
- 3- Parametro :Delta

L
Analise
Espectral

E - E.E.G. Digital

- 4- Impressao 4 C :nao
- 5- Impressao 16 C :nao
- 6- Pag. P/ Impr. : 1

N - Dados Do Paciente. H - Hemisferio:esq. S - Estatistica

UTIL

- F1 -> Calibrar.
- F2 -> Inicializa Exame.
- F3 -> Suspende Exame. (Exame suspenso)
- F4 -> Salva Trechos Marcados em Disco.
- F5 -> Visualizar 16 Canais.
- F6 -> FFT direta.
- F7 -> FFT inversa.
- F8 -> Editar Grafico no Dominio do Tempo.
- F9 -> Editar Grafico no Dominio da Frequencia.

F10 - Fim

Canal

- A= 1
- B= 2
- C= 3
- D= 4

Pag. 1

Fig. 4. Página inicial do sistema com opções de controle.

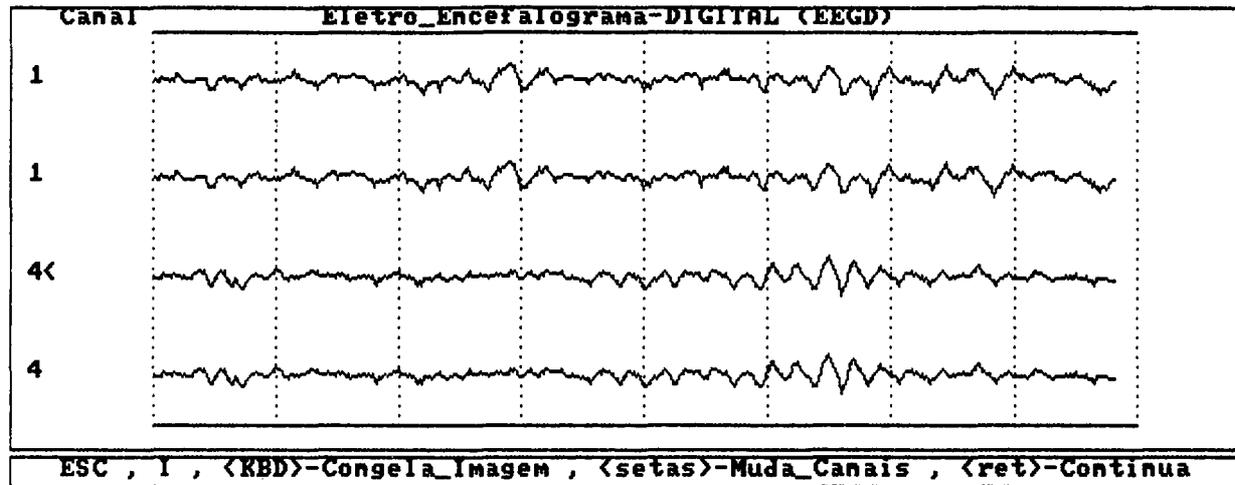


Fig. 5. Exibição do EEG de dois canais (1 e 4) repetidos na segunda e quarta linhas. Nota-se o ritmo alfa.

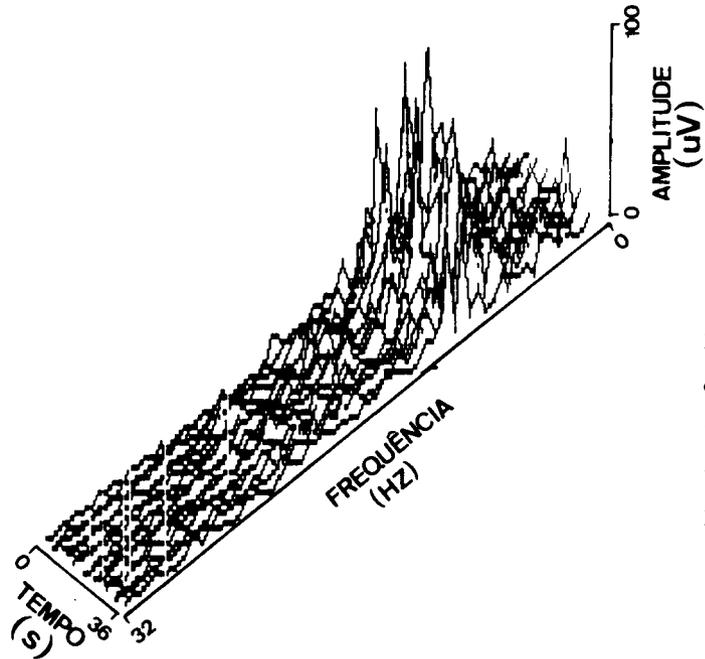


Fig. 6. Espectros instantaneos do canal 4, demonstrando altas amplitudes na faixa alfa e teta (paciente de olhos fechados e algo sono - lento). Derivação $P_3 - A_1$.

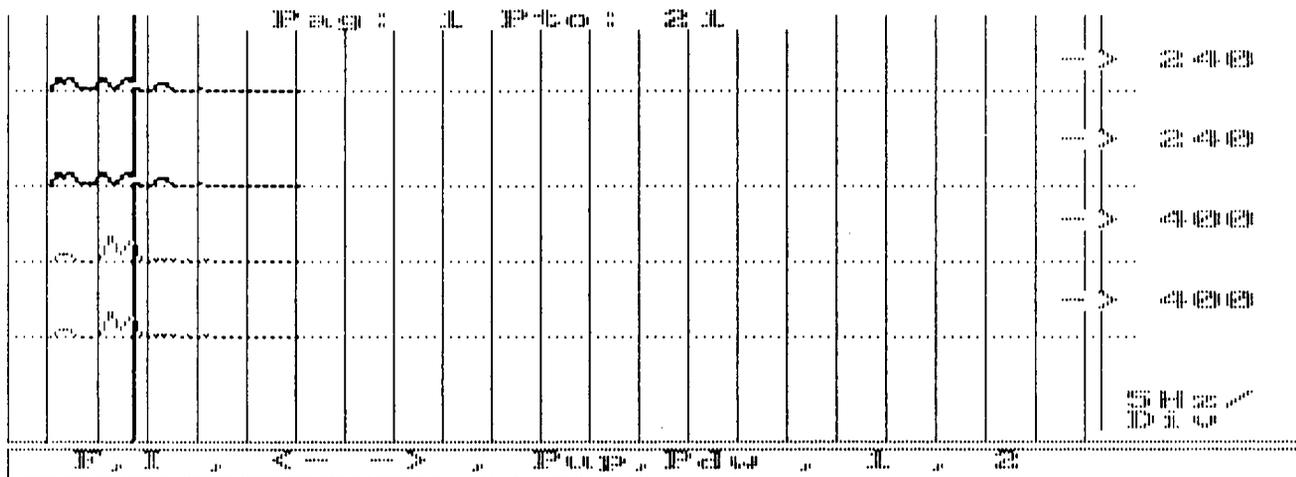


Fig. 7. Espectros médios dos canais 1 e 4, notando-se alta potência na faixa alfa e teta (paciente de olhos fechados e sonolento). Escala vezes oitenta.

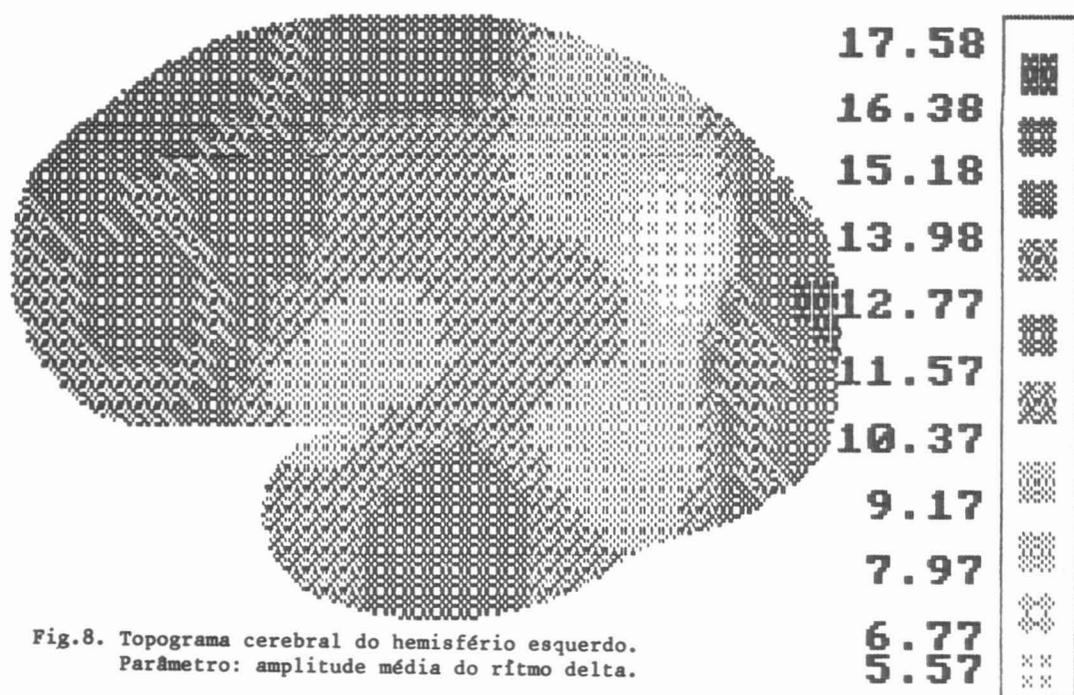


Fig.8. Topograma cerebral do hemisfério esquerdo.
Parâmetro: amplitude média do ritmo delta.

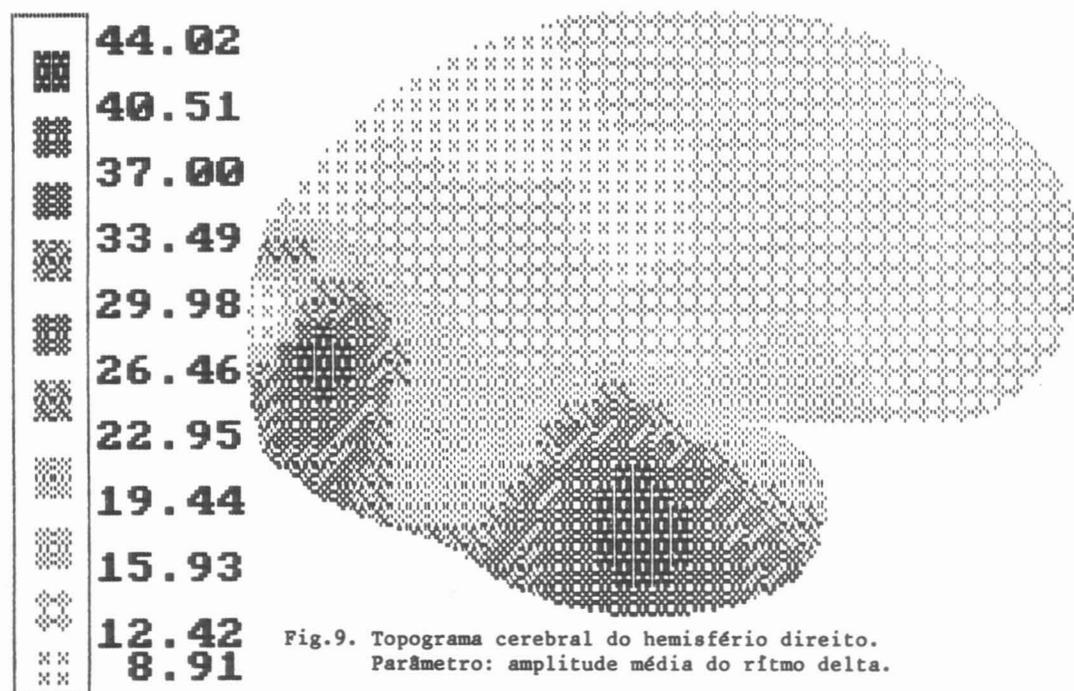


Fig.9. Topograma cerebral do hemisfério direito.
Parâmetro: amplitude média do ritmo delta.

CONCLUSÃO. E DISCUSSÃO

O trabalho desenvolvido teve por meta alcançar o domínio de uma tecnologia, capaz de analisar o EEG sob uma ótica de padronização e objetividade diagnóstica. Desde o advento da eletroencefalografia, em 1927, muitas considerações têm deixado de ser feitas, ou sido feitas de modo impróprio, sobre as reais correlações entre as funções e disfunções do cérebro e dos ritmos bioelétricos captados, devido à limitação natural do homem em compreender os traçados do EEG. O sistema apresentado atende, ao menos em parte, ao objetivo, permitindo o acesso direto do clínico à informação espectral, anteriormente considerada de forma empírica e limitada, e exibindo a informação através de imagens de fácil interpretação. Os topogramas gerados permitem uma análise objetiva quanto à localização e extensão de alterações anátomo-funcionais ao nível cortical, devidas a diferentes tipos de enfermidades. Este salto de qualidade pode ser obtido a um custo material bastante reduzido, uma vez que, a qualquer unidade que já disponha de serviço de eletroencefalografia, basta acrescentar-se um sistema computacional relativamente simples. O potencial de difusão da tecnologia torna-se ainda maior se, em um projeto integrado, substituir-se o eletroencefalógrafo por um módulo apenas de aquisição de sinais, eliminando-se a necessidade de um polígrafo analógico.

Ao nível de investigação científica experimental o sistema encontra aplicações potenciais em vários campos, como a Neuropsicofarmacologia e a "Psiquiatria Biológica" (Biological Psychiatry), conforme indicam vários achados bibliográficos (Duffy et alii, 1979; Buchsbaum et alii, 1981; Morstyn et alii, 1983; Laurian et alii, 1983 e Etevenon, 1984). A possibilidade de formação de banco de sinais de diferentes patologias, com o uso de memórias de massa, torna factível a investigação "a posteriori", com a integração de técnicas de várias áreas de conhecimento, tais como análises estatísticas multivariadas, reconhecimento de padrões e teoria da decisão. Segundo a revisão bibliográfica apresentada por Etevenon (1982), vários autores têm demonstrado a potencialidade da análise espectral do EEG no diagnóstico de diferentes patologias, inclusive de natureza psíquica. Compreendendo a importância desses quadros mórbidos na nosologia médica, segundo o mesmo autor, a pesquisa e desenvolvimento da eletroencefalografia computadorizada e dos sistemas de topografia cerebral pode levar a uma verdadeira revolução nos atuais meios de diagnósticos complementares em Neuropsiquiatria, em âmbito mundial.

O sistema descrito encontra-se em desenvolvimento, tendo sido apresentados apenas os recursos disponíveis na primeira versão. Uma segunda versão, ainda para uso no desenvolvimento da técnica de topografia cerebral e em pesquisa, está sendo desenvolvida. As principais limitações técnicas do sistema apresentado encontram-se na resolução gráfica e na capacidade de memória do microcomputador utilizado. A adoção de uma linguagem de computação capaz de gerar códigos mais otimizados e compactos que o Turbo Pascal e o uso de um sistema de vídeo de alta resolução permitirão incrementar consideravelmente o potencial de utilização do presente sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico do Engenheiro Biomédico Carlos Alberto Cordeiro Pires, às contribuições dos professores Ronney Bernardes Panerai e Antonio Fernando Catelli Infantosi, e à CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

REFERENCIAS

- BENDAT, J. S. and PIERSOL, A. (1971), "Random Data Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons, New York
- BICKFORD, R. G., BRIMM, J., BERGER, L. and AUNG, M. (1973), "Application of Compressed Spectral Array in clinical EEG", in "Automation of Clinical Electroencephalography", P. Kellaway and I. Petersén (Eds.), Raven Press, New York, pp. 55-64
- BUCHSBAUM, M. S., RIGAL, F., COPPOLA, R., CAPPELLETTI, J., KING, C. and JOHNSON, J. (1982), "A new system for gray-level surface distribution maps of electrical activity", *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, v. 53, pp. 237-242
- BUCHSBAUM, M. S., COPPOLA, R., GERSHON, E. S. and Van KAMMEN, D. P. (1981), "Evoked potential measures of attention and Psychopathology", *Adv. Biol. Psychiat.*, v. 6, pp. 186-194
- DUFFY, F. H., BURCIFIEL, J. L. and LOMBROSO, C. T. (1979), "Brain Electrical Activity Mapping (BEAM): A method for extending the clinical utility of EEG and Evoked Potential data", *Ann. Neurol.*, v. 5, pp. 309-321
- ETEVENON, P. (1984), "Cartographie EEG: une nouvelle méthode d'imagerie médicale non invasive: exemple détaillé d'un cas d'accident vasculaire cérébral", in "Nouvelles explorations atraumatiques en pathologie vasculaire cérébrale", Pr. Cambier (Ed), Spécia, Paris, pp. 103-109
- ETEVENON, P., PIDOUX, B., PERON-MAGNAN, P., RIOUX, P., VERDEAUX, G. and DENIKER, P. (1982), "Computerized EEG in schizophrenia and pharmacopsychiatry", in "Kioto Symposia", P.A. Buker (Ed.)
- ETEVENON, P., TORTRAT, D. and BENKELFAT, C. (1985), "Electroencephalography Cartography", *Neurophysiology Mendlewicz*, v. 13, pp. 141-146
- FENTON, G.W., FEUWICK, P.B.C., DOLLIMORE, J., DUMM, T.L. and HIRSCH, S.R. (1980), "EEG spectral analysis in schizophrenia", *Brit. J. Psychiat.*, v. 136, pp. 445-455
- KELLAWAY, P. (1973), "Automation of clinical electroencephalography: the nature and scope of the problem", in "Automation of Clinical Electroencephalography", P. Kellaway and I. Petersén (Eds.), Raven Press, New York, pp. 1-24
- LAURIAN, S., GAILLARD, J. M., LE, P. K. and SCHOPF, J. (1983), "Topographic aspects of EEG profile of some psychotropic drugs", *Adv. Biol. Psychiat.*, v. 13, pp. 165-171
- MORSTYN, R., DUFFY, F. H. and McCARLEY, R.W., (1983), "Altered topography of EEG spectral content in schizophrenia", *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, v. 56, pp. 263-271
- WADBROOK, D. C., MacGILLIVRAY, B. B. and QUILTER, P. M. (1977), "Analysis of the electroencephalogram using short epoch Fourier transforms", *Colloquium on Random Signal Analysis, IEE*, pp. 53-64

MICROCOMPUTER BASED EXPERIMENTAL ELECTROENCEPHALOGRAPHIC SYSTEM
WITH SPECTRAL ANALYSIS AND TOPOGRAPHIC BRAIN MAPPING

ABSTRACT -- This work describes a experimental system developed for the simultaneous processing of 16 EEG unipolar derivations of a brain hemisphere. The system was designed for connecting an electroencephalograph to a microcomputer (IBM PC/XT like), through a signal conditioning module and an A/D interface. Both time and frequency domain analysis can be performed to facilitate clinical interpretation and application. EEG signals are exhibited on real time. Mean and smoothed spectral estimations are calculated from selected epochs of EEG signals, free of artefacts, using FFT algorithm and Hanning window. The time evolution of EEG spectra are displayed using Compressed Spectral Arrays (CSA), a perspective method with hidden line supression. The system also includes a Topographic Brain Mapping module whereby spectral parameters can be mapped on a surface corresponding to the lateral projection of a brain hemisphere. A spatial interpolation was used to estimate the parameter values at points where no electrodes are located. An output module was also included, whereby printed copies of the displayed results may be obtained by using a dot matrix printer.