

SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA

REGISTRADOR DE SINAIS ANALÓGICOS USANDO MP3 *PLAYER*
PORTÁTIL COM ENTRADA PARA VOZ

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para obtenção do título de Livre Docente em Microprocessadores.

L935r Lucena, Samuel Euzédice de
Registrador de sinais analógicos usando MP3 player portátil com entrada para voz / Samuel Euzédice de Lucena.
- Guaratinguetá : [s.n.], 2008
43 f.: il.
Bibliografia: f. 41-43

Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2008

1. Instrumentação 2. MP3 player I. Título

CDU 681.2-52

Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina. (Cora Coralina)

AGRADECIMENTOS

Aos colegas e amigos da UNESP – Guaratinguetá, pela ajuda perene. À minha família, pelo apoio e compreensão de sempre, e, em especial, à minha filha Elisa, pelo ‘empréstimo’ de seu MP3 *player*. Juro que vou devolvê-lo, e funcionando.

SUMÁRIO

Agradecimentos

Lista de Figuras

Lista de Abreviaturas ou Siglas

Resumo

Abstract

1	INTRODUÇÃO	1
2	REGISTRADORES PORTÁTEIS PARA SINAIS ANALÓGICOS	4
3	PROJETO DO REGISTRADOR	12
3.1	DESCRIÇÃO DA PROPOSTA	12
3.2	MP3 <i>PLAYER</i> PORTÁTIL	16
3.2.1	Circuito Típico de um MP <i>Player</i> Portátil	16
3.2.2	Modificação no MP3 <i>Player</i> Portátil	19
3.2.3	O Formato WAV	20
3.3	CIRCUITOS AUXILIARES PARA GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO	24
3.3.1	Modulador de FM	25
3.3.2	Demodulador de FM	27
3.4	ESTUDO DE CASO: GRAVAÇÃO DE ELETROCARDIOGRAMA	28
3.4.1	Circuito de Condicionamento para o ECG	29
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	33
4.1	GRAVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE SINAIS SENOIDAIS	33
4.2	GRAVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ECG	36

5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	41

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por AMINIAN et al. (1995).
- Fig. 2: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por HAYES-GILL et al. (1995).
- Fig. 3: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por YOSHIDA e AKAZAWA (1997).
- Fig. 4: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por BARNES e WARREN (2002).
- Fig. 5: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por NEVINS et al. (2002).
- Fig. 6: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por LUHARUKA et al. (2003).
- Fig. 7: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por CIFREK et al. (2004).
- Fig. 8: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por KUCHTA et al. (2005).
- Fig. 9: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por KIM et al. (2005).
- Fig. 10: Diagrama de blocos para o registrador usando um MP3 player portátil.
- Fig. 11: Fotografias de MP3 player portátil aberto. A - conector para USP; B – indutores do conversor CC/CC; C – entrada para conector da interface para desenvolvimento integrado; D – número da placa; E – conector P2 para áudio; F - microfone; G – conector para placa do LCD; H - memória flash NAND (Samsung K9W8G08U1M); I – CPU, RAM e ROM (ATJ2085); J – cristal; K – rádio receptor FM (Philips TEA5767). (S1MP3.ORG, 2008)
- Fig. 12: Esquema elétrico para o MP3 player portátil mostrado na Fig. 11 (S1MP3.ORG, 2008). Destacaram-se o circuito do microfone e a saída para os fones de ouvido.
- Fig. 13: Fotografia do MP3 player (fabricado pela Sony) modificado para este trabalho.
- Fig. 14: Forma canônica para um arquivo WAV.
- Fig. 15: Conteúdo do cabeçalho (hexadecimal). ghefcdab é um número hexadecimal inteiro e sem sinal. Observar que o número usa a notação Intel para números inteiros de múltiplos bytes.
- Fig. 16: Conteúdo do trecho data.
- Fig. 17: Exemplo de arquivo WAV e sua interpretação.
- Fig. 18: Esquema elétrico simplificado para o modulador de FM.
- Fig. 19: Esquema elétrico simplificado para o demodulador de FM.
- Fig. 20: Fotografia do MP3 player (fabricado pela Sony) modificado para este trabalho.
- Fig. 21: Fotografia dos eletrodos, cabos, MP3 player portátil (Sony), placa com circuito de condicionamento para o sinal de ECG, modulador FM, demodulador FM e duas baterias de 9 V. O uso do protoboard é parcial.
- Fig. 22: Teste de gravação e recuperação de sinal usando-se um gerador de FM.
- Fig. 23: Superior: Sinal de FM (portadora: 1200 Hz; sinal modulante: senóide de 100 Hz). Inferior: saída do demodulador de FM.
- Fig. 24: Traço inferior: sinal de FM (portadora: 1200 Hz, sinal modulante: senóide de 5 Hz) gravado no MP3 player. Traço superior: sinal modulante detectado na saída (fone de ouvido) do MP3 player.

Fig. 25: Traço inferior: ECG de um voluntário registrado na saída do amplificador de instrumentação. Traço superior: mesmo ECG recuperado do MP3 player portátil (saída do demodulador de FM).

Fig. 26: ECGs com arritmias gravados no MP3 player e recuperados com o demodulador de FM. Para detalhes, ver texto.

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ASCII	- <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
A/D	- conversor analógico/digital
CI	- Circuito Integrado
CPU	- <i>Central Processing Unit</i>
D/A	- conversor digital/analógico
DSP	- <i>Digital Signal Processor</i>
ECG	- eletrocardiograma
EEG	- eletroencefalograma
EMG	- eletromiograma
EPROM	- <i>Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EEPROM	- <i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
FFT	- <i>Fast Fourier Transform</i>
FM	- <i>Frequency Modulation</i>
HP	- <i>Hewlett-Packard</i>
IBM	- <i>International Business Machine</i>
IEC	- <i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	- <i>International Organization for Standards</i>
ASCII	- <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
MCU	- <i>Microcontroller Unit</i>
MP3	- abreviação de 'MPEG 1 Layer-3' (<i>Moving Picture Experts Group</i>)
PC	- <i>Personal Computer</i>
PCM	- <i>Pulse Code Modulation</i>
PLL	- <i>Phase-Locked Loop</i>
PSoC	- <i>Programmable System-on-Chip</i>
RIFF	- <i>Resource Interchange File Format</i>
SMD	- <i>Surface Mount Device</i>
SNR	- <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPI	- <i>Serial Peripheral Interface Bus</i>
USB	- <i>Universal Serial Bus</i>
VCO	- <i>Voltage Controlled Oscillator</i>

WAV

- abreviação de *WAVE* (*waveform file format*)

RESUMO

Neste trabalho se propôs a utilização do MP3 *player* portátil para gravação de sinal não-áudio em sua memória, utilizando-se seu recurso para gravação de voz. Para avaliar a proposta, retirou-se o microfone de eletreto do MP3 *player* e em seu lugar injetou-se um sinal de FM, com portadora de áudio de 1200 Hz modulada pelo sinal de interesse. O sinal é gravado no aparelho em arquivo no formato WAV. Sua recuperação se fez usando um demodulador de FM a PLL cuja entrada é o sinal de FM captado nos terminais da bobina do fone de ouvido do MP3 *player*. Nos testes, usou-se sinal senoidal e sinal de eletrocardiograma. Embora a qualidade dos sinais de baixa frequência precise ser melhorada, em geral os resultados apontam para a viabilidade da proposta. Fazem-se sugestões para melhorias e extensões do trabalho.

ABSTRACT

This work proposes the use of portable MP3 player for recording non-audio signal in its flash memory, by means of its voice recording function. To evaluate the proposal, a 1200-Hz FM carrier modulated by the signal of interest replaced its electret microphone signal. The FM signal is saved in the instrument in a WAV file. The signal recovery was made using a PLL-based FM demodulator whose input is the FM signal captured in the coil leads of the MP3 player's earphone. The tests used sinusoidal signal and electrocardiogram signal. Although the quality of low frequency signal needs improvement, overall the results indicate the viability of the proposal. Suggestions are made for improvements and extensions of the work.

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se a motivação e o objetivo do trabalho, além de uma descrição do conteúdo de cada um dos demais capítulos.

É crescente a demanda por registradores portáteis de sinais analógicos provenientes de sensores tão diversos quanto termistores, acelerômetros e eletrodos de Ag-AgCl para transdução de biopotenciais. Esses registradores são usados em aplicações tão diversas quanto o registro da temperatura de uma carga perecível durante o transporte em um caminhão-frigorífico (KUCHTA et al., 2005), o registro das vibrações na cabine de um trator e a gravação do eletrocardiograma (ECG) de um paciente durante sua atividade diária. O objetivo do registro em cada uma destas aplicações é também muito distinto, a saber: provar, para fins legais, que o transporte da carga se fez dentro da condição de temperatura especificada por uma norma ou contrato; registrar, para fins de homologação ou aperfeiçoamento, o nível de vibração da cabine; e monitorar a atividade elétrica do coração, com fim diagnóstico.

A evolução das memórias semicondutoras (DRAM, SRAM, E²PROM e *Flash*) levou à extinção a fita magnética – que reinou por décadas como meio físico para gravação de sinais em registradores portáteis. Junto com a fita, foram-se também os motores (de corrente contínua), polias, correias transmissoras, e cabeças magnéticas para apagamento, gravação e leitura de sinal. Foram-se ainda, felizmente, o alto consumo relativo de corrente, que limitava o tempo de autonomia dos registradores, o acesso seqüencial e lento aos dados, o peso excessivo, e, não menos importante, os problemas de emaranhamento da fita – com conseqüente perda desastrosa dos dados.

A despeito do aumento vertiginoso na capacidade das memórias semicondutoras e da diminuição não menos impressionante no seu preço, os registradores portáteis continuam relativamente caros, portanto, não tendo nem de longe experimentado queda proporcional em seus preços. Isto se deve provavelmente ao fato de os registradores não serem itens produzidos em massa, como o computador pessoal (PC), por exemplo, que tem os custos de desenvolvimento e produção muitíssimo diluídos, além de serem, estes, economicamente viáveis mesmo com uma margem de lucro pequena.

Nos últimos anos, graças ao advento da Internet, ao baixo custo e alta capacidade das memórias semicondutoras, ao alto poder de processamento dos microcontroladores (MCUs) e processadores digitais de sinal (DSPs), que, diga-se, também custam, em grandes volumes, relativamente pouco, à eficiência dos algoritmos de compressão de dados, e ao gosto universal pela música, surgiram os MP3 *players* portáteis e *iPods*, pequenos equipamentos capazes de armazenar e reproduzir de dezenas a milhares de horas de música com qualidade comparável, senão virtualmente idêntica, à do *compact disc* (CD) (MCCANDLESS, 1999; RUZANSKI, 2006). O preço, especialmente o do MP3 *player* portátil, é surpreendentemente baixo, para um modelo contando com 1 gigabyte (GB) ou mais de memória *flash*.

O objetivo deste trabalho é avaliar, acredita-se, em primeira mão, a possibilidade de uso do MP3 *player* portátil como registrador de baixo custo para sinais analógicos, tirando-se proveito dos benefícios de sua produção em massa, de seu baixo consumo de energia, e do *firmware* que ele encerra. Com esse fim, propõe-se um método para gravação e recuperação de sinal analógico no MP3 *player*, realizam-se testes e discutem-se os resultados e limitações.

No capítulo 2, faz-se uma revisão da literatura sobre registradores portáteis para sinais analógicos.

No capítulo 3, detalha-se uma técnica para gravação e recuperação de sinais analógicos em MP3 *player*, e faz-se também uma descrição dos formatos dos arquivos que ele utiliza.

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados experimentais.

No capítulo 5, fazem-se os comentários finais sobre o trabalho e apontam-se tópicos para exploração em futuros trabalhos.

2. REGISTRADORES PORTÁTEIS PARA SINAIS ANALÓGICOS

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura sobre registradores portáteis para sinais analógicos baseados em memórias semicondutoras. Os artigos serão citados na ordem cronológica direta.

Para registrar a aceleração do corpo de um indivíduo durante a marcha, AMINIAN et al. (1995) desenvolveram um registrador capaz de armazenar os sinais provenientes de cinco acelerômetros colados ao seu corpo. O registrador usa conversor A/D de 12 bits, taxa de amostragem de 40 Hz (40 amostras/s), tem 24 h de autonomia e pesa 500 g, juntamente com os circuitos auxiliares ilustrados pelo diagrama de blocos da Fig. 1. Os sinais são armazenados em 2 cartões de memória SRAM com capacidade de 2 MB (megabytes) cada. Para análise, os sinais armazenados nestes cartões são transferidos para um PC. Destaca-se que a capacidade de memória desse registrador é relativamente baixa, se esgotaria rapidamente (em 43 s) para registro de sinais à taxa de amostragem alta (8 kHz, por exemplo), e, sendo do tipo volátil, os sinais gravados são perdidos, caso a bateria se esgote.

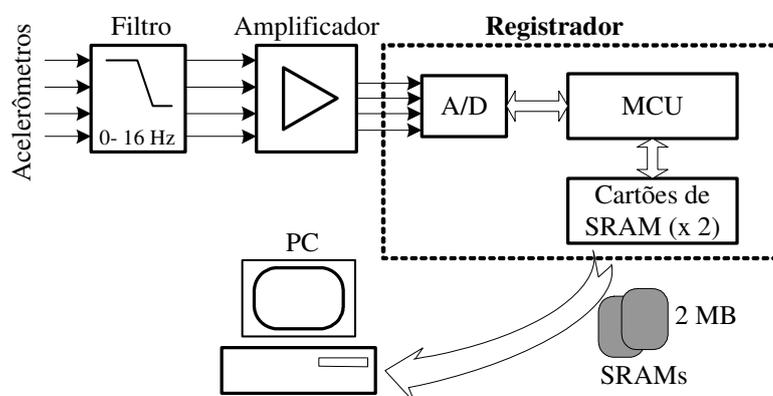


Fig. 1: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por AMINIAN et al. (1995).

A Fig. 2 mostra o diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por HAYES-GILL et al. (1995) para gravação de sinais eletrofisiológicos, tais como o ECG, EEG (eletroencefalograma) e EMG (eletromiograma). Estes autores incluíram em um ASIC (*Application-Specific IC*) o circuito para condicionamento do sinal captado por eletrodos, além de um conversor A/D e de uma interface para o DSP (Texas TMS320C10). A resolução do A/D é programável e dependente da taxa de amostragem, tendo os autores usado 9 bits para taxa de 9600 Hz, e 16 bits, para 75 Hz. Uma das funções do circuito da interface com o DSP é aumentar a capacidade de memória endereçável pelo DSP para 4 MB. A autonomia, em termos de memória, é também pequena, para taxas de amostragem de alguns milhares de amostras por segundo. Outra limitação é o fato do circuito de condicionamento ser um ASIC que, além de requerer programas de CAD específicos e caros, para obter-se um custo competitivo por peça, em geral é necessário produzir-se um lote com grande número de peças. Recentemente, surgiram no mercado ferramentas para desenvolvimento de circuitos mistos programáveis, chamados de PSoC (*Programmable System-on-Chip*) que competem com vantagem com as soluções ilustradas pelas Figs. 1 e 2.

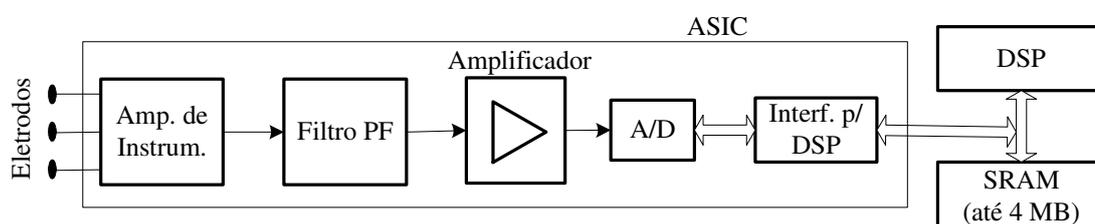


Fig. 2: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por HAYES-GILL et al. (1995).

YOSHIDA e AKAZAWA (1997) desenvolveram o registrador portátil cujo diagrama de blocos pode-se ver na Fig. 3, para monitorar a atividade muscular de um indi-

víduo durante a marcha. Além dos potenciais elétricos de dois diferentes músculos, este registrador também armazena informações sobre a postura da perna do paciente captadas por dois acelerômetros fixados ao membro. Os sinais dos quatro canais digitalizados são armazenados em 2 MB de memória SRAM, e, para análise, são transferidos para um PC, por técnica não divulgada pelos autores, mas, provavelmente, por canal serial do tipo UART. Embora os autores tenham obtido êxito na aplicação do registrador, a quantidade de memória para dados é claramente insuficiente, para aplicações em que a taxa de aquisição das amostras seja alta (8 kHz, por exemplo). Outra limitação é o fato de a memória de dados ser volátil. O equipamento pesa 700 g, incluindo o peso das baterias.

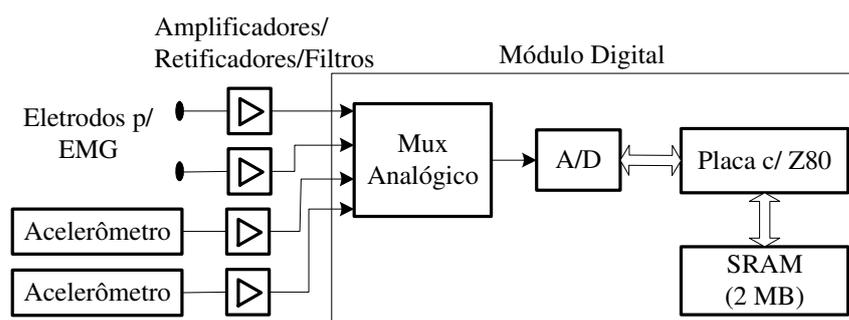


Fig. 3: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por YOSHIDA e AKAZAWA (1997).

Em 2002, BARNES e WARREN publicaram um artigo em que descreveram um sistema por eles desenvolvido para permitir tratamento médico domiciliar à distância (*home health care*) (BARNES; WARREN, 2002). Neste tipo de tratamento, o paciente pode ser acompanhado à distância, uma vez que o especialista pode receber em tempo real diversos sinais captados por sensores usados pelo paciente. O sistema contém três partes principais (Fig. 4): um PC conectado à Internet e com o LabVIEW, para permitir que o médico tenha acesso à distância aos sinais do paciente; um registrador, com três

PICmicro^{®1}, que recebe sinais dos sensores através do protocolo Bluetooth, salvando estes sinais em um banco de memória e também transmitindo-os, usando Bluetooth, ao PC; e um módulo portátil, para uso pelo paciente, com microcontrolador, A/D de 8 bits e rádio Bluetooth, para condicionar, digitalizar e transmitir o sinal do sensor ao registrador. Sem conexão ao PC, o registrador tem autonomia de algumas horas. Já se o registrador sair da rede, o módulo com o sensor tem autonomia de apenas alguns minutos, como consequência de sua baixa capacidade de memória. Os autores não informam nem o tipo, nem a quantidade de memória usada no banco de memória.

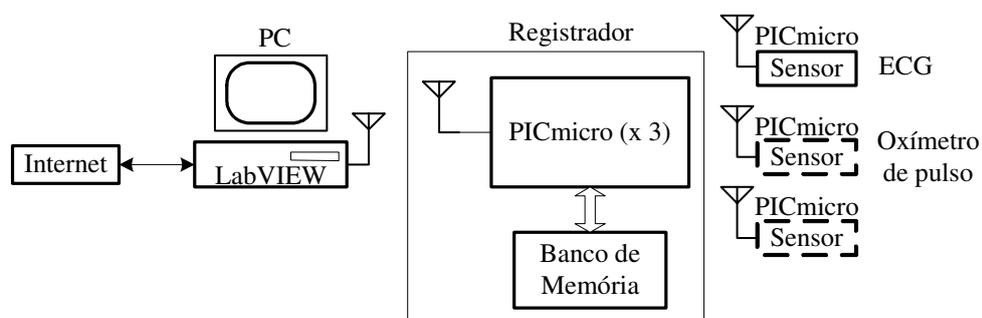


Fig. 4: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por BARNES e WARREN (2002).

O registrador portátil desenvolvido por NEVINS et al. (2002), para monitorar o perfil da coluna cervical de pacientes portadores de escoliose, usa seis microcontroladores para leitura de seis sensores, cada qual com dois acelerômetros (Fig. 5). Estes microcontroladores, chamados de satélites, transferem os dados dos sensores para um microcontrolador, chamado de mestre, por canal serial, que os armazena em 4 MB de memória *flash*, uma quantia reduzida em relação ao que hoje se poderia utilizar. Contudo, dada a baixa frequência de amostragem da aplicação, os autores conseguiram gravar

¹ Linha de microcontroladores da Microchip Inc. (<http://www.microchip.com>).

810 h contínuas de informações sobre o perfil da coluna do paciente. Este registrador não contém conversor A/D, uma vez que a saída de cada acelerômetro é um sinal digital modulado em largura de pulso.

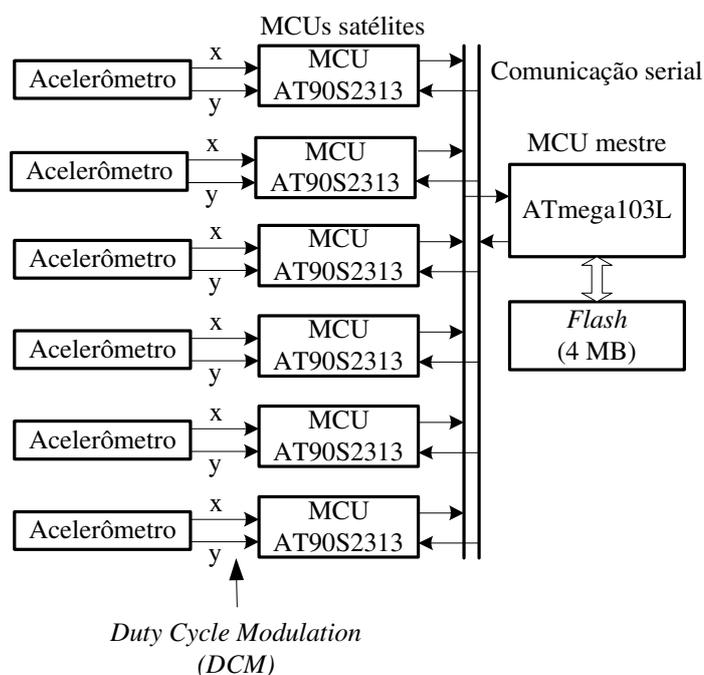


Fig. 5: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por NEVINS et al. (2002).

Após comparar algumas possíveis alternativas, LUHARUKA et al. (2003) selecionaram o microcontrolador de 8 bits PIC17C73B (da Microchip Inc.) e memórias EEPROM de 2 MB (da Atmel Inc.) com interface SPI, para desenvolver um registrador portátil para sinais analógicos (Fig. 6). Embora o registrador desses autores seja dirigido para gravação da resposta galvânica da pele de crianças autistas, eles argumentam que o gravador pode ser facilmente adaptado para registrar outros sinais eletrofisiológicos. O emprego de 8 memórias EEPROMs (16 MB), do algoritmo das primeiras diferenças para compressão de dados, e de baixa taxas de amostragem (32 Hz) permitiram aos au-

tores gravar 280 h de dados. Um PC pode ler os dados do registrador pela porta serial UART. O registrador é alimentado por bateria de 9 V de alta capacidade (1200 mA.h) e seu peso total é de 400 g. Além da capacidade de memória, para uso geral, ser relativamente pequena, o tempo de escrita em memória EEPROM é um forte empecilho para a frequência máxima de amostragem utilizável.

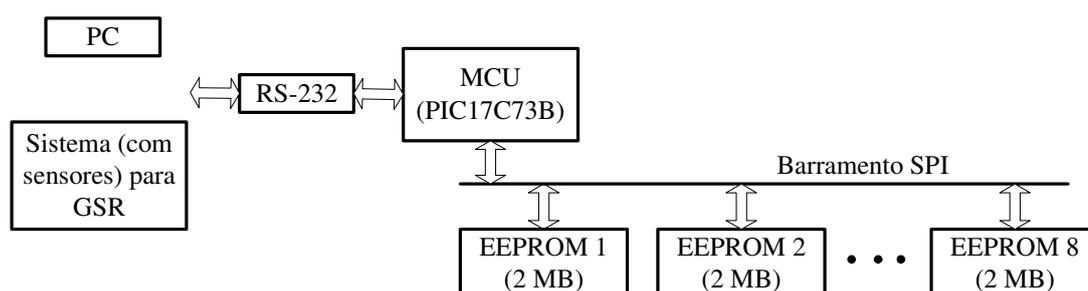


Fig. 6: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por LUHARUKA et al. (2003).

Sob os aspectos de capacidade de memória instalada e portabilidade, CIFREK et al. (2004) criaram um dos mais interessantes registradores de sinais portáteis encontrados na literatura recente (Fig. 7). Eles usaram um microcontrolador RISC de 16 bits (Texas Instruments MSP430), de baixo consumo e com vários canais de A/D de 12 bits, para registrar, em um cartão comercial contendo 32 MB de memória *flash*, o intervalo entre ondas R consecutivas do ECG de um indivíduo (chamado intervalo R-R) e, também, sua temperatura corporal e a ambiente. O ECG é amostrado a 1 kHz, podendo o intervalo R-R ser registrado continuamente na *flash* por 20 dias, não fosse o tempo de autonomia máximo das baterias de 5 dias. Ou seja, é necessário interromper a aquisição de dados, durante a recarga ou substituição das baterias sem, no entanto, perder os dados já coletados. O registrador transfere os dados coletados para um PC por uma porta serial UART.

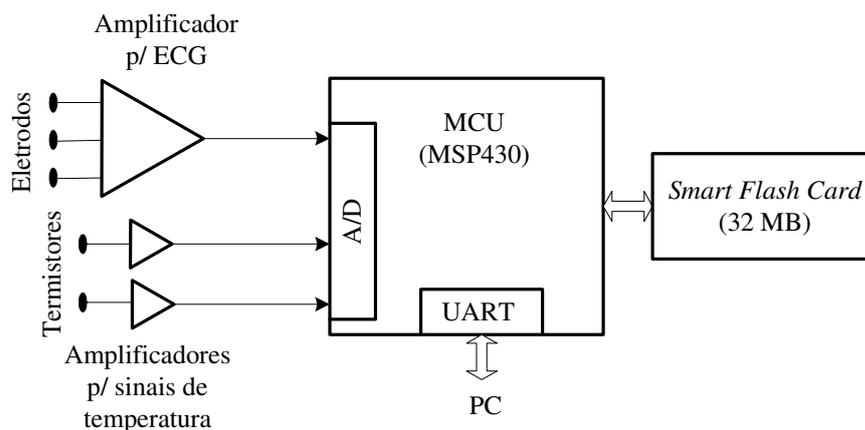


Fig. 7: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por CIFREK et al. (2004).

Para monitorar a temperatura de cargas críticas (transporte de alimentos, por exemplo) e leitura dos dados sem contato, KUCHTA et al. (2005) projetaram um registrador de temperatura e horário, cuja programação e leitura se fazem por um laço de RF (rádio frequência) (Fig. 8). Usaram um microprocessador, sem especificarem qual, um A/D, um relógio de tempo real e memória EEPROM para armazenar as leituras de temperatura e horário. Embora não tenham informado a quantidade de memória utilizada, argumentam que a vida útil do registrador pode alcançar vários meses.

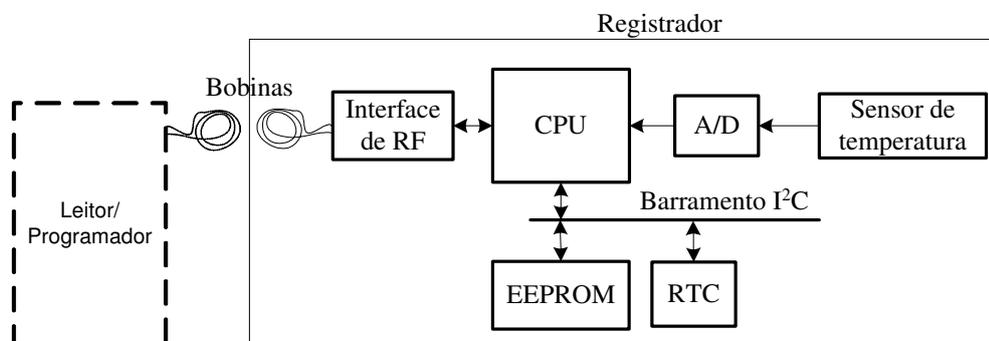


Fig. 8: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por KUCHTA et al. (2005).

Na literatura, o único registrador portátil encontrado que usa de alguma forma o MP3 *player* foi o descrito KIM et al. (2005). Contudo, em vez de usar um equipamento comercial, estes autores projetaram um MP3 *player*, usando um microcontrolador de 32 bits, codec (codificador/decodificador) de áudio, 256 MB de memória *flash* e um receptor de FM, no qual incluíram um circuito para detectar o batimento cardíaco do usuário (Fig. 9). Para esse fim, usaram um sensor do tipo fotopleletismográfico para dedo ou lóbulo da orelha. Desenvolveram o programa embarcado (*firmware*) para detectar o batimento cardíaco, calcular sua frequência e salvá-la na memória *flash*. O erro é inferior a 3 % no cálculo da frequência cardíaca. Não há informação sobre o formato de gravação da frequência cardíaca. Os autores alegam que é crescente o número de indivíduos que deseja ter a frequência cardíaca monitorada enquanto pratica esporte e ouve música, e que este é primeiro MP3 *player* do mundo a realizar esta função. O equipamento entrou em produção em fevereiro de 2004 na empresa coreana Samsung.

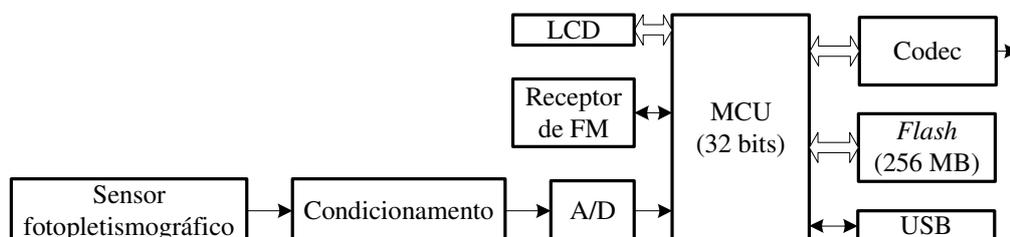


Fig. 9: Diagrama de blocos do registrador portátil desenvolvido por KIM et al. (2005).

3. PROJETO DO REGISTRADOR

Apresentam-se a abordagem utilizada para gravar e recuperar sinais em um MP3 'player' portátil, detalhes relevantes sobre o formato do arquivo contendo o sinal gravado, e um circuito para realização da estratégia proposta.

3.1 DESCRIÇÃO DA PROPOSTA

Os algoritmos de compressão de dados são os grandes motores propulsores da revolução na maneira como a música agora é cada vez mais distribuída – pela Internet – e ouvida – em minúsculos aparelhos portáteis – os MP3 *players*. Embora o nome tenha sido cunhado a estes aparelhos graças ao algoritmo de compressão MP3 (derivado de “*MPEG 1, Audio Layer 3*”), o fato é que há mais 100 algoritmos para compressão de dados competindo no mercado (MOCK, 2004), e os próprios MP3 *players* portáteis, paradoxalmente, são capazes de reproduzir arquivos de áudio de diversos outros formatos, além, claro, do alardeado MP3, como qualquer um pode facilmente verificar manuseando o pequeno e onipresente aparelho.

O padrão *MPEG/audio* resultou de um esforço que consumiu mais de 3 anos de trabalho de um comitê internacional de especialistas em compressão de áudio de alta fidelidade, e, em 1992, foi adotado pela ISO (*International Organization for Standards*) e IEC (*International Electrotechnical Commission*) (PAN, 1995).

Já o formato WAV (ou WAVE), uma abreviação para *Waveform audio file format*, também suportado pelos MP3 *players* portáteis, foi criado conjuntamente pelas empresas norte-americanas Microsoft e IBM, em 1991, especialmente para gravação, transmissão e reprodução de áudio bruto nos PC com sistema operacional Windows® (DIGI-

TAL PRESERVATION, 2008). Por áudio bruto se quer dizer áudio sem compressão, sem processamento, sem perda. Este formato, que será detalhado na subseção 3.2.2, a despeito de apresentar grande desvantagem em relação ao MP3, se tornou muito difundido, provavelmente em virtude do sucesso do PC e do Windows[®]. De fato, o Windows[®] inclui um aplicativo chamado “Gravador de Som[®]” que pode ser executado facilmente pelo usuário, bastando seguir o caminho “Acessórios|Entretenimento|Gravador de Som”, para gravar e reproduzir o som captado pelo microfone ligado à placa de áudio. O som é digitalizado a 22 kHz, usando 16 bits de resolução, e gravado precisamente no formato WAV.

Muitos modelos de MP3 *player* portáteis vêm com um microfone de eletreto embutido e uma função para gravação e reprodução de voz (áudio, na verdade), em geral identificada como “REC” ou “*microphone*” (neste trabalho, será usado apenas o termo “REC”). Talvez em virtude da alta complexidade do algoritmo para compressão de áudio no formato MP3 (quantização em 16 bits, frequência de amostragem ao menos de 32 kHz, além de transformada discreta de Fourier, e aplicação do chamado “modelo psicoacústico”) (PAN, 1995), este recurso dos MP3 *players* portáteis usa o formato WAV, que é um formato para gravação dos dados brutos, ou seja, como eles são, quantizados com resolução que pode ser significativamente menor do que aquela especificada pelo padrão MP3, e com taxa de amostragem que também pode ser muito inferior à do MP3. Como ilustração, a voz pode ser amostrada a 8 kHz, um canal, e usando-se apenas 4 bits na quantização, como se vê nos aparelhos da empresa japonesa Sony, por exemplo.

Portanto, uma vez que a função “REC” dos MP3 *players* portáteis amostra o sinal do microfone, obviamente após algum processamento analógico (amplificação e filtragem passa-faixa), gravando-o em memória *flash*, como arquivo WAV, para posterior

reprodução ou transmissão, é interessante tentar explorar esse canal de entrada para o registro de outros sinais analógicos, como por exemplo o sinal proveniente de um sensor de temperatura, pressão, ou mesmo de um sensor para um biopotencial, como o ECG (eletrocardiograma).

Assim, um modo direto e não intrusivo para gravar um sinal qualquer, não áudio, $x(t)$ por meio da função “REC” do MP3 *player* portátil seria usá-lo para modular em frequência (FM), por exemplo, uma portadora de áudio $a(t)$ e acoplar acusticamente o sinal modulado ao microfone do MP3 *player*, como já se fez outrora, no início da era do modem, para usar-se a rede de telefonia. Essa abordagem parece criar uma enorme dificuldade para realização, porque exige um eficiente acoplamento acústico, e as diminutas dimensões do MP3 *player* criam ainda mais dificuldade para fixação do acoplamento e manuseio do bloco resultante. Por esta razão, preferiu-se acoplar diretamente o sinal $x(t)$ ao canal de aquisição da função “REC”, removendo-se antes o microfone de eletreto da placa de circuito impresso do MP3 *player* portátil.

Surpreendentemente, experimentos exploratórios realizados neste trabalho revelaram que o algoritmo da função “REC” de um MP3 *player* portátil reconhece quando o sinal de entrada não é áudio, abortando o processo de aquisição e emitindo mensagem de erro. Conseqüentemente, restou a opção da modulação de uma portadora de áudio $a(t)$ com o sinal $x(t)$.

Desta forma, como ilustra o diagrama de blocos da Fig. 4, propõe-se o recurso da modulação em frequência, usando-se uma portadora na faixa do áudio, para gravar-se um sinal no MP3 *player* portátil por meio de sua função “REC”, e aproveitando-se do circuito de aquisição para o sinal do microfone. Tendo em vista que o sinal original a ser gravado pode não ser adequado para emprego direto como modulador, prevê-se o

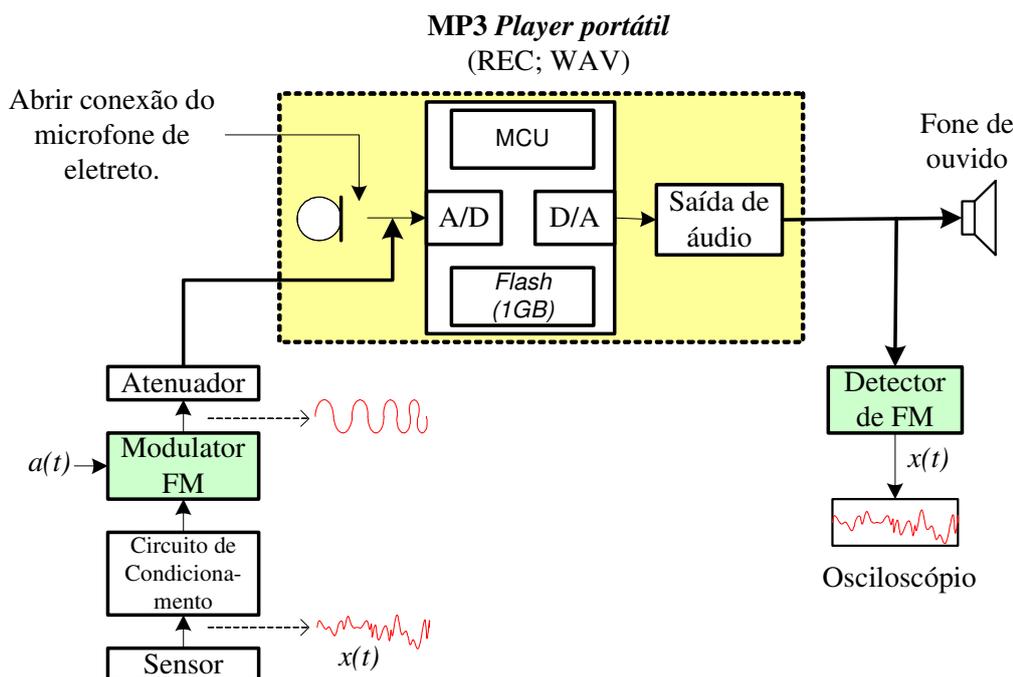


Fig. 10: Diagrama de blocos para o registrador usando um MP3 *player* portátil.

uso de um circuito de condicionamento de sinal. Para tornar a amplitude do sinal de FM semelhante àquela do sinal do microfone, torna-se necessário o emprego de um atenuador.

O artifício da modulação para permitir que a função “REC” do MP3 *player* portátil grave um sinal não-áudio só faz sentido se o sinal modulador puder ser detectado posteriormente. Neste trabalho, para recuperar-se o sinal modulador, propõe-se o uso de um circuito demodulador de FM em cuja entrada se injeta uma das saídas para os fones de ouvido do aparelho. Antes de detectar um sinal previamente gravado na memória *flash* do MP3 *player*, é necessário acionar a função de reprodução de voz do aparelho. Isto normalmente se faz seleccionando-se no menu do instrumento primeiramente a função “*play mode*” (modo de operação) ou equivalente, e, em seguida, a opção “*play recorded track*” (reproduzir faixa gravada) ou equivalente.

3.2 MP3 *PLAYER* PORTÁTIL

Difícilmente seria possível encontrar-se um esquema elétrico detalhado de um modelo comercial de MP3 *player* portátil, distribuído por um fabricante. Contudo, há tanto interesse por estes aparelhos ao redor do globo que até já existe uma associação sem fins lucrativo coordenando um “projeto aberto” para MP3 *player* portátil (S1MP3.ORG, 2008). Esta associação disponibiliza gratuitamente para qualquer internauta tanto informações sobre os circuitos quanto programas para teste, atualização e ajuda em desenvolvimento. As fotografias e o esquema da próxima subseção foram obtidos desta fonte.

3.2.1 Circuito Típico de um MP *Player* Portátil

Na Fig. 11 podem-se ver detalhes de um MP3 *player* portátil. Os blocos presentes neste modelo estão presentes em virtualmente todos modelos comerciais, com exceção



Fig. 11: Fotografias de MP3 *player* portátil aberto. A - conector para USP; B – indutores do conversor CC/CC; C – entrada para conector da interface para desenvolvimento integrado; D – número da placa; E – conector P2 para áudio; F - microfone; G – conector para placa do LCD; H - memória flash NAND (Samsung K9W8G08U1M); I – CPU, RAM e ROM (ATJ2085); J – cristal; K – rádio receptor FM (Philips TEA5767). (S1MP3.ORG, 2008)

do receptor de FM e do microfone, visto que alguns modelos não incorporam um receptor de rádio e/ou função para gravação de voz. O CI legendado como I de fato contém uma CPU Z80, um DSP de 24 bits (arquitetura Harvard), 29 kB de ROM e 116 kB de SRAM, mais um sortimento de outros importantes blocos como A/D, D/A, PLL, USB, e controlador de LCD. É o microfone e seu circuito, no entanto, que interessa para este trabalho.

Na Fig. 12 pode-se ver o esquema elétrico para o MP3 *player* mostrado na Fig.11. O microfone de eletreto e seu circuito de condicionamento encontram-se circundados por uma espessa linha vermelha. É este circuito que precisa ser identificado no aparelho, a fim de ter-se o minúsculo microfone removido e inserir-se em seu lugar o sinal modulado em FM a ser gravado na memória *flash* pela função “REC”. Como se pode observar no esquema elétrico, a MCU também controla a tensão de alimentação do microfone por meio de uma porta de saída marcada como VMIC, no esquemático. Entre o microfone e a entrada para aquisição da voz (MICIN), não se vê nenhum circuito para processamento analógico deste sinal, a não ser um capacitor de 100 nF para acoplamento CA. Isto significa que processamentos analógicos como amplificação e filtragem passa-baixas, caso haja, se fazem por circuitos embutidos na MCU (ou PSoC – ver a seguir) , uma tendência – a de integrar cada vez maior número de circuitos – que a indústria de semicondutores só reforça desde os primórdios. Aliás, encontram-se já facilmente à disposição no mercado os chamados PSoCs (*Programmable System-on-Chip*) – os herdeiros e substitutos para os microcontroladores.

Destacou-se com linha azul o circuito de saída para os fones de ouvido. Vêm-se filtros passa-faixas independentes para cada um dos canais. Retirar o ruído do processo de conversão D/A é a principal função destes filtros.

3.2.2 Modificações no MP3 *Player* Portátil

A principal modificação realizada no MP3 *player* neste trabalho foi a substituição do microfone por um cabo blindado (Fig. 13). Para esta operação, abriu-se o gabinete do aparelho e, com o auxílio de uma lupa, de ferro de soldar e sugador de solda, retirou-se o microfone e em seu lugar soldou-se o cabo blindado. Uma outra modificação, que se fez por se considerar conveniente para o desenvolvimento do trabalho, foi a abertura do invólucro de um dos fones de ouvido, como vê-se na Fig. 13, para captação da saída de áudio. Soldou-se um par de fios diretamente aos terminais da bobina do fone. De fato, esta modificação não se deu no aparelho e, em vez disso, poderia ter-se usado um simples conector P2 para áudio. Contudo, ao usar-se o cabo com dois fones de ouvido, pôde-se empregar o fone livre para monitorar-se facilmente a presença do sinal de áudio.

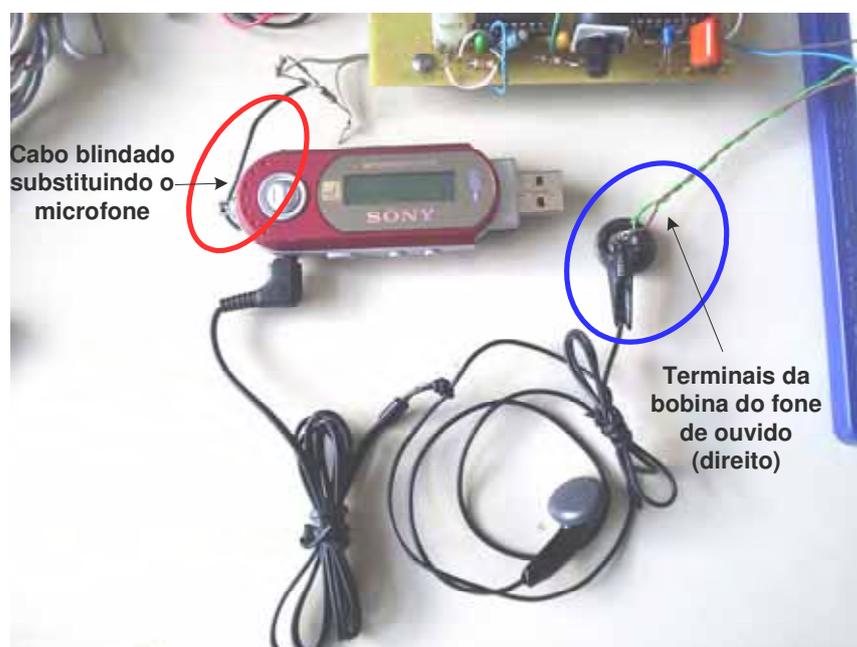


Fig. 13: Fotografia do MP3 *player* (fabricado pela Sony) modificado para este trabalho.

3.2.3 O Formato WAV

Criado em 1991 pela Microsoft e IBM, para gravação, reprodução e transmissão de arquivos de áudio nos PC com sistema operacional Windows[®] (DIGITAL PRESERVATION, 2008), o formato WAV (chamado por extenso de *waveform file format*) tornou-se extremamente difundido, graças ao sucesso da combinação PC/Windows[®]. Desde então, tem sido adotado também em diversas outras aplicações profissionais, como por exemplo, em radiodifusão digital (EBU, 2001).

A despeito de ter sido criado por duas gigantes, o formato WAV não delimitou o que lhe poderia ser acrescentado, o que resultou lamentavelmente numa verdadeira profusão de versões que trouxeram consigo o efeito nefasto da incompatibilidade, além de inconsistência e duplicidade (BORG, 2008). Entretanto, há uma espécie de formato mínimo, também chamado informalmente de “forma canônica” que desfruta de grande portabilidade, isto é, pode ser interpretado por virtualmente qualquer aplicação que lida com WAV. No restante desta seção apresenta-se a forma canônica do formato WAV.

Um arquivo WAV é uma coletânea de diferentes tipos de trecho. Há, no entanto, apenas dois trechos obrigatórios: o trecho denominado *format* (formato) e o trecho denominado *data* (dados). Todo aplicativo desenvolvido para aceitar WAV deve ser capaz de ler estes dois trechos, podendo ignorar os demais trechos – estes, claro, todos opcionais. Um arquivo WAV que possui a forma canônica contém exatamente estes dois trechos obrigatórios, mais um cabeçalho, como ilustrado na Fig. 14 (SAPP, 2008).

O cabeçalho contém um campo de 4 bytes contendo as letras “RIFF” escritas em ASCII, seguido por um campo de 4 bytes (hexadecimal inteiro e sem sinal) contendo o número de bytes do arquivo, menos 8, seguido de um último campo de 4 bytes contendo a palavra “WAVE” em ASCII, como ilustrado na Fig. 15. Todos os números inteiros

com mais de um byte são armazenados no formato Intel, ou seja, começando com o byte menos significativo e prosseguindo até o byte mais significativo.

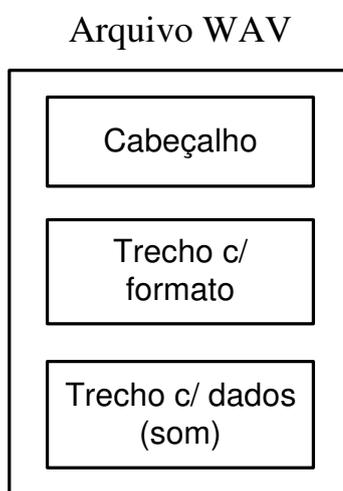


Fig. 14: Forma canônica para um arquivo WAV.

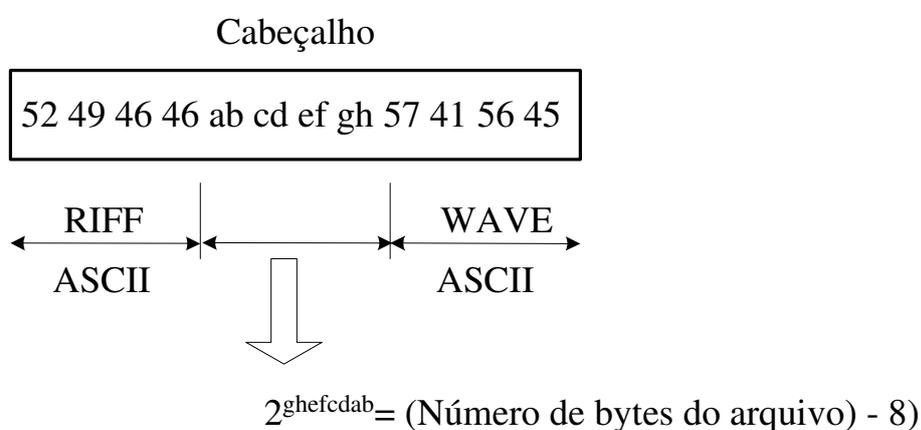


Fig. 15: Conteúdo do cabeçalho (hexadecimal). ghfc dab é um número hexadecimal inteiro e sem sinal. Observar que o número usa a notação Intel para números inteiros de múltiplos bytes.

O maior número de bytes de um arquivo WAV é limitado pelo tamanho do campo (4 bytes) do cabeçalho para guardar o tamanho do arquivo. Assim, um arquivo WAV ocu-

pa no máximo 4 GB (ou seja $2^{32} - 8$). Isto equivale a 6,6 horas de áudio com qualidade de CD (frequência de amostragem de 44,1 kHz e resolução de 16 bits, estéreo).

O cabeçalho é seguido pelo trecho *format*, o qual descreve o formato dos dados do som, como melhor detalhado na Tabela 1. O trecho inicia com as letras “fmt ” (obversar o caracter ‘espaço em branco’) e é seguido por diversos campos, em geral de 2 ou 4 bytes cada, onde são especificados o tipo de quantização utilizada, o número de canais (mono, estéreo, etc), a taxa de amostragem, o número de bits por amostra, dentre outras informações. Quanto ao tipo de quantização, embora se usem em geral conversores (A/D e D/A) lineares, o que significa quantização do tipo PCM linear (*Pulse Code Modulation*), ou seja, sem compressão de dados, é, sim, possível usar-se quantização não linear para comprimir os dados e reduzir o tamanho dos arquivos.

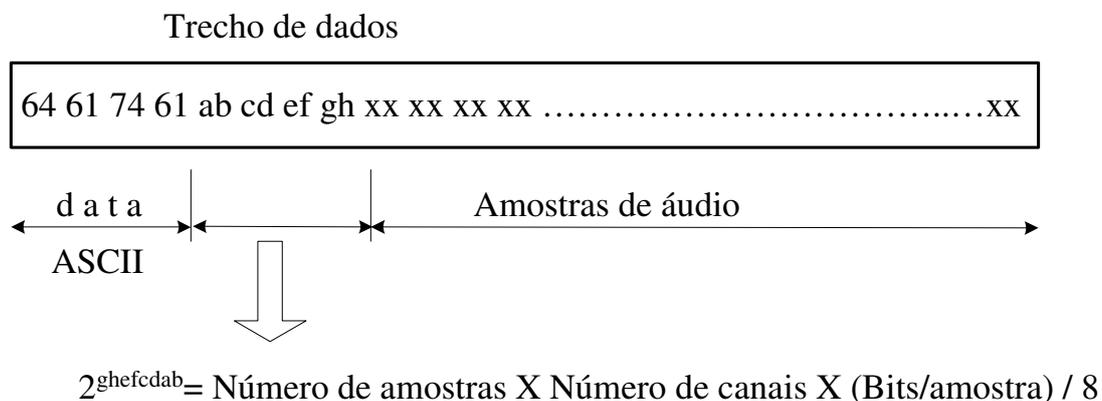
O trecho *data* segue o trecho *format* contendo o tamanho (em bytes) desse trecho e as amostras do áudio (Fig. 16). Amostras de 8 bits são representadas como inteiros sem sinal, de 0 a 255 cada uma. Já amostras de 16 bits usam o código complemento de 2 para representar números inteiros com sinal, de -32.768 a $+32.762$ cada qual.

Como se pode perceber, o trecho com o áudio pode ser recuperado, usando-se as informações do trecho *format*, como o tipo de quantização, taxa de amostragem, número de bits/amostra, e número de canais. À guisa de exemplo, mostram-se no topo da Fig. 17 os primeiros 54 bytes (números hexadecimais) de um arquivo WAV contendo 10 amostras de um sinal de áudio, um canal, quantizado com 8 bits, PCM, com taxa de amostragem de 8 kHz. No restante da Fig. 17, apresenta a interpretação para os bytes do arquivo. Como se vê, a forma canônica do arquivo WAV é de fácil leitura e interpretação.

Tabela I - Conteúdo do trecho *format*.

Número de bytes	Conteúdo	Descrição
4	66 6D 74 20	“fmt “ em ASCII.
4	-----	Número de bytes do resto deste trecho. Se PCM, este número é 10 00 00 00 (16 em decimal)
2	00 01	Formato do áudio: 0001 indica PCM; 0006 indica “lei A”; 0007 indica “lei μ”; etc.
2	-----	Número de canais. Mono =1; Estéreo = 2; etc
4	-----	Taxa de amostragem: 8000 Hz, 44100 Hz, etc.
4	-----	<i>ByteRate</i> (bytes/segundo) = Taxa de amostragem X Número de canais X Bits/amostra /8.
2	---	Número de canais X Bits/amostra /8.
2	---	Bits por amostra. 8 bits = 8; 16 bits = 16; etc.
2	---	Número de outros parâmetros. Se PCM, este campo não existe.
x		Espaço para outros parâmetros. Se PCM, não existe.

Obs: 1) --- são números que vão de 0 a 65.535.
 2) ----- são números que vão de 0 a FFFFFFFF (em hexadecimal)

Fig. 16: Conteúdo do trecho *data*.

```
52 49 46 46 2A 00 00 00 57 41 56 45 66 6D 74 20 10 00 00 00 01 00 01 00
40 1F 00 00 40 1F 00 00 01 00 08 00 64 61 74 61 0A 00 00 00 3F 45 5A 67
51 40 B2 C5 DE F0
```

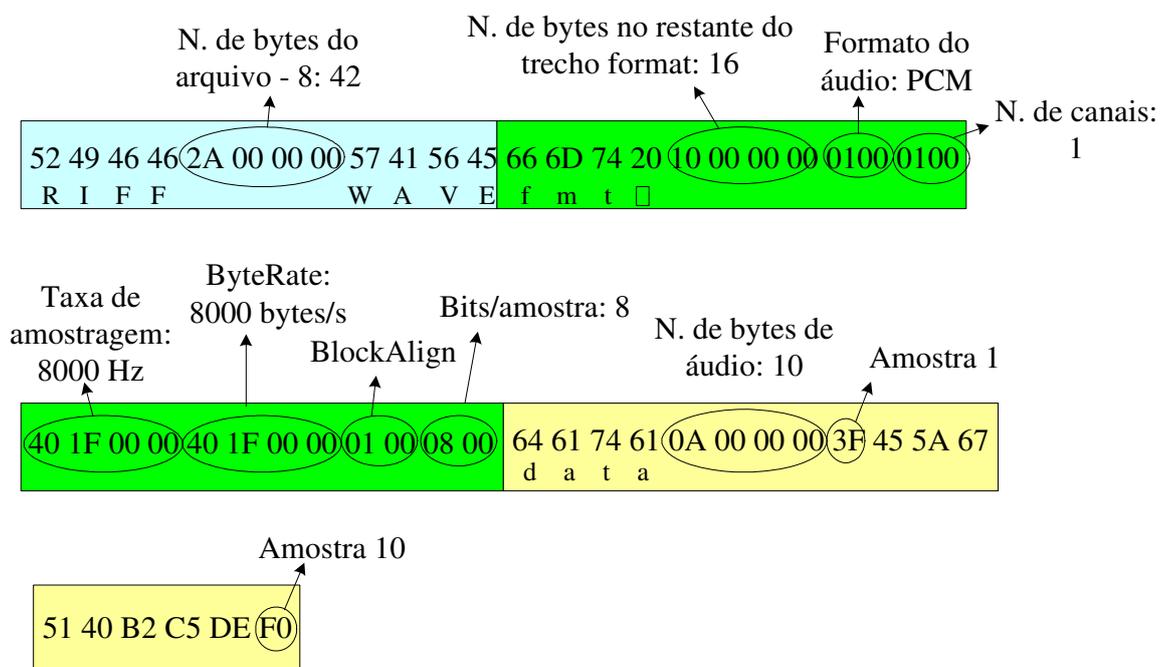


Fig. 17: Exemplo de arquivo WAV e sua interpretação.

3.3 CIRCUITOS AUXILIARES PARA GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO

Para realização da estratégia de gravação e reprodução de sinais não-áudio pela entrada do microfone de um MP3 *player* portátil, torna-se necessário o uso de um modulador de FM e de um demodulador de FM (Fig. 10), como já se discutiu no item 3.1 Nesta seção, apresentam-se os circuitos empregados para a realização destes blocos funcionais. Em verdade, há uma interessante alternativa para a demodulação do sinal de FM, não realizada neste trabalho, mas que será discutida no capítulo que apresenta os resultados.

3.3.1 Modulador de FM

Um oscilador controlado por tensão (VCO – *Voltage Controlled Oscillator*) faz o papel de um modulador de FM. Há muitas alternativas de CIs comerciais nos quais o VCO encontra-se semipronto, bastando se acrescentar um capacitor, que serve para definir a frequência central de oscilação. Um exemplo deste tipo de CI é o popular CD4046 (*Micropower Power Phase-Locked-Loop*) da National Semiconductors, que contém ainda um comparador de fase, além do VCO.

No entanto, o sinal de saída da grande maioria destes VCOs, aí incluído o próprio CD4046, é do tipo quadrado (onda quadrada com ciclo de serviço de 50%), adequado para uma vasta gama de aplicações, mas não para este projeto, pois, como já se comentou, o algoritmo da função “REC” do MP3 *player* rejeita gravar sinais que não sejam áudio. Embora não se tenham realizado testes com este componente como VCO, optou-se pela adoção de um CI gerador de funções, inclusive função senoidal, com recurso de modulação de frequência. Assim, adotou-se o XR-2206 (*Monolithic function generator*) da EXAR Corporation (EXAR, 2997). Este componente é muito flexível, permitindo fácil ajuste da amplitude do sinal gerado, de sua frequência central, e do nível de distorção harmônica.

Na Fig. 18 mostra-se o esquema elétrico do modulador de FM usando um XR-2206. Um capacitor de 100 nF no VCO, entre os pinos 5 e 6, define, conforme manual do CI, a frequência de oscilação central em 1200 Hz aproximadamente. O potenciômetro de 2 M Ω , que aparece entre a referência e um resistor de 1 k Ω ligado ao pino 7, permite o ajuste fino desta frequência do VCO. O potenciômetro de 50 k Ω , marcado como “Sine amp.” no esquema, permite o ajuste da amplitude do sinal de FM. O resistor de 220 Ω entre os pinos 13 e 14 do CI serve para controle do nível de distorção do sinal

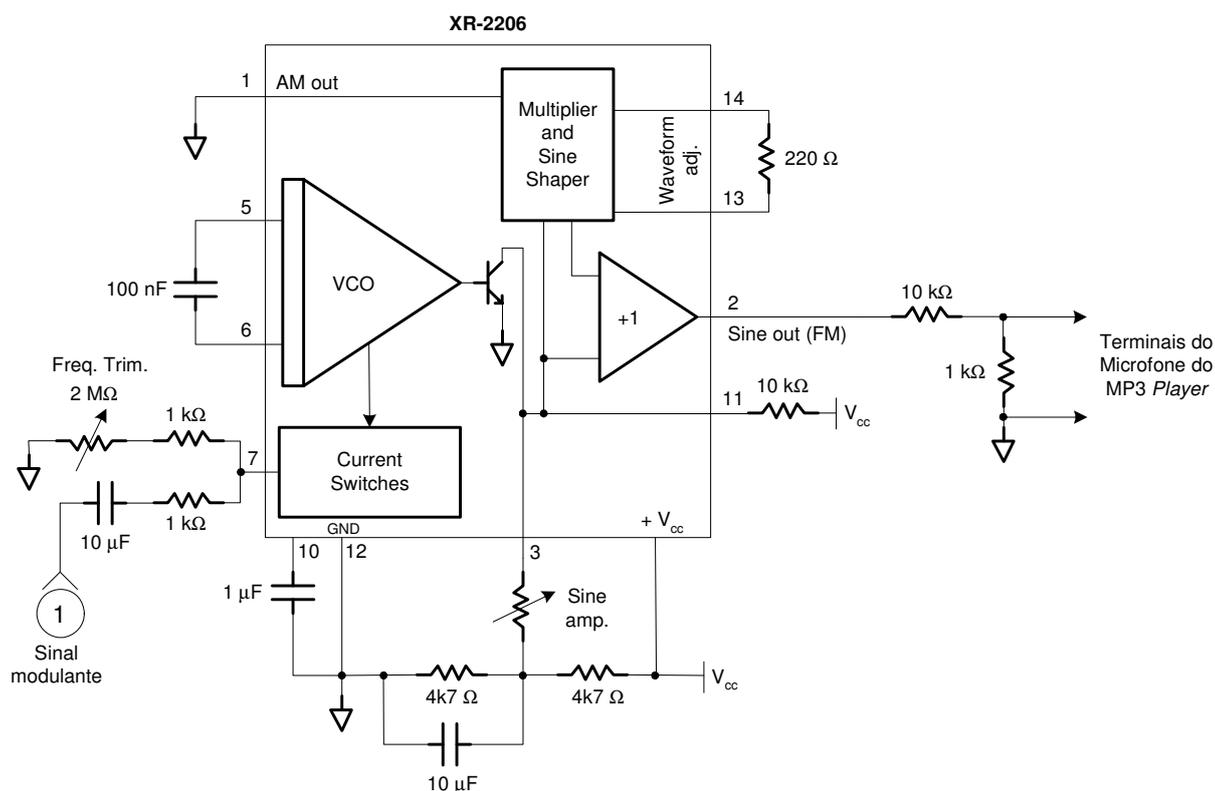


Fig. 18: Esquema elétrico simplificado para o modulador de FM.

senoidal gerado. Este não parece um item que demande grande atenção neste projeto, a menos que a portadora senoidal aparecesse visivelmente distorcida no osciloscópio, o que não aconteceu durante os testes.

O sinal modulante é o sinal que se deseja gravar no MP3 *player* e que, portanto, deve modular a portadora de FM senoidal. Como mostrado pelo conector 1 da Fig. 18, este sinal é acoplado ao VCO por meio de um capacitor de 10 μF em série com um resistor de 1 $\text{k}\Omega$. O XR-2206 aceita alimentação com tensão de 10 V a 26 V. Sua sensibilidade à tensão de alimentação é baixíssima (0,01 % V).

O divisor de tensão colocado na saída do modulador (*Sine out* (FM), pino 2) tem a função de reduzir em 10 vezes a amplitude do sinal de FM para que esta assumo o nível de tensão tipicamente gerado por microfones de eletreto (algumas dezenas de milivolts).

O divisor de tensão e o cabo blindado também aparecem claramente na fotografia da Fig. 13.

3.3.2 Demodulador de FM

Uma vez selecionada no MP3 *player* a função para reprodução de um arquivo WAV gravado pela função “REC” (escolhendo-se primeiramente a função “*play mode*” e, em seguida, a opção “*play recorded track*”), o aparelho passa a decodificar o arquivo WAV e a reproduzir seu áudio nos fones de ouvido. Neste trabalho, para se detectar o sinal modulante, optou-se pelo emprego de um CI demodulador de FM. A escolha recaiu sobre o NE564, um PLL (*Phase-Locked Loop*) da Philips (PHILIPS Semiconductors, 1994) facilmente encontrado no mercado.

O projeto de um demodulador de FM, ainda que se lançando mão de um PLL monolítico, é não trivial. As equações de projeto divulgadas pelo fabricante em seus manuais são escassas e incompletas. O esquema elétrico do demodulador de FM usado neste trabalho está mostrado na Fig. 19. O sinal de FM é captado nos terminais da bobina de um dos fones de ouvido, com o auxílio de um amplificador de instrumentação (INA101 da Texas Instruments) onde recebe um ganho de tensão de aproximadamente 4, antes de ser acoplado por um capacitor de 220 nF ao comparador de fase. Um capacitor de 470 nF estabelece a frequência central do VCO em 1200 Hz, a mesma frequência do VCO usado no modulador de FM. Dois capacitores de 100 nF cada determinam a frequência de corte do filtro do comparador de fase (*loop filters*), ao passo que um resistor de 33 k Ω determina o ganho da malha (*loop gain*). O sinal modulante recebe uma filtragem passa-baixas adicional propiciada pelo capacitor de 100 μ F (pino 14, *analog out*) e um

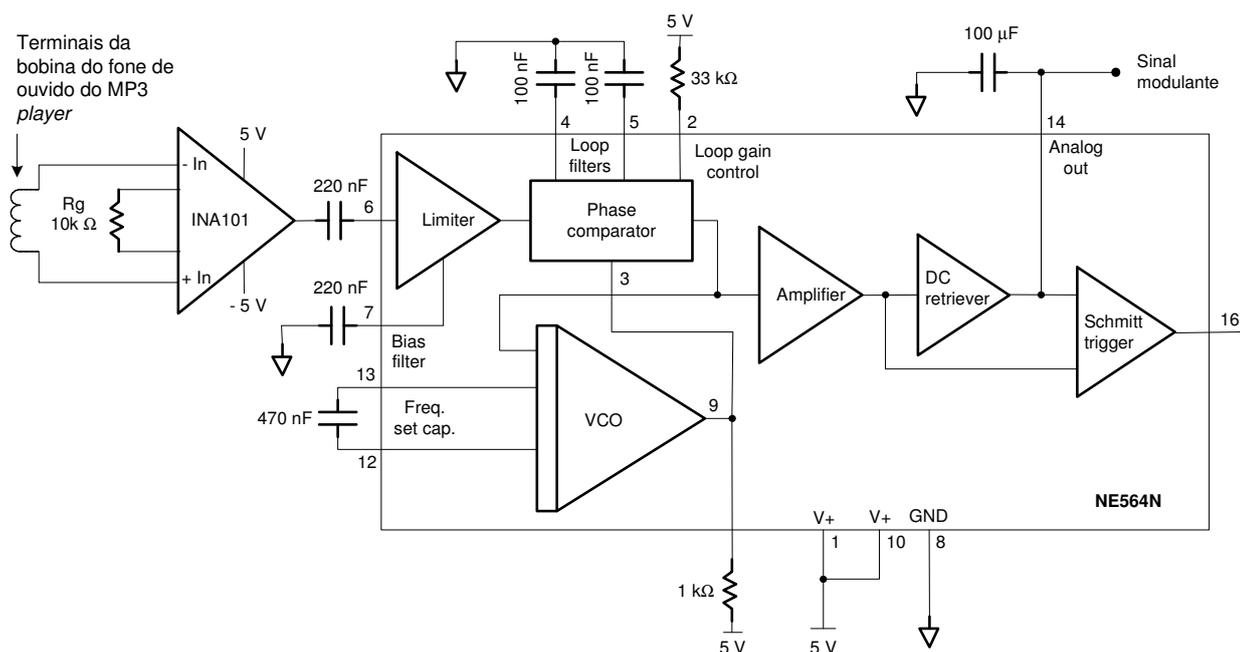


Fig. 19: Esquema elétrico simplificado para o demodulador de FM.

resistor de $10\text{ k}\Omega$ interno ao CI e não mostrado no esquema elétrico. Um filtro de melhor qualidade, ou melhor, com banda de rejeição mais estreita diminuiria a presença da portadora no sinal modulante (detectado). Neste trabalho, não se usou tal filtro, porque o objetivo primeiro desse é o teste conceitual – a possibilidade de emprego do MP3 *player* portátil como registrador para sinal não-áudio.

3.4 ESTUDO DE CASO: GRAVAÇÃO DE ELETROCARDIOGRAMA

Já se mencionou no capítulo introdutório deste trabalho que são muitas as aplicações para registradores portáteis de sinal analógico. Nesta seção, propõe-se empregar o ECG como sinal de teste e, para tanto, mostra-se um circuito para detecção e condicionamento deste biopotencial.

As doenças cardiovasculares são a principal *causa mortis* nos países ocidentais. O eletrocardiograma é o exame cardiológico mais freqüente: $0,3/\text{capital/ano}$, apenas na

Europa (OEDIPE (s.d.) apud CHRONAKI et al., 2002). Não existe ainda um padrão universal para arquivamento do ECG, nem de qualquer outro sinal bioelétrico, embora já existam grupos de trabalho na Europa e América do Norte trabalhando para o estabelecimento de um tal padrão (CHRONAKI et al., 2002). Há um volume enorme de sinais de ECG que precisam ser gravados, para fins de acompanhamento de tratamentos dos pacientes ao longo dos anos.

Ao menos no Brasil (sic²), é o próprio paciente (ambulatorial) que guarda seu ECG registrado em papel, após uma visita ao consultório médico ou pronto-socorro. Os arritmólogos (médicos especializados em arritmias cardíacas) e a maioria esmagadora dos hospitais especializados em doenças cardiovasculares e cardiopulmonares ainda arquivam os ECGs gravados em papel em fichários impressos (para pacientes internados). Além de faltar infra-estrutura de informática nos hospitais e clínicas, há o problema do alto custo, da escassez de mão-de-obra treinada, e da grande quantidade de sinais registrados diariamente. À guisa de exemplo, apenas em um dos hospitais especializados em doenças cardiopulmonares de uma capital brasileira (Fortaleza-CE), realizam-se o ECG completo de cerca de 200 pacientes diariamente, dos quais 40 são encaminhados para internação. No registro do ECG usam-se 2 ou 3 batimentos de cada uma das 12 derivações (combinações de 9 eletrodos conectados ao paciente), mais um registro longo (aproximadamente 10 segundos) da derivação II - sinal captado entre os eletrodos do braço direito e perna esquerda. Assim, como se vê, são bem-vindas as soluções que ajudem a resolver o problema do armazenamento deste importante biopotencial, a baixo custo, e que ainda facilitem seu manuseio eletrônico, inclusive a transmissão por Internet.

3.4.1 Circuito de Condicionamento para o ECG

² SIC = segundo informações colhidas.

Capta-se a atividade elétrica do coração (ECG) de um indivíduo colando-se eletrodos de Ag-AgCl a pontos padronizados de seu corpo. Os eletrodos fazem a transdução das correntes iônicas, que surgem em consequência da atividade elétrica do miocárdio, para correntes eletrônicas. Entre cada eletrodo e a pele usa-se um gel condutor, para facilitar o contato eletrodo-pele e diminuir artefatos no sinal provocados pelo movimento do indivíduo (WEBSTER, 1998).

Neste trabalho, uma vez que se tentará o registro de um só canal no MP3 *player*, usa-se apenas o sinal captado entre o eletrodo do braço direito e o eletrodo do braço esquerdo – a chamada derivação I. Considera-se o potencial da perna direita como o ponto de referência.

Na Fig. 20, vê-se o esquema elétrico simplificado para o circuito de condicionamento do ECG, o qual inclui um amplificador de instrumentação (INA101 da Texas Instruments). Este amplificador promove um ganho de tensão de 200 no sinal diferencial captado entre os eletrodos do braço direito (RA: *right arm*) e braço esquerdo (LA: *left arm*)³. Um filtro RC passa-baixas, com frequência de corte de aproximadamente 0,23 Hz, acopla o sinal de ECG à entrada de um amplificador operacional (OP-27 da Texas Instruments) fazendo a função de um seguidor de tensão de alta impedância de entrada. É a saída (conector 1) deste seguidor que é acoplada ao modulador de FM (Fig. 18). Um segundo amplificador operacional (OP-27) inverte o sinal médio dos eletrodos RA e LA, promove algum ganho, e injeta o sinal resultante no corpo do indivíduo, pelo eletrodo de referência (RL), com o objetivo de diminuir a interferência do sinal de modo comum da rede elétrica, acoplado sobretudo capacitivamente com o corpo do indivíduo. Embora o amplificador de instrumentação tenha uma taxa de rejeição ao modo comum

³ Ainda é comum o uso das iniciais em língua inglesa para identificar os membros e eletrodos.

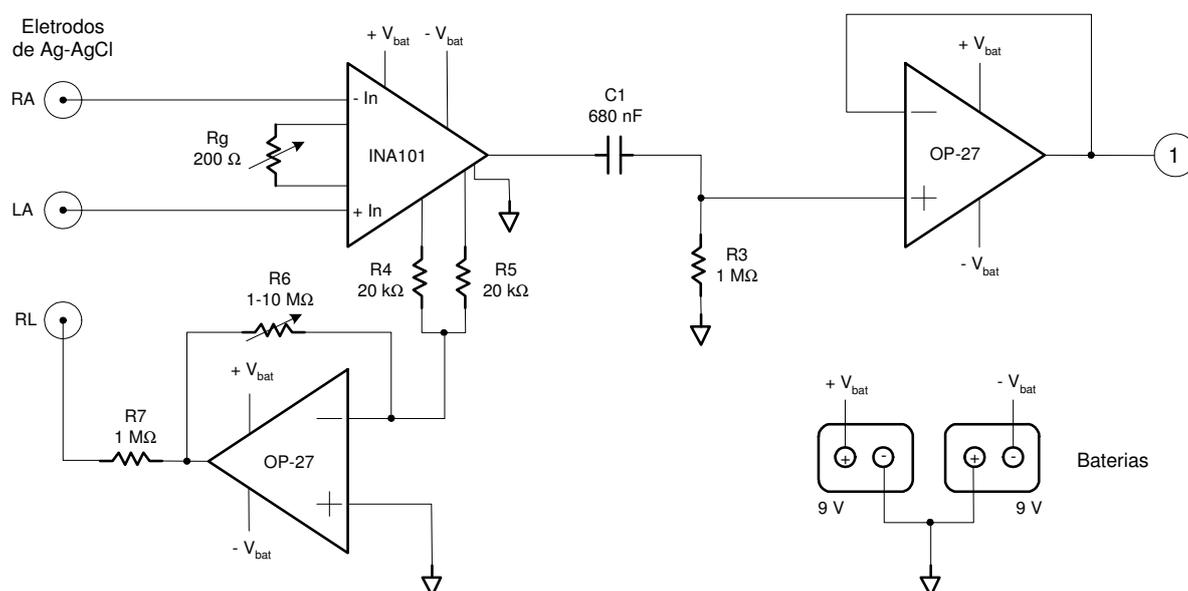


Fig. 20: Esquema elétrico simplificado para o circuito de condicionamento do sinal de ECG.

muito elevada (90 dB), é crucial o cancelamento, ao menos parcial, da interferência do 60 Hz da rede elétrica, em razão de a impedância eletrodo-pele diferir ligeiramente de um eletrodo para o outro, fazendo surgir um sinal diferencial de 60 Hz (WEBSTER, 1998)

Na Fig. 21 mostram-se duas fotografias com o protótipo desenvolvido para teste da proposta deste trabalho. Na foto superior, podem-se ver o MP3 *player* portátil modificado, e uma placa que contém o circuito de condicionamento para o ECG, o modulador de FM, e o demodulador de FM. Aparecem ainda duas baterias de 9 V cada, usadas para alimentar os circuitos, e uma parte de um *protoboard*. Neste há apenas um amplificador de instrumentação usado para captação do sinal da bobina de um dos fones de ouvido e visualização deste sinal em um osciloscópio. Na foto inferior, aparecem os três eletrodos e seus respectivos cabos usados para captação do ECG de um voluntário.

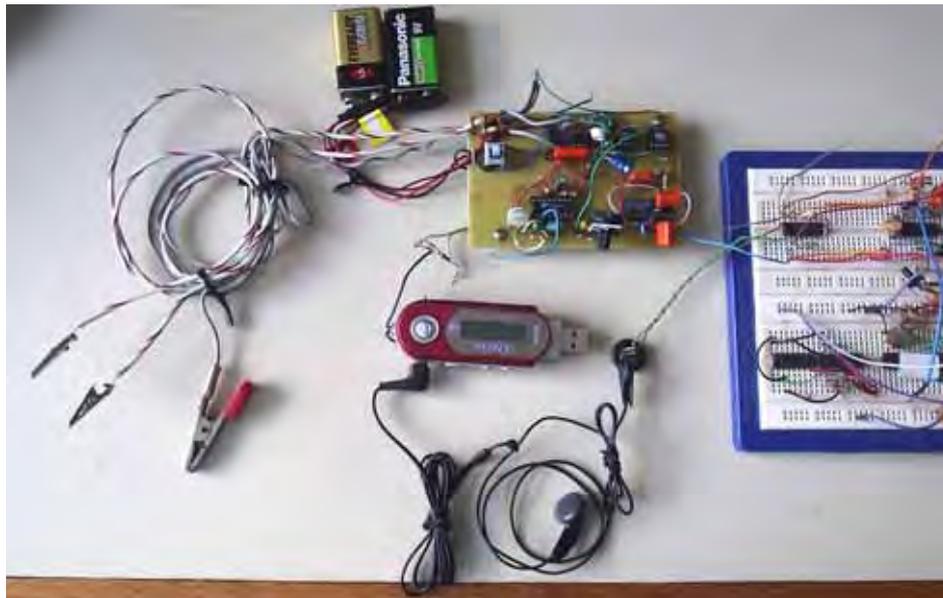


Fig. 21: Fotografia dos eletrodos, cabos, MP3 *player* portátil (Sony), placa com circuito de condicionamento para o sinal de ECG, modulador FM, demodulador FM e duas baterias de 9 V. O uso do *protoboard* é parcial.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Apresentam-se resultados de gravação de sinais senoidais e de ECG no MP3 'player' portátil usando-se a técnica proposta.

4.1 GRAVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE SINAIS SENOIDAIS

Usou-se um gerador de sinais (HP 33120A), como ilustrado na Fig. 22, para se injetar um sinal de FM, durante alguns minutos, diretamente no MP3 *player*, ou seja, sem se usar o modulador de FM mostrado na Fig. 18. Empregou-se uma portadora senoidal de 1200 Hz, a mesma frequência usada na portadora do modulador de FM mostrado no capítulo anterior. Primeiramente, usou-se um sinal modulante de 100 Hz. e captaram-se com um osciloscópio o sinal de FM (parte superior da Fig. 23) e o sinal de saída do circuito detector de FM mostrado no capítulo anterior (parte inferior da Fig. 23).

Como se vê na Fig. 23 (parte inferior), o demodulador de FM detectou o sinal mo-

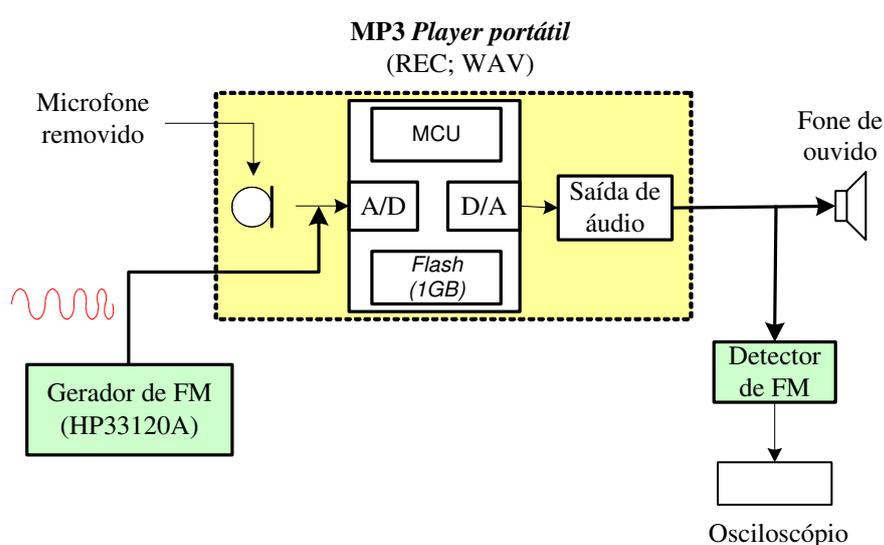


Fig. 22: Teste de gravação e recuperação de sinal usando-se um gerador de FM.

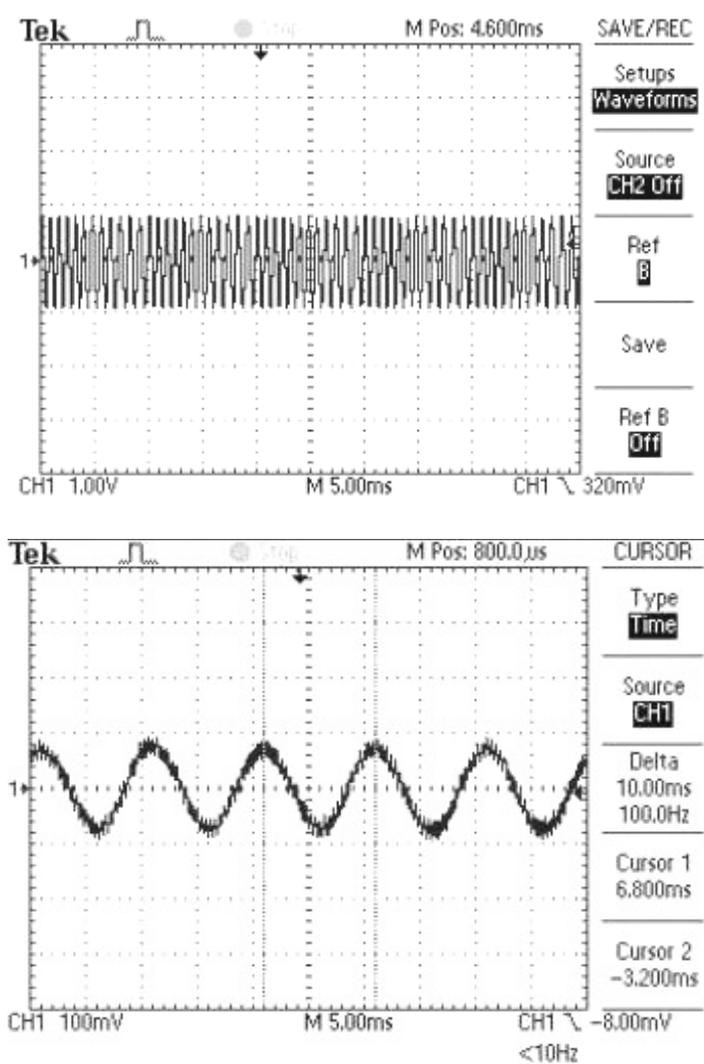


Fig. 23: Superior: Sinal de FM (portadora: 1200 Hz; sinal modulante: senóide de 100 Hz). Inferior: saída do demodulador de FM.

dulante de 100 Hz com qualidade aceitável. Neste sinal, de amplitude ligeiramente inferior a 5 mV, pode-se perceber a discreta presença da portadora. Esta, no entanto, pode-se reduzir facilmente, se necessário, com um filtro passa-baixas.

Em seguida, alterou-se a frequência do sinal modulante para 5 Hz, e repetiu-se o procedimento para gravação do sinal de FM no MP3 *player* e posterior recuperação do sinal modulante. A Fig. 24 mostra os oscilogramas contendo o sinal de FM (traço inferior) e o sinal modulante (traço superior), este captado na saída do demodulador de FM.

Com o auxílio do osciloscópio, verificou-se que o sinal detectado está fortemente contaminado com a portadora de FM. Ensaios não documentados neste trabalho, no entanto, mostraram que o demodulador de FM da Fig. 18 é capaz de detectar sinal modulante de frequência inferior a 1 Hz e com qualidade (relação sinal-ruído – SNR) comparável àquela do sinal mostrado na Fig. 23 (inferior). Assim, a baixa SNR observada no traço superior da Fig. 24 deve ser provocada pelo filtro passa-faixa da saída de áudio do MP3 *player* portátil (destacado na Fig. 12).

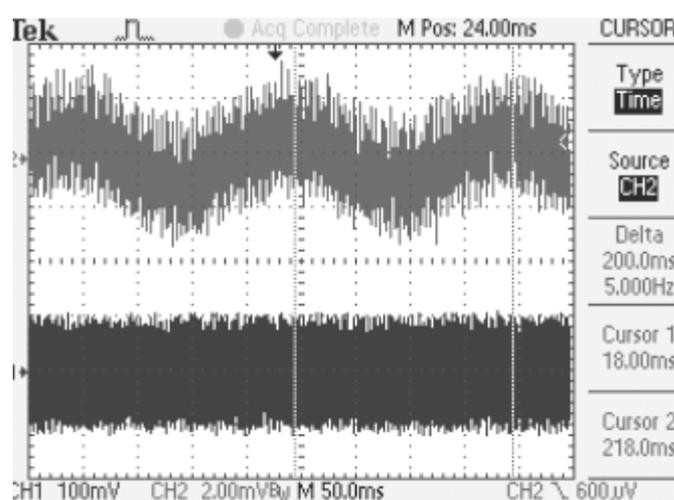


Fig. 24: Traço inferior: sinal de FM (portadora: 1200 Hz, sinal modulante: senóide de 5 Hz) gravado no MP3 *player*. Traço superior: sinal modulante detectado na saída (fone de ouvido) do MP3 *player*.

Para sanar o problema da limitação discutido no parágrafo anterior, ao menos duas diferentes abordagens poderiam ser investigadas. A primeira seria a captação do sinal de FM antes do filtro passa-faixa interno ao MP3 *player*, abordagem que dependeria da localização do filtro e do acesso a ele, uma vez que componentes SMDs amiúde encontram-se debaixo de conectores (ver Fig. 11). Há ainda a chance de que o filtro de áudio também sirva para barrar os componentes de alta frequência gerados pelo processo de

conversão D/A, caso em que a solução proposta seria inaceitável. Uma segunda solução, mais elegante, não invasiva, seria realizar digitalmente, no PC, a demodulação do sinal de FM, usando o arquivo WAV gravado no MP3 *player* e transferido para o PC por meio da porta USB.

4.2 GRAVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ECG

Para avaliar a viabilidade do MP3 *player* portátil como meio para armazenamento do ECG, usou-se o circuito mostrado nas Figs. 20 e 21, com os eletrodos primeiramente colados ao corpo de um voluntário. Selecionou-se a função “REC” do MP3 *player* e registrou-se o ECG por cerca de 60 s. Simultaneamente, o ECG foi capturado por um osciloscópio digital (TDS 2002 da Tektronix), na saída do amplificador de instrumentação. O traço inferior da Fig. 25 é o ECG do voluntário antes da gravação no MP3 *player*, ao passo que o traço superior é o ECG captado na saída do demodulador de FM. Houve diminuição da relação sinal-ruído, provavelmente provocada pelo mesmo mecanismo já comentado – o filtro passa-faixa da saída do MP3 *player*. Contudo, o que salta aos olhos é a distorção introduzida na onda T do ECG, tornando-a bipolar, quando é de fato unipolar.

Usou-se um simulador de arritmias cardíacas (aparelho que gera o ECG idêntico ao ECG de um paciente portador de arritmias) (LM, 1991), para se averiguar a qualidade deste tipo de ECG gravado no MP3 *player*, empregando-se procedimento análogo ao já descrito, mas desta vez ligando-se os pinos da saída do simulador às entradas do amplificador de instrumentação, e selecionando-se, no teclado do simulador, uma arritmia por vez. A Fig. 26 mostra três telas do osciloscópio cada qual contendo uma arritmia. A tela

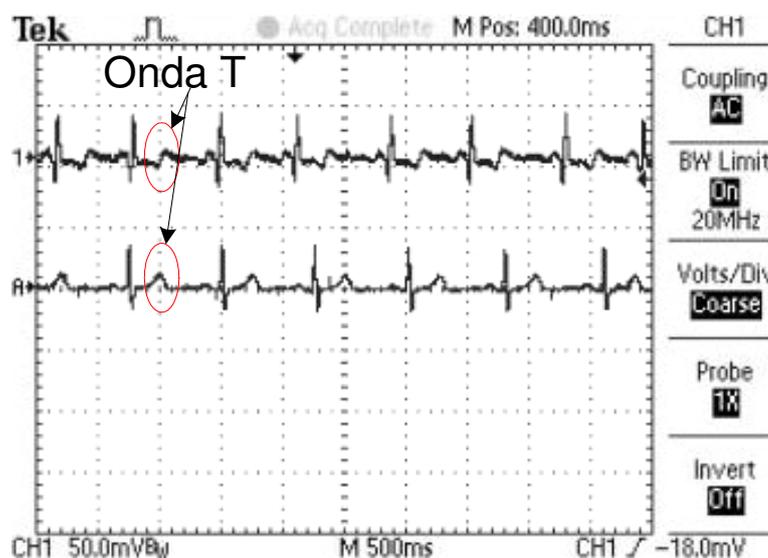


Fig. 25: Traço inferior: ECG de um voluntário registrado na saída do amplificador de instrumentação. Traço superior: mesmo ECG recuperado do MP3 *player* portátil (saída do demodulador de FM).

superior contém dois traços: o inferior é o sinal gerado pelo simulador (arritmia conhecida como bigeminismo) e usado para gravação no MP3 *player*, ao passo que o traço superior é o sinal gravado e recuperado. Nas duas demais telas, mostram-se apenas os sinais arrítmicos recuperados: taquicardia ventricular (tela intermediária) e extra-sístoles ventriculares multifocais (tela inferior). Os sinais recuperados claramente exibem SNRs menores, relativamente aos originais, e a distorção introduzida, em cada sinal arrítmico gravado, pelo processo de recuperação do sinal do MP3 *player* é semelhante àquela do sinal da Fig. 25. Ou seja, os componentes de baixa frequência sofrem alterações que tendem a mudar sua polaridade e amplitude relativa.

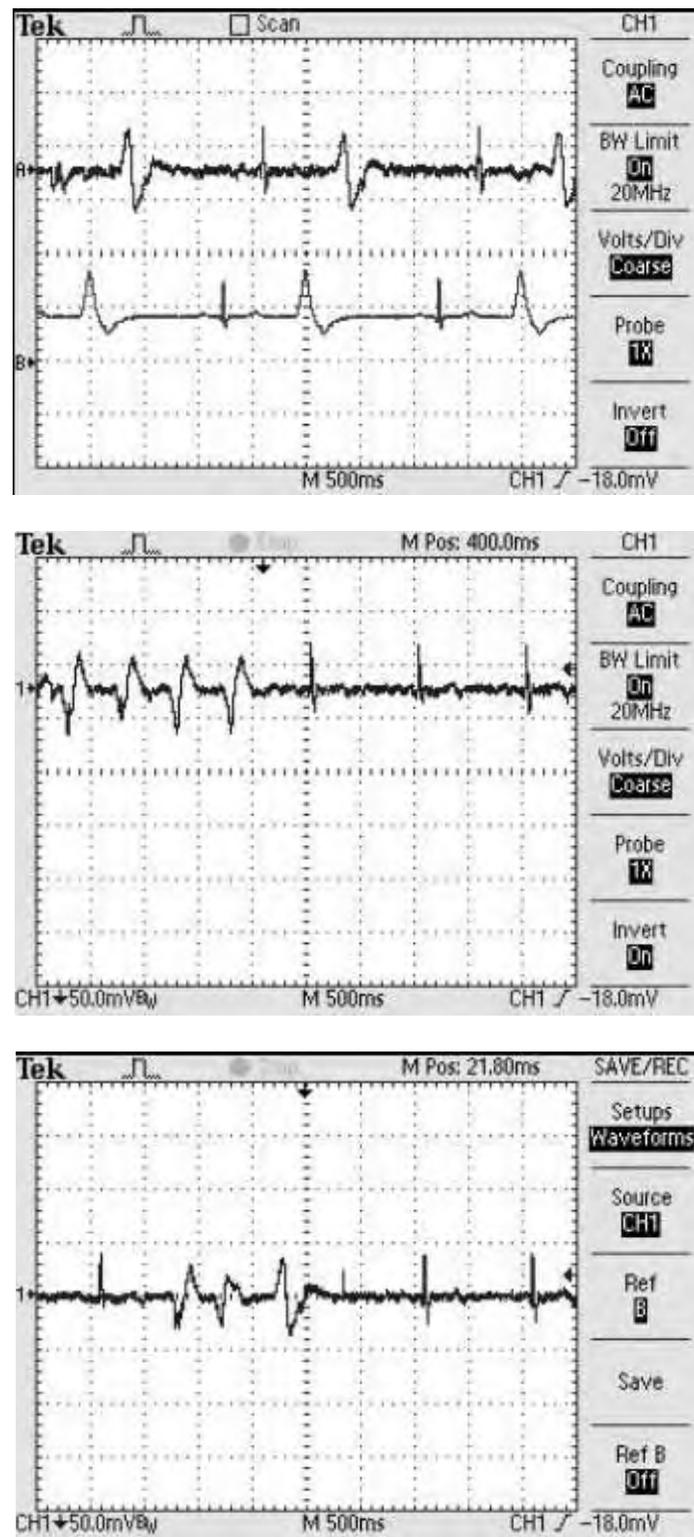


Fig. 26: ECGs com arritmias gravados no MP3 *player* e recuperados com o demodulador de FM. Para detalhes, ver texto.

5. CONCLUSÃO

Resumem-se aqui o objetivo deste trabalho e seus resultados, e sugerem-se algumas extensões.

Neste trabalho testou-se a proposta de uso do MP3 *player* portátil para gravação de sinais analógicos não-áudio, para aproveitar-se da enorme quantidade de memória *flash* (não volátil) que estes aparelhos encerram e da eletrônica e algoritmos para aquisição de voz que já se encontram à disposição no aparelho, tudo a um custo muito reduzido, graças a seu consumo global e a sua produção em massa.

Usou-se o canal para registro de voz no MP3 *player* portátil, retirando-se seu microfone de eletreto e, uma vez que seu algoritmo de aquisição de voz rejeita a gravação de sinal que não seja áudio, utilizou-se o sinal a ser gravado para modular a frequência de uma portadora de 1200 Hz. A recuperação do sinal modulante se fez com um demodulador de FM a PLL que capta o sinal de FM nos terminais da bobina do fone de ouvido do MP3 *player*.

Realizaram-se testes usando-se sinal senoidal e sinal de eletrocardiograma. Embora os resultados apontem para um bom potencial de uso da técnica proposta, a qualidade dos sinais de baixa frequência recuperados do MP3 *player* ainda requer melhoria, antes que esta técnica possa ser amplamente utilizada.

Sugerem-se a seguir algumas possíveis extensões deste trabalho:

- 1) Demodulação digital do sinal FM com base no arquivo WAV transferido para o PC pela porta USB do MP3 *player* portátil.

- 2) Desenvolvimento de instrumentação virtual para exibição no PC do sinal demodulado.
- 3) Miniaturização do circuito de condicionamento de sinal e do modulador de FM, por meio do emprego de componentes SMDs.
- 4) Desenvolvimento de uma base de dados para arquivamento de ECGs de pacientes portadores de cardiopatias.
- 5) Desenvolvimento de circuitos que permitam, na gravação, multiplexar alguns canais analógicos.
- 6) Explorar a gravação de sinal de outra natureza (vibração, por exemplo).
- 7) Explorar outros formatos para gravação de sinal pelo canal do microfone do *MP3 player* portátil: ACT – gravação longa; VOR – gravação de excelente qualidade; VOR – longo.
- 8) Realizar com *iPods* experimentos equivalentes aos realizados com o *MP3 player* portátil.

REFERÊNCIAS

- AMINIAN, K.; ROBERT, P.; JÉQUIER, E. Estimation of speed and incline of walking using neural network. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.44, n.3, p.743-746, 1995.
- BARNES, G. E.; WARREN, S. A wearable, bluetooth-enabled system for home health care. **24TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY AND ANNUAL FALL MEETING OF THE BIOMEDICAL ENGINEERING SOCIETY, 2ND JOINT EMBS/BMES CONFERENCE 2002**. Proceedings... v.3, p.1879-1880, 2002.
- BORG. Wave file format. Disponível em: <http://www.borgh.com/~jglatt/tech/wave.html>. Acessado em 28/09/2007.
- DIGITAL PRESERVATION. Wave audio file format. Disponível em: <http://www.digitalpreservation.gov/formats/fdd/fdd000001.shtml>. Acessado em 14/02/2008.
- EUROPEAN BROADCAST UNION (EBU). BWF – A format for audio data files in broadcasting. Technical Specification, version 1, 15 p.. July 2001. Disponível em <www.ebu.ch>. Acessado em 30/09/2007.
- CIFREK, M.; MRVOS, S.; ZUFIC, P. Portable data logging system for long-term continuous monitoring of biomedical signals. **12TH IEEE MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE, MELECON 2004**. Proceedings... v.1, p.399-402, 2004.
- CHRONAKI, C. E.; CHIARUGI, F.; LEES, P. J.; BRUUN-RASMUSSEN, M.; CONFORTI, F.; RUIZ FERNANDEZ, R.; ZYWIETZ, C. Open ECG: a European project to promote the SCP-ECG standard, a further step towards interoperability in electrocardiography. **Computers in Cardiology**, v.29, p.285-288, 2002.

EXAR Corporation. XR-2206 Monolithic function generator. Rev. 1.03. 1997.

HAYES-GILL, B. R.; CARDOSO, A. C.; MEINKE, N.; CROWE, J. A.; FRANCON, B.; HARRISON, A. A generic ASIC and DSP based ambulatory electrophysiological recorder. **IEE COLLOQUIUM ON DATA LOGGING OF PHYSIOLOGICAL SIGNALS**. p.9/1-9/3, 1995.

KIM, J.; LEE, M.; LEE, H.-K; CHOI, K.; BANG. S.; KIM, S. Heart rate monitor for portable MP3 player. **27th IEEE ANNUAL CONFERENCE ON ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY, 2005**. Proceedings... p.5207-5210, 2005.

KUCHTA, R.; STEFAN, P.; BARTON, Z.; VRBA, R.; SVEDA, M. Wireless temperature data logger. **ASIAN CONFERENCE ON SENSORS AND THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW TECHNIQUES IN PHARMACEUTICAL AND BIOMEDICAL RESEARCH, 2005**. Proceedings, p.208-212, 2005.

LM SISTEMAS ELETRÔNICOS LTDA. Simulador de Arritmias Cardíacas. Campinas, SP, 1991.

LUHARUKA, R.; GAO, R. X.; KRISHNAMURTY, S. Design and realization of a portable data logger for physiological sensing. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.52, n.4, p.1289-1295, 2003.

MCCANDLESS, M. The MP3 revolution. **IEEE Intelligent Systems and Their Applications**, v.14, i.3, p.8-95, 1999.

MOCK, T. Music everywhere. **IEEE Spectrum**, v.41, i.9, p.42-47, 2004.

NEVINS, R. J.; DURDLE, N. G.; RASO, V. J. A posture monitoring system using accelerometers. **CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 2002. IEEE CCECE 2002**. Proceedings, v.2, p.1087-1092, 2002.

- PAN, D. A tutorial on MPEG/audio compression. **IEEE Multimedia Journal**, v.2, n.2, p, 60-74, 1995
- PHILIPS Semiconductors. NE564N Phase-locked loop. Product specification. 10 p. 1994. Disponível em <www.datasheetcatalog.com>. Acessado em 30.08.2007.
- RUZANSKI, E. P. Effects of MP3 encoding on the sounds of music. **IEEE Potentials**, v.25, n.2, p.43-45, 2006.
- SAPP, C. S. Wave PCM soundfile format. Disponível em: <http://ccrma.stanford.edu/CCRMA/Courses/422/projects/WaveFormat/>. Acessado em 14/02/2008.
- S1MP3.ORG. Disponível em: <http://www.s1mp3.org/pt/index.php>. Acessado em 28/02/2007.
- THE SONIC SPOT. Wave file format. Disponível em: <http://www.sonicspot.com/guide/wavefiles.html>. Acessado em 14/02/2008.
- WEBSTER, J. G. (ed.) **Medical instrumentation: application and design**. New York: John Wiley, 1998.
- YOSHIDA, M.; AKAZAWA, K. Monitoring of muscle power during walking. **19TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY, IEEE/EMBS 1997**. Proceedings, v.5, p.1899-1901, 1997.