

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS BIOMÉDICOS BASEADO NO FRONT-END ADS1299

R. Zanetti^{1,2}, M.L.M. Assunção², M.F.S. Corrêa², C.J. Tierra-Criollo^{2,3} e D. B. Melges²

¹ Coordenação de Equipamentos Biomédicos, CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFMG, Belo Horizonte, Brasil

³ Programa de Engenharia Biomédica - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

e-mail: renatoznt@gmail.com

Resumo: Esse trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de aquisição de sinais biomédicos, de 8 canais, baseado no *front-end* ADS1299 e no PIC32MX775512L. Os seguintes parâmetros do sistema foram obtidos com vistas à caracterização: i) *Input Referred Noise* (IRN); ii) *Signal-to-Noise Ratio* (SNR); iii) *Noise-Free Bits* (NFB); iv) *Effective Resolution* (ER). O sistema foi validado por meio de coleta de sinais de eletroencefalograma espontâneo (EEG) e durante estimulação visual (PEV). O sistema desenvolvido possui 300 nV de resolução e taxa de amostragem (F_s) máxima de 1 kHz. Alimentado por bateria, com ganho $G = 24$ V/V e $F_s = 1$ kHz, tem-se $IRN < 0,5 \mu V_{RMS}$, $NFB > 20$ bits e $ER > 23$ bits, cumprindo os requisitos para equipamentos de aquisição de sinais biomédicos. O registro de EEG e PEV sugerem que o mesmo pode ser empregado para pesquisa, bem como para o desenvolvimento de interfaces cérebro-máquina.

Palavras-chave: Amplificador de sinais biomédicos, sistema embarcado, ADS1299.

Abstract: *This work aims at developing an 8-channel bio-signal acquisition system based on the ADS1299 and PIC32MX775512L. Some parameters were obtained for its characterization: i) Input Referred Noise (IRN); ii) Signal-to-Noise Ratio (SNR); iii) Noise-Free Bits (NFB); iv) Effective Resolution (ER). The system was validated by collecting spontaneous electroencephalogram (EEG) and visual evoked potential (VEP). The developed system has resolution of 300 nV and maximum sampling rate (F_s) of 1 kHz. Supplied with battery, gain $G = 24$ V/V and $F_s = 1$ kHz, it presented $IRN < 0.5 \mu V_{RMS}$, $NFB > 20$ bits and $ER > 23$ bits, according to requirements for bio-signals acquisition equipment. The EEG and VEP registration suggest that it can be used for research and brain-computer interface development.*

Keywords: *Bio-amplifier, embedded system, ADS1299.*

Introdução

Sinais biomédicos são empregados constantemente na prática clínica, seja para auxílio ao diagnóstico, seja para monitorização durante cirurgias. Dentre os sinais mais utilizados pode-se citar o eletrocardiograma (ECG), o eletromiograma (EMG), eletroencefalograma (EEG), e os potenciais evocados (PE), os quais são

registrados por meio do EEG durante algum tipo de estimulação sensorial (visual, auditiva ou somatosensitiva) [1,2].

Tais sinais apresentam reduzida amplitude e coexistem com ruídos de origens diversas (externos, fisiológicos e instrumentais) e de conteúdo espectral na mesma banda de frequência dos sinais de interesse [1]. Dentre os supracitados, o EEG é o que apresenta menor razão sinal-ruído, possuindo amplitudes de até dezenas de *microvolts* e faixa de frequência de interesse clínico entre 0,1 e 70 Hz [2].

Atualmente, o avanço da tecnologia de conversores analógico-digitais (ADC - *Analog-to-Digital Converter*) nos permite ter duas abordagens para as etapas posteriores à pré-amplificação em sistemas bio-amplificadores, como descrito por [3]. Na primeira topologia, propõe-se as seguintes etapas de condicionamento: pré-amplificação, filtragem passa-altas, amplificação/isolamento, filtro passa-baixas e digitalização com ADC de baixa resolução (≤ 16 bits) [4]. Já a segunda proposta seria converter o sinal logo após a pré-amplificação, por meio de um ADC sigma-delta de alta resolução (24 bits), taxas de amostragem superiores a 100 kHz e baixo ruído referido à entrada (IRN - *Input Referred Noise*). Mesmo que a faixa dinâmica livre de ruído seja a mesma em ambas as abordagens, a segunda proporcionaria uma redução considerável na quantidade de componentes eletrônicos empregados; principalmente se forem utilizados *Systems on Chips* (SoC) que associam condicionamento e conversão analógico-digital em um mesmo circuito integrado (CI), tal como o *Analog Front End* (AFE) ADS1299.

Assim, este trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema para registro de sinais biomédicos com base no ADS1299, tendo como requisitos dimensões físicas reduzidas e baixo custo. Além dos requisitos qualitativos, espera-se que o sistema desenvolvido obedeça às seguintes especificações técnicas recomendadas pela *International Federation of Clinical Neurophysiology* (IFCN) [5]: i) impedância de entrada maior que 100 M Ω ; ii) ruído inerente ao sistema com valores menores que 1,5 μV_{p-p} e 0,5 μV_{RMS} em qualquer frequência entre 0,5 e 100 Hz, incluindo 50/60 Hz; iii) resolução de 0,5 μV / bit; iv) taxa de amostragem igual ou superior a 200 Hz; v) banda passante de 0,16 a 70 Hz.

Materiais e métodos

Desenvolvimento - O sistema desenvolvido, batizado de RITMUS, é composto por dois módulos: *hardware* de aquisição (HAQ) e *software* de interface gráfica com o usuário (SIU).

O HAQ é um sistema embarcado baseado no AFE ADS1299 da *Texas Instruments* e no microcontrolador PIC32MX775F512L, como mostrado no diagrama de blocos da Figura 1. O ADS1299 permite a aquisição simultânea de 8 canais analógicos com 8 ADCs sigma-delta de 24 bits, a taxas de amostragem de 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 e 16.000 Hz. Esse AFE possui taxa de rejeição de modo comum (CMRR - *Common mode rejection rate*) de 110 dB e IRN de $1\mu\text{V}$ [6]. Apresentando desempenho de até 1,56 DMIPS/MHz, o PIC32 pode realizar multiplicações em um ciclo de máquina, além de possuir unidade de alto desempenho para divisões. O RITMUS pode ser alimentado tanto pela interface USB, com isolamento de 3 kV, quanto por bateria. Utilizou-se o circuito integrado (CI) ADR4525 para fornecer tensão de referência do ADC de 2,5 V com baixo ruído (típico de $1,25\mu\text{V}_{\text{p-p}}$). Além disso, foram previstos três canais digitais opto-isolados para serem usados para sincronismo com equipamentos externos.

O SIU foi elaborado na IDE (*Interface Development Environment*) Microsoft Visual C# 2010, seguindo a arquitetura *multithread* – dois ou mais fluxos de execução em paralelo – possibilitando desempenho adequado tanto na manipulação de dados, quanto na interação com o usuário. A SIU é composta apenas por três botões: configuração do HAQ, inicialização e finalização da aquisição de dados. O SIU comunica-se com o *hardware* pela interface *Universal Serial Bus* (USB) 2.0, protocolo *Human Interface Device* (HID), para o qual o sistema operacional (SO) *Windows* já possui *driver* nativo. O RITMUS permite utilizar frequência de amostragem de 250 Hz, 500 Hz ou 1 kHz (valor limitado pelo *driver* USB HID do *Windows*), configuráveis pelo SIU, para 8 canais simultaneamente. As *threads* são executadas quando ocorrem eventos gerados pelo SO relacionados à porta USB utilizada.

Caracterização - O IRN do sistema foi obtido configurando-se o multiplexador do ADS1299 no modo *Input Shorted*, no qual as entradas analógicas são curto-circuitadas a uma referência de tensão interna, como descrito em [6]. Foram coletadas cerca de 10.000 amostras a $F_s = 1\text{ kHz}$ para todos os valores de ganho ($G = 1, 2, 4, 6, 8, 12$ e 24 V/V). Inicialmente, foi realizada a remoção do valor médio do sinal coletado e posteriormente, foram calculados: valor RMS do IRN, razão sinal-ruído (SNR - *Signal-to-Noise*), bits livres de ruído (NFB - *Noise-Free Bits*) e resolução efetiva (ER - *Effective Resolution*) [7].

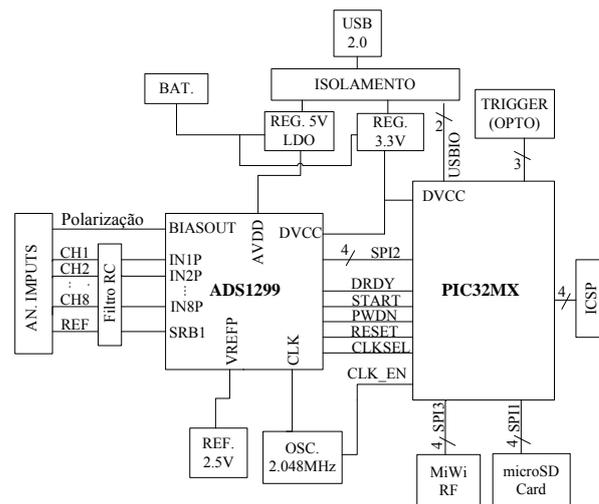


Figura 1: Diagrama de blocos do RITMUS HAQ.

Validação - Sinais de EEG espontâneo e durante estimulação visual foram coletados para validação do sistema. Estes foram registrados de 5 indivíduos saudáveis, com idade entre 21 e 34 anos ($25,8 \pm 4,86$ anos). Foram usados ganho de 24 V/V e frequência de amostragem $F_s = 1\text{ kHz}$. Registrou-se a derivação Oz (Sistema Internacional 10-20), referenciada às orelhas curto-circuitadas (*linked earlobe*) e com eletrodo de terra em Fpz.

Para obtenção de PEV, utilizou-se um estimulador visual baseado em LED (*Ligh-Emitting Diode*) [8], o qual foi posicionado a aproximadamente 50 cm dos indivíduos, no nível dos olhos. O indivíduo permaneceu sentado em uma poltrona confortável durante todo procedimento, em uma cabine com ruído e luminosidade reduzidos.

A coleta de EEG foi realizada em 3 sessões, com duração aproximada de três minutos cada: **1)** Visando-se uma análise visual, o sinal de EEG espontâneo foi coletado e filtrado (*Butterworth*, 4ª ordem, fase nula) em bandas: delta (0,1 a 4 Hz), teta (4 a 8 Hz), alfa (8 a 13 Hz) e beta (13 a 30 Hz) [2]. **2)** O PEV transitório (PEVt) foi obtido registrando-se sinais de EEG durante estimulação visual a 1 Hz. Neste caso, os sinais foram filtrados com passa-faixas (*Butterworth*, 2ª ordem, fase nula) de 0,1 a 30 Hz e *notch* em 60 Hz (*Butterworth*, 4ª ordem, fase nula). Para obtenção da forma de onda do PEVt, realizou-se a média coerente de janelas sincronizadas com o sinal de estimulação (*trigger*). **3)** Ao realizar estimulação com 10 Hz, obteve-se o PEV em regime permanente (PEVp). Os sinais foram filtrados com os mesmos filtros que os sinais do item 2, porém com banda passante de 0,3 a 100 Hz. Como a SNR é relativamente mais alta para o PEVp, analisou-se a resposta em frequência do mesmo, aplicando-se a *Discrete Fourier Transform* (DFT) ao sinal completo.

As etapas de filtragem e de cálculo da DFT foram realizadas *off-line* com auxílio do *software* MATLAB®. Esta pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética da UFMG - protocolo n. 11525613.4.0000.5149, e todos os voluntários assinaram Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Resultados

A placa do HAQ possui as dimensões de 150,9 x 82,20 mm (Figura 2), sendo composta por quatro camadas e utilizando principalmente componentes SMD (*Surface Mounting Devices*).

A Tabela 1 apresenta os valores de IRN, SNR, NFB e ER, com $F_s = 1$ kHz e diferentes valores de ganho. Pode-se notar uma redução do IRN, com o aumento do ganho. O pior valor para a SNR foi obtido para $G = 24$ V/V, sendo igual a 112,94 dB. Nesse caso, os valores de NFB e ER foram 17,5 e 20,22 bits, respectivamente. A redução da SNR, do NFB e do ER se deve ao aumento total do ruído (IRN multiplicado pelo ganho), já que esses parâmetros não consideram que o sinal também é amplificado.

Tabela 1: Caracterização do RITMUS.

G (V/V)	IRN (μV_{RMS})	SNR (dB)	NFB (bits)	ER (bits)
1	1,91	123,58	19,31	22,03
2	1	123,24	19,25	21,97
4	0,56	122,25	19,08	21,8
6	0,43	120,97	18,87	20,22
8	0,37	119,81	18,68	21,4
12	0,29	118,49	18,46	20,22
24	0,28	112,94	17,5	20,22

A Figura 3 mostra 3 segundos de EEG espontâneo para um dos voluntários, filtrado nas diferentes bandas de frequência.

O PEVt por estimulação visual a 1 Hz é mostrado na Figura 4 para os 5 indivíduos juntamente com o sinal de *trigger*, que indica a existência de estímulo. Pode-se observar picos consistentes em torno de 100 ms e

200 ms e vales por volta de 150 ms com certa variabilidade entre indivíduos. Além disso, vê-se potenciais de longa latência de maior amplitude com picos em torno de 600 ms e 700 ms e vales em torno de 650 ms pós-estímulo.

O RITMUS também foi capaz de captar o PEVp ao se estimular os voluntários a 10 Hz como se pode observar por meio da DFT de tais sinais mostrada na Figura 5. Nota-se também picos nas frequências múltiplas da frequência de estimulação.

Discussão

A construção de um sistema de aquisição de sinais biomédicos é objeto de estudo de longa data. No entanto, a comercialização de CIs específicos para sinais biomédicos vem tornando o processo de desenvolvimento mais rápido e barato [9].

O RITMUS, baseado no ADS1299, apresenta 8 canais com IRN de $0,28 \mu V_{RMS}$, NFB > 20 bits e ER > 23 bits para $G = 24$ V/V, F_s de 1 kHz e resolução de 300 nV. Para efeito de comparação, o sistema comercial *V-AMP*[®] (*Brain Products*) apresenta versões de 8 e 16 canais com IRN $< 1 \mu V$, resolução de 48,9 nV fornecida por um ADC de 24 bits e $F_s = 2$ kHz. Embora o sistema comercial apresente características superiores ao desenvolvido, ambos atendem às recomendações da IFCN [5]. Além disso, cabe salientar que o sistema pode ser utilizado no desenvolvimento de interfaces cérebro-máquina [10] por ser portátil e apresentar especificações técnicas superiores a outros amplamente utilizados, tal como o *Emotiv Epoc*[®] (<http://emotiv.com/>), o qual apresenta resolução de $0,51 \mu V$, $F_s = 128$ Hz com um ADC de 16 bits.

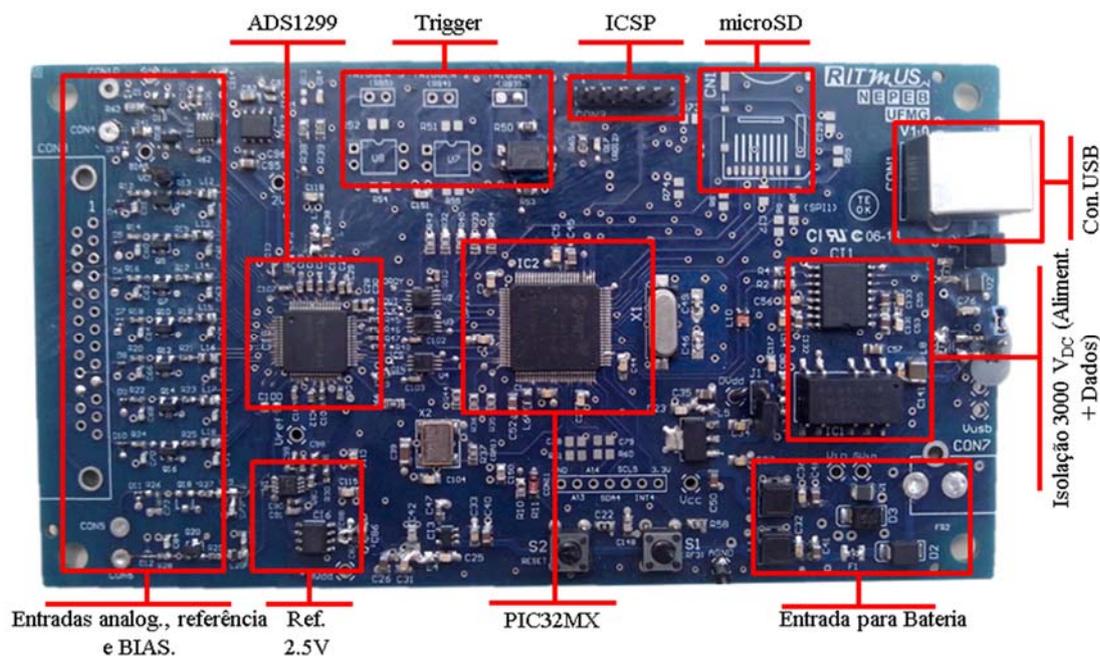


Figura 2: Placa RITMUS HAQ.

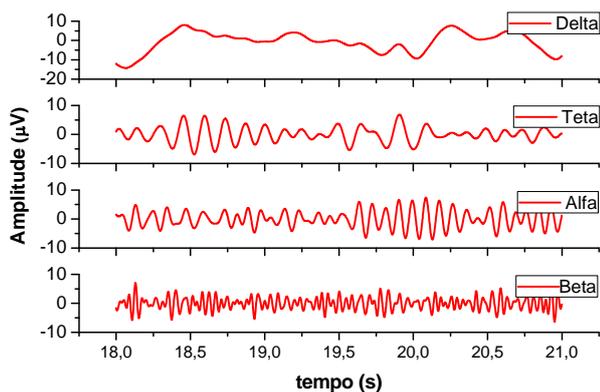


Figura 3: Bandas do EEG espontâneo.

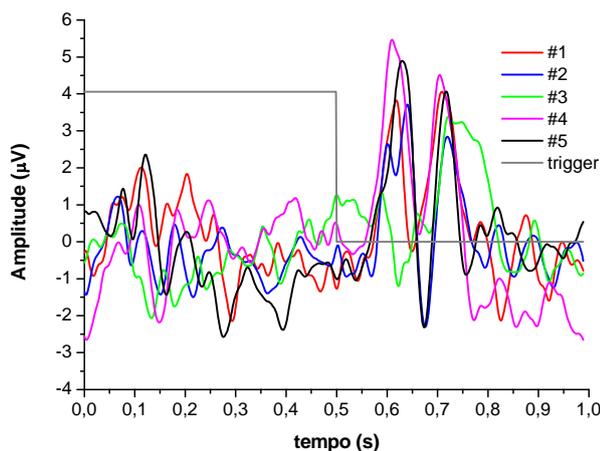


Figura 4: PEVt (180 épocas) por estimulação a 1 Hz.

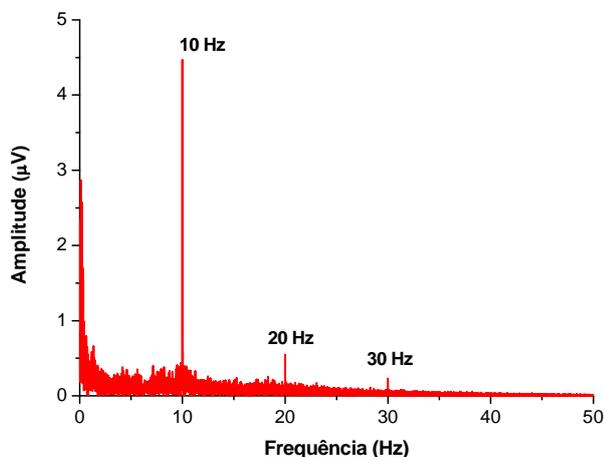


Figura 5: Espectro de Magnitude da derivação Oz durante estimulação em 10 Hz.

Com base nos testes de validação realizados, o RITMUS mostrou-se versátil, sendo capaz de coletar sinais de EEG espontâneo e durante estimulação visual (PEVt e PEVp).

Conclusão

O RITMUS foi capaz de condicionar, digitalizar e enviar os dados de sinais biomédicos para o computador para posterior processamento *off-line*. Atingiu-se a taxa de amostragem máxima de 1 kHz por canal do ADS1299, com os oito canais em operação, utilizando-

se interface de comunicação USB no protocolo HID, uma vantagem do sistema por utilizar *driver* nativo do *Windows*. O sistema é portátil, com dimensões de 150,9 x 82,20 mm, podendo ser alimentado pela USB, apresentando IRN de 0,28 μVRMS , para $F_s = 1 \text{ kHz}$ e ganho 24 V/V e resolução de 0,3 $\mu\text{V/bit}$. Na fase de prototipagem, mesmo considerando a baixa quantidade de componentes comprados, estimou-se um custo de cerca de R\$ 1250,00 para a produção de uma placa HAQ. Assim, o RITMUS atende às propostas iniciais de desempenho e custo. Ademais, estão sendo estudadas melhorias quanto ao *hardware*, *firmware* e *software* para reduzir o nível de ruído e aumentar a resolução e a taxa de transmissão de dados em uma futura versão.

Agradecimentos

Agradecemos à FAPEMIG, CAPES, CNPq e FINEP pelo auxílio financeiro.

Referências

- [1] Rangayyan RM, Introduction to Biomedical Signals. Biomedical signal: a Case- Study. 1ª ed. New York: John Wiley & Sons, Inc; 2002.
- [2] Niedermeyer E, Silva FL. Electroencephalography: Basic Principles Clinical Applications and Related Fields. 5ª ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
- [3] Soundarapandian K, Beraducci M. Analog Front-End Design for ECG Systems Using Delta-Sigma ADCs. Texas Instr. 2010 Apr. Available from: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa160a/sbaa160a.pdf>
- [4] Neuman MR. Biopotential Amplifiers. Em: J.G. Webster, editor. Medical Instrumentation. New York: John Wiley and Sons; 2009. p. 241–292.
- [5] Nuwer MR *et al.* IFCN standards for digital recording of clinical EEG. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. 1998; 106(3):259–61.
- [6] Texas Instruments. SBAS499A - Low-Noise, 8-Channel, 24-Bit Analog Front-End for Biopotential Measurements (Rev. A). 2012 Aug. Available from: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1299.pdf>
- [7] Baker B. A Glossary of Analog-to-Digital Specifications and Performance Characteristics. Texas Instr. 2011 Oct. Available from: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa147b/sbaa147b.pdf>
- [8] Pinto MADS *et al.* A low-cost, portable, micro-controlled device for multi-channel LED visual stimulation. Journal Neuroscience Methods. 2011; 197(1):82–91.
- [9] Balotin AF *et al.* Sistema para análise da repolarização cardíaca: eletrocardiograma de 12 canais baseado no *Front-End* ADS1298. In: Anais do XXIII Congresso Brasileiro Engenharia Biomédica; 2012 Oct 1-5; Porto de Galinhas, Brasil. 2012. p. 1517-21.
- [10] Tannus AM *et al.* Objective detection of Steady State Visual Evoked Responses for different lighting conditions. Journal of Physics: Conference Series, v. 477, p. 012028.