

RECURSOS ÚTEIS AO DESENVOLVIMENTO DE MICROCOMPUTADORES
PARA PROCESSAMENTO DE SINAIS EM TEMPO-REAL

J. Nadal¹, W.C.A. Pereira² e F.S. Schlindwein³

RESUMO -- A equipe vem há vários anos trabalhando no desenvolvimento de um monitor automático de arritmias cardíacas. Como subprodutos dessa linha de investigação foram desenvolvidos microcomputadores de uso geral adequados ao processamento de sinais em tempo-real, bem como foi criada uma infra-estrutura que possibilita o desenvolvimento de microcomputadores dedicados a funções específicas de forma rápida e a baixo-custo. Vários recursos de "hardware" e "software" foram implementados com vistas a conferir maior capacidade de processamento a esses sistemas. Este trabalho apresenta alguns dos recursos mais úteis empregados, bem como procura analisar os efeitos da utilização dos mesmos sobre o desempenho geral dos sistemas. São abordados os seguintes tópicos: conversores A/D com entrada multiplexada e um dispositivo de amostra e retenção para cada entrada, técnica de exibição de sinais em tempo-real baseada em memórias de duplo acesso, avaliação de tempo de execução de algoritmos para processamento em tempo-real, armazenadores circulares de amostras e programas monitores para desenvolvimento de sistemas.

INTRODUÇÃO

A opção pelo desenvolvimento próprio de microcomputadores para processamento de sinais biológicos foi feita devido à indisponibilidade de microcomputadores no mercado nacional, no final dos anos 70, quando se iniciou o projeto de desenvolvimento de monitores automáticos de arritmias cardíacas. Com o progressivo aumento de ofertas de sistemas de baixo-custo observado no Brasil, a partir dos primeiros anos 80, a diretriz adotada passou a ser questionável. No entanto, a equipe do emergente Laboratório de Microcomputadores do Programa de Engenharia Biomédica optou por manter o esforço de desenvolvimento local de sistemas, procurando sempre a integração plena com os recursos oferecidos pelos novos equipamentos comerciais de uso geral. Essa iniciativa mostrou-se correta, ao constatar-se a enorme dificuldade de se obter informações técnicas dos sistemas comerciais brasileiros, bem como a inexistência de sistemas adequados ao processamento de sinais biológicos, possivelmente devido à demanda restrita, insuficiente

-
- 1,2 - Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ, Cx.Postal 68510, 21945 - Rio de Janeiro - RJ.
3 - Leicester Royal Infirmary - Medical Physics Department - Leicester, LE1 5WW. England.

///Trabalho recebido em 30/06/87 e aceito em 23/07/87///

para atrair o interesse empresarial do setor de informática. Atualmente já se dispõe de resultados concretos desse esforço, tanto em Pesquisa & Desenvolvimento, quanto em formação de recursos humanos. Alguns sistemas já se encontram em uso na prática médica e em outros laboratórios de pesquisa. Vários ex-integrantes da equipe atuam hoje em diferentes setores profissionais, onde a experiência adquirida no laboratório lhes tem sido útil. O laboratório, por sua vez, dispõe de um conjunto bastante satisfatório de recursos para o desenvolvimento de pesquisas, e a equipe tem a vantagem de trabalhar com domínio completo sobre os sistemas, podendo promover a constante implementação de melhorias e a manutenção local, reduzindo a dependência de serviços externos. Nos parágrafos seguintes são apresentados ou revistos alguns dos recursos que têm demonstrado maior utilidade no desenvolvimento das pesquisas.

CARACTERÍSTICAS DO MICROCOMPUTADOR DE SINAIS BIOLÓGICOS

As particularidades específicas de um sistema para processamento de sinais biológicos, em termos de "hardware" estão relacionadas aos dispositivos de entrada e saída da informação. Em primeiro lugar o sistema deve ter a capacidade de aquisição e processamento de sinais analógicos obtidos simultaneamente em várias derivações (exemplo: ECG) ou de sinais distintos, interrelacionados. Um segundo item importante é a capacidade de exibir os sinais originais ou resultados parciais e finais do processamento, quer seja através de dispositivos com tela de imagem - osciloscópios, monitores, "displays" digitais - ou por meio de registros em papel - impressoras gráficas, plotadores, registradores de sinais em papel contínuo, etc. De posse dessas características básicas, as demais especificidades residem basicamente em rotinas de "software" e instrumentos analógicos, que em muitos casos podem ser reduzidos a eletrodos ou transdutores e condicionadores de sinais para a conversão analógico-digital, compostos de amplificadores e filtros.

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

O sistema básico implementado já foi descrito anteriormente por Schlindwein, Caprihan e Gandra (1982) e permite o processamento simultâneo de até oito sinais distintos. Após o pré-processamento analógico (amplificação e filtragem) o sinal é passado por um multiplexador, seguido de conversor de nível, dispositivo de amostra e retenção (S&H - "Sample & Hold"), conversor analógico-digital (A/D) até chegar à unidade central do microcomputador (Figura 1). Os controles do multiplexador, S&H e do conversor A/D são efetuados através de uma porta programável 8255 (Component Data Catalog, 1981). A retenção das amostras é fundamental quando se utilizam conversores A/D lentos. A variação do sinal à entrada do conversor, se permitida, equivale a uma redução da faixa dinâmica de resposta em frequência desses dispositivos.

Uma alternativa ao esquema descrito foi também implementada (Stephan e Lobianco Jr, 1983), com a colocação de um S&H para

cada canal analógico, a entrada do multiplexador. Esse recurso permite a obtenção de amostras de todos os canais em um mesmo instante de tempo, e é vantajoso em casos onde se estuda relações temporais entre diferentes sinais ou se pretende recompor um sinal a partir de várias projeções, por exemplo no caso de vetocardiografia.

EXIBIÇÃO DE SINAIS EM TEMPO-REAL

No procesamento de sinais em tempo-real, ou mesmo quando os sinais são armazenados para posterior processamento, é muito útil a possibilidade de monitoração visual do sinal que está sendo digitalizado, durante a aquisição. Para tal ser possível é necessário dispor de um sistema de exibição suficientemente rápido a ponto de não comprometer o processamento adicional. A técnica implementada baseia-se na utilização de bancos de memórias de duplo acesso, em que a varredura do corteúdo da memória para fins de exibição é comandada por meio de um contador digital de baixo-custo (Figura 2). Nesse caso o tempo de processamento gasto corresponde ao tempo de acesso a um dispositivo de E/S. Uma descrição detalhada é feita por Schindwein, Gandra e Caprihan (1982). A estrutura é bastante versátil, possibilitando a exibição de trechos de sinais de diferentes durações, e mesmo a exibição simultânea de mais de um sinal, num mesmo monitor ou osciloscópio.

RECURSOS ÚTEIS PARA PROCESSAMENTO EM TEMPO-REAL

A principal linha de pesquisa desenvolvida no laboratório - projeto de monitores inteligentes de arritmias - constitui um exemplo típico de processamento de sinais em tempo-real. Nesse caso a amostragem do sinal é feita a taxa de 240 amostras/seg, sendo a aquisição controlada por interrupção, e todas as amostras devem ser processadas. Alguns recursos foram implementados visando a avaliação dos tempos de execução dos algoritmos e uso racional do tempo total disponível.

TEMPO DE PROCESSAMENTO

Comumente os algoritmos computacionais mais complexos apresentam tempos de execução variáveis, pela inclusão de "loops" de instruções de durações diversas, desvios e retornos condicionais. O processamento varia em função da amostra, ou do contexto temporal em que a mesma está inserida. A distribuição relativa dos vários tempos de execução de determinado algoritmo ou rotina constitui uma forma importante de avaliar a qualidade do mesmo. Com esse propósito foi desenvolvido uma técnica de avaliação baseada em um "hardware" muito simples, composto basicamente de um contador programável 8253 (Component Data Catalog, 1981), conforme o esquema da figura 3. Os demais circuitos incluídos na montagem (divisor por 4 e lógica de endereçamento) são comuns a qualquer utilização do contador, que requer "clock" externo e funciona como porta de entrada/saída do computador, com quatro endereços. O C.I. 8253 é constituído de três contadores internos de 16 bits cada, decrescentes e capazes

de operar em varios modos distintos. Nessa aplicação são utilizados dois contadores ligados em cascata. O primeiro deles funciona como um divisor, gerando na saída, uma onda quadrada que atua como "clock" para o contador seguinte. O terceiro contador está livre e disponível para outra aplicação. A cada amostra, imediatamente antes da execução do algoritmo sob avaliação, uma rotina inicializa os contadores e logo após a execução, outra rotina lê os seus conteúdos. A técnica foi utilizada para a avaliação da distribuição dos tempos de processamento de dois algoritmos de detecção de complexos QRS, para escolha de qual deles é mais adequado para integrar o monitor de arritmias em desenvolvimento. Para a avaliação do consumo de tempo foram feitos histogramas relativos ao processamento de 30 minutos contínuos de ECG, amostrados a 240 Hz (Figura 4). Portanto cada algoritmo foi executado aproximadamente 432.000 vezes. Os histogramas foram divididos em 256 classes, com largura de classe igual a 1/128 do intervalo de amostragem (1/240 seg). Nesse caso, a ocorrência de um evento na última classe implica que o processamento do algoritmo consumiu um tempo próximo a duas vezes o intervalo de amostragem. Como eventualmente pode ocorrer que o tempo gasto seja ainda maior, optou-se por colocar também na última classe do histograma o registro dessas ocorrências. Para a construção do histograma em tempo-real, foi reservado um banco de memórias, com três bytes consecutivos para cada classe. Nessas condições, cada classe pode abrigar mais de 432.000 eventos. O contador mais rápido da 8253 é programado para gerar um pulso de saída a cada intervalo de tempo correspondente à largura de classe do histograma, de modo que apenas o conteúdo do contador mais lento precisa ser lido pela CPU, e seu complemento indica diretamente qual classe do histograma deve ser incrementada.

USO DE ARMAZENADORES CIRCULARES DE AMOSTRAS

Se o processamento for efetuado de modo clássico, em tempo-real, o tempo absoluto para o processamento de cada amostra de sinal é dado pelo intervalo de amostragem. No entanto, na maioria das aplicações, um atraso no processamento limitado a um pequeno número das amostras não compromete os resultados, desde que todas as amostras sejam processadas. Quando ocorrer o atraso momentâneo, as amostras devem ser armazenadas em memória para processamento posterior. Para tornar operacional esse recurso, faz-se uso de armazenadores ("buffers") circulares. Todas as amostras fornecidas pelo conversor A/D vão sendo armazenadas em posições consecutivas de memória, até um dado limite (por exemplo 64 posições), a partir do qual cada novo dado substitui aquele mais antigo existente no armazenador.

Para a correta execução o "software" dispõe de dois apontadores ou acumuladores, um indicando a posição da última amostra digitalizada e outro a posição da última já processada. O computador processa continuamente as amostras até que os apontadores se igualem, quando entra em "HALT", do qual só sairá quando uma nova amostra for obtida, com a consequente atualização do apontador de chegada de dados. Nessa forma de realização, o

processamento em tempo-real passa por uma redefinição, e será possível sempre que o tempo médio de processamento for inferior ao intervalo de amostragem, e que os atrasos consecutivos não acarretem uma fila de amostras a processar superior ao tamanho do armazenador, configurável por "software". Um exemplo de aplicação é dado pelos algoritmos de detecção de ondas "R" descritos no parágrafo anterior. Como pode-se observar pelos histogramas apresentados na figura 5, algumas vezes o tempo de processamento dos algoritmos apresentou-se superior a um intervalo de amostragem. No caso do algoritmo de Lima-Engelse, figura 5.B, o acúmulo de ocorrências observado na última classe do histograma indica que em algumas situações o processamento demanda tempos superiores a dois intervalos de amostragem. A escala logarítmica foi usada na figura para intensificar os conteúdos das classes mais vazias, constituindo um recurso útil para a visualização da distribuição dos intervalos de tempo consumidos no processamento de um dado algoritmo.

PROGRAMAS MONITORES PARA O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

Os microcomputadores para processamento de sinais desenvolvidos dispõem de um programa monitor constituído de funções simples, que permitem o controle do sistema, e o acompanhamento da execução do programa. No entanto, quaisquer alterações locais do "software" devem ser feitas diretamente no programa objeto, por meio de instruções hexadecimais, e o sistema não dispõe de dispositivos de memórias de massa, como unidades de fita cassete ou controladores de discos. Para se dotar o sistema de maior flexibilidade de interação com o usuário, é adotado um procedimento voltado à comunicação serial. Todo o "software" é desenvolvido em um microcomputador comercial, com sistema operacional CP/M. As várias versões dos programas fonte são armazenadas em disquetes, em módulos separados. Somente após a criação dos programas objetos, usando o Macroassembler M80, e a união dos vários módulos (utilitário L80); o "software" é transferido para o microcomputador especial, onde é executado. Os microcomputadores dispõem ainda de um interpretador BASIC residente, gravado em EPROMS. Esse "software", desenvolvido pelo Lawrence Livermore Laboratory (Mc Goldrick, Dickinson e Allison, 1978), é bastante útil para a comunicação direta do operador com o sistema e é dotado de boa capacidade para cálculos por se utilizar de um co-processador aritmético AM9511A (Advanced Micro Devices, 1979). A disponibilidade desse dispositivo para operações aritméticas rápidas constitui um recurso extra, para a futura implementação de rotinas de cálculo em tempo-real que envolvam algoritmos de maior complexidade matemática.

Para o desenvolvimento de sistemas específicos a uma determinada função, que não requeiram o uso de teclado e monitor alfanuméricos, é empregado um outro programa monitor, totalmente comandado através de uma interface serial RS232C. O programa foi originalmente desenvolvido pelo Núcleo de Computação Eletrônica (NCE/UFRJ) e permite um completo controle dos recursos do sistema em desenvolvimento, por meio de instruções transmitidas a partir do computador com sistema operacional CP/M. Após o

desenvolvimento final do "software", esse é gravado em EPROM e instalado definitivamente no sistema dedicado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram apresentados alguns recursos para o desenvolvimento de microcomputadores, com aplicações biomédicas e em processamento de sinais em tempo-real, de utilidade já comprovada pela equipe de pesquisa do Laboratório de Microcomputadores. Com os recursos de "hardware" e "software" descritos, foram desenvolvidos três microcomputadores para processamento de sinais biológicos para o uso próprio do laboratório, baseados na CPU INTEL/8085 (Component Data Catalog, 1981) e um microcomputador para análise de sinais de fluxo sanguíneo em tempo-real (Schlindwein, Gandra e Caprihan, 1981), atualmente em uso de rotina no departamento de angiologia do Hospital Universitário (UFRJ). Com base no programa monitor de comando remoto apresentado está sendo desenvolvido um protótipo de monitor automático de arritmias cardíacas, com CPU Z80, e outro computador, com CPU idêntica, foi realizado para o controle de um tanque acústico para o Laboratório de Ultra-som, onde comanda os movimentos de transdutores e/ou alvos em testes no tanque e faz aquisição de sinais com o uso de um conversor A/D rápido. Foi desenvolvida ainda uma versão do "software" do microcomputador para análise de fluxo sanguíneo para uso em sistemas compatíveis com o "APPLE II Plus", já em uso de rotina, em clínica médica.

A avaliação do tempo de processamento segundo a filosofia apresentada, tem sido utilizada para a implementação de melhorias nos algoritmos de detecção de complexos QRS e deverá ser útil para o teste e desenvolvimento de técnicas de classificação de arritmias e em outras investigações futuras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração de todos aqueles que nos últimos 10 anos participaram do desenvolvimento de trabalhos no Laboratório de Microcomputadores, incluindo técnicos, estudantes de graduação e pós-graduação e professores pesquisadores, dos quais alguns são citados na bibliografia. Em particular é necessário reconhecer a participação fundamental do Prof. Arvind Caprihan, de cujo esforço, inteligência e orientação é fruto a maioria dos resultados alcançados.

As agências FINEP, CNPq e CAPES os autores agradecem pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. Advanced Micro Devices, (1979), "Advanced MOS/LSI - AM9511A Arithmetic Processor", Advanced Micro Devices, Inc.
2. Component Data Catalog, (1981), Intel Corporation

3. Lima, C.E.G., Gandra, S.T., Caprihan, A., Nobre, F.F., Schindwein, F., (1982), "Algoritmo para Detecção de QRS em Microcomputadores", Rev. Bras. de Engenharia, Caderno de Eng. Biomédica, Vol. 1-2, pp. 5-16.
4. Mc Goldrick, P.R., Dickinson, J e Allison, T.G.,(1978), "LLL 8080 Basic-II Interpreter User s Manual", Informal Report,Lawrence Livermore Laboratory, University of California.
5. Pereira, W.C.A., Schindwein, F. e Lima, C.E.G., (1987), "Algoritmo para Detecção e Delimitação de Complexos QRS em Tempo-Real, Utilizando Duas Derivações de ECG". Rev. Bras. de Engenharia, Caderno de Engenharia Biomédica, Aceito para publicação.
6. Schindwein, F.S.,(1982), "Microcomputador para Análise de Sinais de Fluxo Sanguíneo Arterial captados por Ultra-som Doppler", Tese de Mestrado,COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
7. Schindwein, F.S., Caprihan, A. e Gandra, S.T., (1983), "Sistema de Aquisição e Exibição de Sinais Biológicos para Microcomputador", Rev. Brasil. de Eng., Caderno de Eng. Biomédica, Vol. 1-2, pp. 45-55.
8. Schindwein, F.S., Pereira, W.C.A, Lima, C.E.G. e Flosi, J.O.C., (1985) , "Detector e Delimitador de QRS em Microcomputador, Utilizando Duas Derivações de ECG", Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, Campinas, SP, pp.1-6.
9. Stephan, G.M. e Lobianco Jr., W., (1985), "Sistema de Aquisição e Exibição de Sinais Analógicos para Microcomputadores", SBC, IV Concurso de Trabalhos de Iniciação Científica, 1º Lugar, Orientador: F.S. Schindwein.

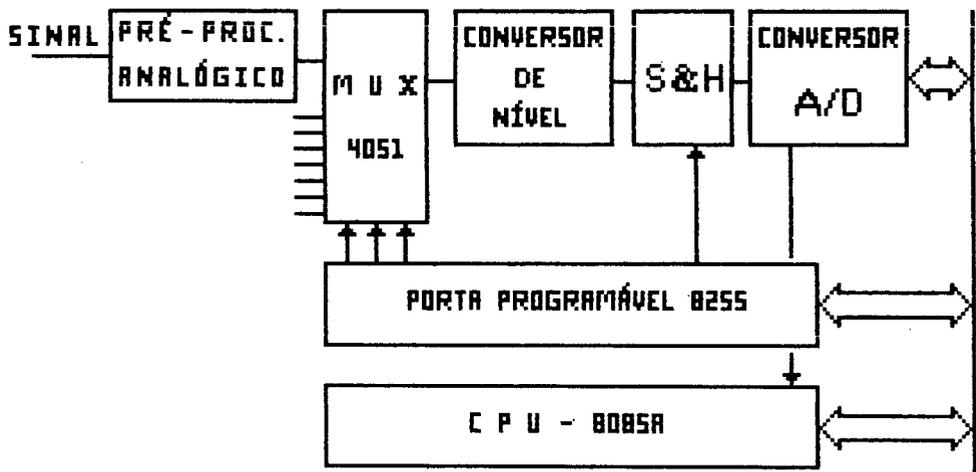


Fig.1 - Sistema de aquisição de sinais.

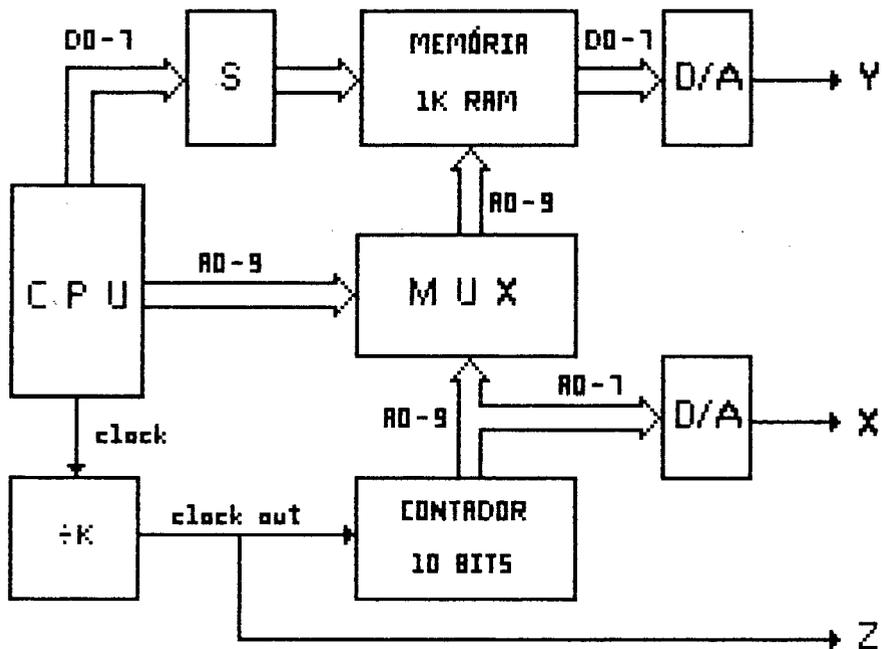


Fig.2 - Sistema de exibição de sinais em tempo-real.

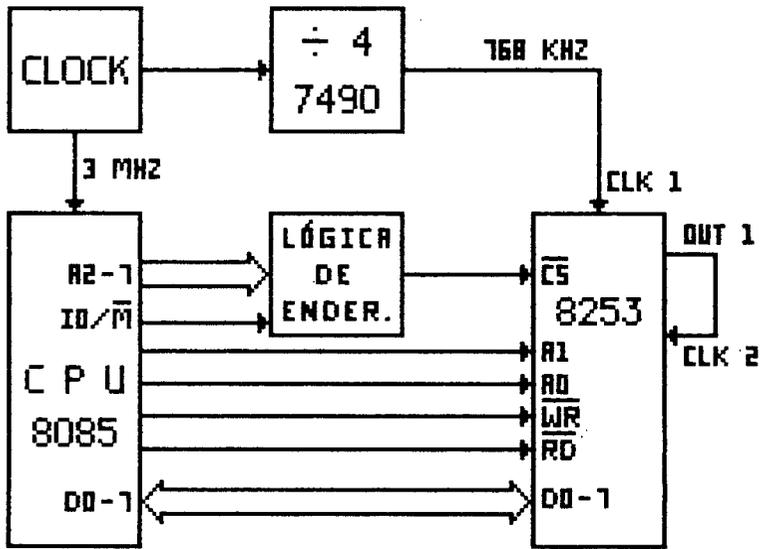


Fig.3 - "Hardware" para avaliação de tempo de execução de algoritmos para processamento em tempo-real.

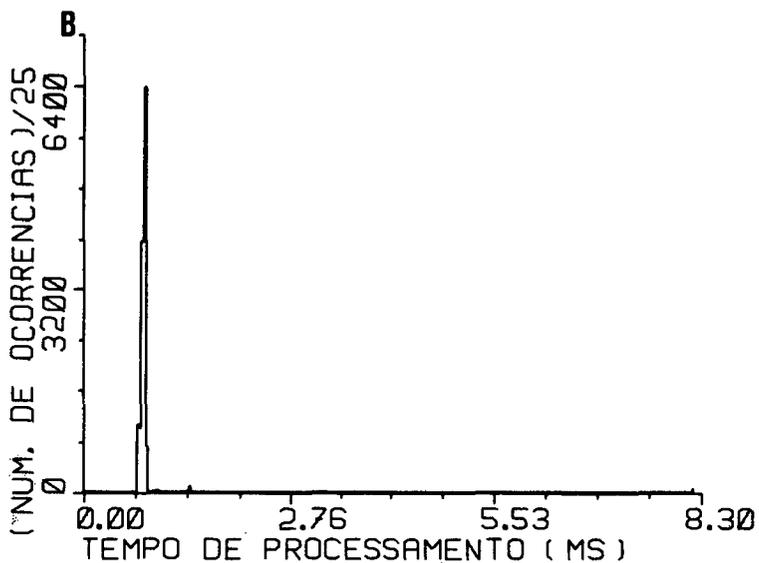
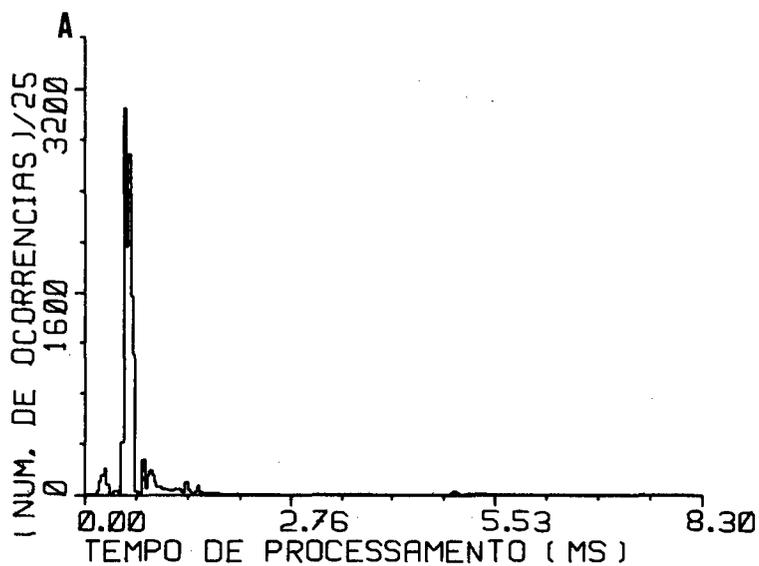


Fig. 4 - Histogramas do consumo do tempo de processamento de algoritmos para detecção de complexos QRS em tempo real: A. Técnica de Schluter (Pereira, Schindwein e Lima, 1987) B. Técnica de Engelse (Lima et alii, 1982). Paciente MIT 232.

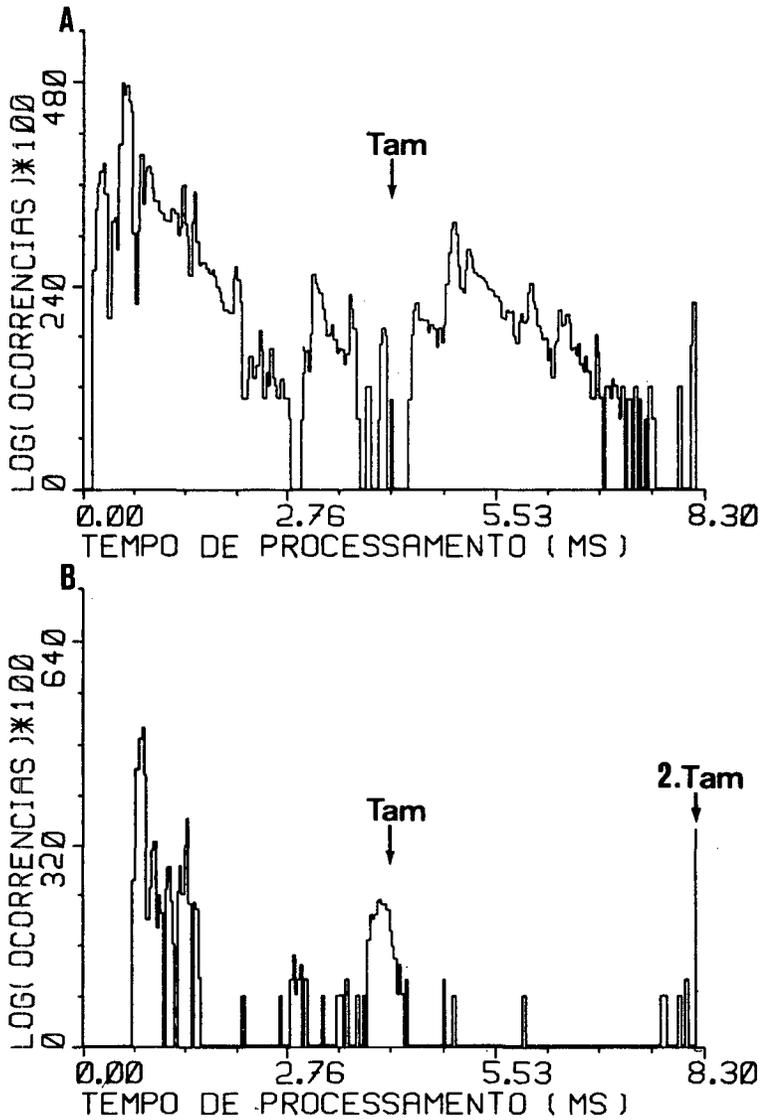


Fig. 5 - Histogramas de tempos de processamento dos algoritmos para detecção de complexos QRS, em escala logaritmica. A. Algoritmo de Pereira, Schindwein-Schluter, B. Técnica de Lima-Engelse. Tam = Período de amostragem = 4,167ms. Paciente MIT 232.

USEFUL TOOLS FOR THE DEVELOPMENT OF MICROCOMPUTERS APPLIED
TO REAL-TIME SIGNAL PROCESSING

ABSTRACT -- Our group has been working in the development of a microprocessor-based cardiac arrhythmia monitor. This field of investigation has led to the development of general-purpose microcomputers dedicated to real-time signal processing. The developed infra-structure of hardware and software allows the design of single-purpose microcomputers in less time and at low cost. This paper presents some of these useful tools as well as their effects on the performance of the system implementation. The topics concerned are: A/D converters with multiplexed input and sample & hold circuits, double access memories to display real-time signals, evaluation of time-consumption of real-time algorithms, circular buffers and monitor programs dedicated to system development.