

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA COMPUTAÇÃO

**IMPLEMENTAÇÃO DE PROTOCOLO SERIAL BIDIRECIONAL UTILIZANDO
CANAL COMPARTILHADO**

Alexandre Zambotti Rodrigues

Itajubá

2018

Alexandre Zambotti Rodrigues

**IMPLEMENTAÇÃO DE PROTOCOLO SERIAL BIDIRECIONAL UTILIZANDO
CANAL COMPARTILHADO**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Ciência e Tecnologia da Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Tecnologia da Computação.

Área de concentração: Sistemas de Computação

Orientador: Prof. Dr. Tales Cleber Pimenta

Itajubá

2018

Alexandre Zambotti Rodrigues

**IMPLEMENTAÇÃO DE PROTOCOLO SERIAL BIDIRECIONAL UTILIZANDO
CANAL COMPARTILHADO**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Ciência e Tecnologia da Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Tecnologia da Computação.

Área de concentração: Sistemas de Computação

Orientador: Prof. Dr. Tales Cleber Pimenta

Banca examinadora

Orientador: Prof. Dr. Tales Cleber Pimenta

Itajubá, 30 de setembro de 2018.

Aos meus pais que sempre me apoiaram nas minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do curso, especialmente ao Professor Dr. Tales Cleber Pimenta por toda a atenção dada a mim, pelas orientações e otimismo com que encara os problemas. Ao Professor Guilherme Bastos pelas ajudas no decorrer do programa e ao Professor Rodrigo Almeida por algumas ajudas iniciais com a pesquisa. Por fim, agradeço à equipe da UNIFEI e a todos os colegas e amigos que de forma direta ou indireta contribuíram com este trabalho.

RESUMO

Na área da saúde, são utilizados diversos Equipamentos Eletro-Médico, os denominados EEM e alguns desses equipamentos por funcionarem por meio de sinais elétricos demandam a redução da interferência para que se obtenha diagnósticos mais precisos.

Com o objetivo de levar uma maior confiabilidade para o campo da eletroencefalografia, existe um projeto de um sistema digital desenvolvimento no Grupo de Microeletrônica da Universidade Federal de Itajubá. Esse sistema visa converter todos os sinais elétricos analógicos coletados para exames de eletroencefalografia em sinais digitais antes de serem transmitidos para o computador. Para tornar esse sistema digital seja possível, é necessário que sejam desenvolvidos vários sistemas menores para realização do projeto.

O sistema descrito aqui tem foco na orquestração da comunicação entre vários eletrodos e uma central de comunicação através de um protocolo serial de canal compartilhado. O protocolo é abstraído em duas camadas independentes (física e lógica), possibilitando o intercâmbio de camada física flexibilizando a implementação da comunicação. O protocolo lógico gerencia os eletrodos utilizando um canal compartilhado para acesso simultâneo em todos os eletrodos.

Palavras-chave: Verilog, UART, EEG, protocolo serial, FPGA

ABSTRACT

In the health area, several Electro-Medical Equipment are used and some of these devices, because they work in an environment with many electrical signals, require the reduction of interference in order to obtain diagnoses that are more accurate.

With the aim of bringing greater reliability to the field of electroencephalography, there is a project of a digital system developed in the Group of Microelectronics of the Federal University of Itajubá. This system focusses to convert all collected analog electrical signals to electroencephalography exams into digital signals before transmission to the computer. In order to make this digital system possible, it is necessary to develop several smaller systems to carry out the project.

The present work focuses on the orchestration of the communication between several electrodes and a communication center through a shared channel serial protocol. The protocol is abstracted into two independent layers (physical and logical), allowing physical layer interchange making communication implementation more flexible. The logic protocol manages the electrodes using a shared channel for simultaneous access to all electrodes.

Keywords: Verilog, UART, EEG, serial protocol, FPGA

.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição de eletrodos 10-20.	11
Figura 2 - EMI (do inglês electromagnetic interference -Interferência eletromagnética) e suas possíveis fontes.	13
Figura 3 - Microchip de tratamento de dados.	16
Figura 4 - Protocolo serial síncrono.	17
Figura 5 - Exemplo de comunicação utilizando o protocolo UART.	19
Figura 6 - Exemplo de comunicação entre central e eletrodo digital gerenciado pelo protocolo.	20
Figura 7 - Resposta típica para operação de simples precisão.	21
Figura 8 - Rotina de registro do microchip.	22
Figura 9 – Os dois eletrodos detectam colisão no registro do eletrodo.	24
Figura 10 - Um dos eletrodos detecta colisão de registro.	25
Figura 11 - Diagrama de configuração dos parâmetros de conversão.	26
Figura 12 - Gravação do número serial.	28
Figura 13 - Operação de eco.	29
Figura 14 - Leitura de parâmetro de configuração.	30
Figura 15 – Operação de leitura do serial do eletrodo.	31
Figura 16 - Operação de leitura de dado EEG coletado.	32
Figura 17 - Operação de registro.	34
Figura 18 - Simulação do envio de configuração de parâmetro.	36
Figura 19 - Operação de ler parâmetro de configuração.	38
Figura 20 - Simulação operação eco.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação frequências das ondas cerebrais (2).....	10
Tabela 2 - Fontes de RF e frequências utilizadas.	14
Tabela 3 Códigos das operações do protocolo.	19

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 ELETROENCEFALOGRAMA	10
1.2 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	11
1.2.1 Interferências.....	12
1.3 PROJETO SISTEMA EEG DIGITAL	15
1.3.1 Capacete	15
1.3.2 Microchip.....	16
1.3.3 Central de comunicação	16
1.3.4 Protocolo serial.....	17
1.4 OBJETIVO.....	18
2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO.....	18
2.1 CARACTERIZAÇÃO DE UM PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO	18
2.2 PROTOCOLO SERIAL PARA EEG	18
2.2.1 Camada Física.....	19
2.2.2 Camada Lógica.....	19
2.2.3 Operações.....	20
2.2.3.1 Operação de Registro	22
2.2.3.3 Operação Configurar Amplificador, Ganho ou Filtro	26
2.2.3.4 Operação Configurar Serial.....	27
2.2.3.5 Operação Eco	28
2.2.3.6 Operação Ler Configuração Amplificador, Ganho ou Filtro	29
2.2.3.7 Operação Ler Serial.....	30
2.2.3.8 Operação Ler Dado EEG.....	31
3 RESULTADOS OBTIDOS.....	33
3.1 IMPLEMENTAÇÃO.....	33
3.2 RESULTADOS.....	33
3.2.1 Operação Registro	33
3.2.2 Operação Envia Configuração Amplificador, Ganho ou Filtro	35
3.2.3 Operação Ler Configuração Amplificador, Ganho ou Filtro.....	37
3.2.4 Operação Gravar Serial	39
3.2.5 Operação Eco	39
3.2.6 Operação Ler Serial	41
3.2.7 Operação Ler Dado EEG	41
4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
Anexos.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Eletroencefalograma

Para que ocorra o diagnóstico de sintomas são necessários a utilização de alguns testes e exames para determinação da causa sintomática. Atualmente, são utilizados diversos equipamentos eletrônicos que auxiliam no procedimento de diagnosticar a causa raiz dos sintomas. Esses equipamentos são normalmente chamados de Equipamentos Eletro-Médicos (EEM).

Um desses equipamentos utilizados para diagnósticos é o Eletroencefalograma (abreviado no meio médico por EEG). Sua criação ocorreu em 1929 pelo psiquiatra Hans Berger. Em sua pesquisa, Hans Berger descobriu que o cérebro gera uma atividade elétrica que pode ser registrada, essa atividade elétrica é resultado da troca iônica entre o meio intracelular e o extracelular [1]. Os sinais obtidos podem ser classificados de acordo com a frequência, como indicado na Tabela 1.

	Maio ou igual que [Hz]	Menor que [Hz]
Delta	-	4
Theta	4	8
Alpha	8	14
Beta	14 a 30 Hz	30
Gamma	30	100

Tabela 1- Classificação frequências das ondas cerebrais (2).

O Eletroencefalograma capta as atividades cerebrais do paciente através de sensores (eletrodos), normalmente localizados no couro cabeludo. Esses eletrodos captam sinais entre 10 μV a 100 μV e enviam, por meio de cabos, aos amplificadores de tensão. Os valores na saída dos amplificadores aproximam-se de 1500 μV .

Além do mais, sabe-se que as características desses sinais gerados pelo cérebro são afetadas por diversos fatores, tais como nível de consciência, distúrbios psíquicos, nível de atenção e até mesmo condições fisiológicas (como privação de sono).

1.2 Aquisição de Dados

Para obtenção de sinais cerebrais, duas formas são mais utilizadas. A primeira é o Sensor Superficial: este é mais utilizado por ser um método não invasivo (eletroencefalografia). O segundo é o Sensor Intracraniano: que é menos utilizado por ser um procedimento invasivo e delicado (eletrocorticografia).

O método utilizado nesse projeto de desenvolvimento de um sistema de aquisição de sinais é o Eletroencefalograma. Nele são posicionados sensores chamados eletrodos. Existem diversos padrões de distribuição, sendo um dos modelos utilizados o 10-20, mostrado na Figura 1.

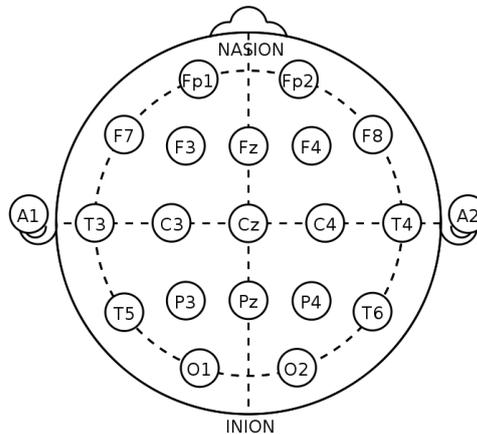


Figura 1- Distribuição de eletrodos 10-20.

Conforme o demonstrado na Figura 1, a disposição dos eletrodos abarca todas as áreas superficiais do cérebro. Dessa forma, consegue-se sinais das diversas regiões do córtex cerebral. A nomenclatura dos espaçamentos (Distribuição 10-20) advém dos intervalos de distância 10% e 20% entre o Nasion (ponto entre os olhos) e o Ínion (ponto na nuca).

Quanto à disposição dos Eletrodos, os alocados do lado esquerdo são indicados com numeração ímpar e os colocados do lado direito são sinalizados com numeração par. Por fim, os inseridos sobre a linha média são indicados pela letra z.

A transmissão dos dados dos Eletrodos para os Amplificadores pode ser feita por fios convencionais. Entretanto, apesar do uso muito comum, é extremamente propenso a ruídos.

Para a diminuição da suscetibilidade as interferências apresentam-se como opção a utilização do cabo coaxial. Esse cabo fornece a proteção quando a indução, pois possui uma malha metálica que reveste o condutor interno e, dessa forma, o mantém isolado. Todavia, nos casos das frequências elevadas, a condução é superficial, o que compromete a eficiência da transmissão de dados.

Outra alternativa é o cabo de par trançado, esse fornece proteção devido ao cancelamento mútuo que realiza os pares de fios trançados. Essa alternativa é a de menor custo por comprimento, entretanto, também é apresenta suscetibilidade as interferências.

1.2.1 Interferências

Geralmente os equipamentos eletroeletrônicos provocam Interferências Eletromagnéticas (abreviado por IEM) [2] e, também, estão sujeitos a essas interferências [3]. Devido aos níveis de tensão muito baixos existem várias fontes de interferências. Elas podem ser de dois tipos: irradiadas e conduzidas.

A primeira são as interferências eletromagnéticas irradiadas por meio do espaço que atingem o equipamento por falta de blindagem e alteram os dados coletados. Portanto, o que de fato ocorre nesse tipo de interferência é que as ondas eletromagnéticas induzem sinal em um fio sem blindagem. Citam-se como exemplos dessa interferência os sinais de Bluetooth, WiFi e outros radiocomunicadores.

Já as conduzidas são interferências eletromagnéticas conduzidas pela rede elétrica ao equipamento, acarretando também a alteração dos dados coletados. Essas interferências podem advir de fontes internas ou externas de equipamentos ligados a rede elétrica, tais como motores elétricos e fontes de alimentação.

A interferência eletromagnética consiste na grande dificuldade para a aquisição de sinais confiáveis no procedimento de obtenção dos sinais de EEG. A IEM age nos Eletrodos e, também, nos condutores que encaminham os sinais aos amplificadores. As IEM podem causar erro no funcionamento do equipamento, fazendo com que o cabo de comunicação de dados funcione como uma antena para sinais na mesma frequência dos sinais captados não permitindo confiabilidade nos dados obtidos pelo EEG.

A Figura 2 ilustra exemplos de possíveis interferências eletromagnéticas com suas fontes.

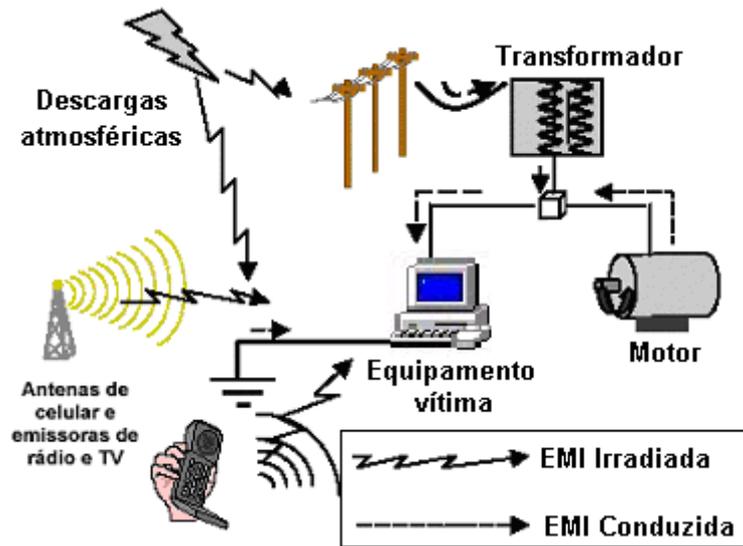


Figura 2 - EMI (do inglês *electromagnetic interference* -Interferência eletromagnética) e suas possíveis fontes.

Os dispositivos populares como telefones celulares e dispositivos de “internet das coisas” (IoT – Internet of Things) geram sinais na faixa de MHz e alguns sinais na faixa de GHz [4].

Como os sinais trabalham numa mesma faixa de frequência, podem ser induzidos erros nos aparelhos de EEG.

Além desses dispositivos existem ainda, em hospitais e clínicas, dispositivos médicos que aumentam a perturbação na rede, pois possuem motores elétricos ou vários componentes indutores que fazem com que a rede torne uma fonte de interferência para equipamentos que trabalham com medida na ordem de μV . Como exemplo, citam-se o oxímetro de pulso, os estimuladores elétricos neuromusculares, os incubadores neonatal, entre outros. Na Tabela 2 são apresentados outros equipamentos e suas faixas de frequências de operação.

Categoria	Tipo	Frequência de operação
Equipamentos médicos (Fontes não intencionais)	Diametria	27 MHz – 500 MHz
	Bisturi Elétrico	30 MHz – 100 MHz
	Ressonância Magnética	60 MHz
	Laser	27 MHz (Variável)
Transmissores de rádio (Fontes intencionais)	Televisão	54 MHz – 800 MHz
	Radar	1 GHz – 100 MHz
	Rádio AM	550 KHz – 1,6 MHz
	Rádio FM	88 MHz – 108 MHz
	Rádios móveis (polícia, ambulância, etc.)	450 MHz – 500 MHz 27 MHz – 500MHz
	Telefonia celular*	850 MHz e 900 MHz
	Telefone sem fio	900 MHz e 2,4GHz
Outros	Máquina de solda	2MHz – 20 MHz
	Aquecedores (RF)	5 MHz, 13 MHz, 27 MHz ou 40 MHz

Tabela 2 - Fontes de RF e frequências utilizadas.

Alguns equipamentos de telefonia celular operam nas frequências de 700 MHz, 1700 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz e 2500 MHz [4]. Existe uma possibilidade de que novos aparelhos utilizem ainda frequências maiores, em 5GHz, em complemento a bandas já utilizadas atualmente, para aumento da taxa de dados, tecnologia conhecida como LAA [5].

Além de interferências externas ao sistema, pela quantidade de canais na coleta e proximidade entre eles, existe a possibilidade de interferência entre canais. Nessa hipótese, um sinal em alta frequência pode produzir interferência no canal através de ondas harmônicas na mesma frequência do sinal contido no canal EEG.

1.3 Projeto Sistema EEG Digital

Consoante ao explanado no presente trabalho, os sinais do EEG captados por meio dos sinais de Eletrodos são entre 10 e 100 μV . Dessa forma, com grande facilidade, as interferências podem atuar mascarando ou ocultando os sinais de EEG. O comprometimento das análises pode acarretar em um diagnóstico equivocado do estado clínico de um paciente.

Para minimizar as interferências no sinal está sendo desenvolvido um sistema de EEG digital. O sistema EEG digital está sendo desenvolvido pelo Grupo de Microeletrônica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). O novo aparelho terá alta imunidade às interferências eletromagnéticas em razão de que é projetado para que cada eletrodo de coleta possua um circuito de tratamento de dados (Amplificação/Filtragem/Digitalização).

Com o sinal sendo digitalizado sua sensibilidade às interferências eletromagnéticas se tornam menores, deixando o sistema mais confiável, pois um erro no diagnóstico (falso positivo ou falso negativo) são críticos nas situações de identificação de morte encefálica para remoção de órgãos.

Além da sensibilidade às interferências, outra dificuldade com os sistemas de EEG é o tempo requerido para posicionar corretamente os eletrodos sobre a cabeça do paciente. Esse conjunto de microchips e eletrodo serão instalados em um capacete que facilitará o tempo de preparação para o exame.

Além de possuir tratamento de dados para cada canal, será possível ajustar os parâmetros de ganho de amplificação e frequência de corte dos filtros. Dessa forma, será possível realizar ajustes finos de acordo com as características e necessidades para realização do exame.

Consoante ao mencionado, os eletrodos serão colocados em um capacete flexível contendo todos os eletrodos e microchips de tratamento de dados previamente posicionados. Ademais, o sistema contará com uma central de comunicação que será responsável por coletar os dados dos sensores.

1.3.1 Capacete

O papel do capacete será de suporte e de manutenção da posição correta dos eletrodos conforme a disposição 10-20, demonstrada na Figura 1.

Com a utilização do capacete, ao colocá-lo o paciente já está apto para a iniciar o procedimento de exame. Dessa forma, será reduzido o tempo que os profissionais da área de saúde perdem ajustando manualmente a posição acertada dos eletrodos.

Ademais, o capacete será utilizado como base para: encaixe das baterias do circuito de alimentação; central de comunicação e transmissão de dados; conexões elétricas entre os componentes. Por fim, frisa-se que o capacete realizará a comunicação com o computador por meio da rede de transmissão sem fio, mantendo o paciente isolado da rede elétrica.

1.3.2 Microchip

Desenvolvido no Grupo de Microeletrônica, o circuito integrado será posicionado diretamente sobre eletrodo. O circuito possui a função de receber o dado do eletrodo, amplificar, filtrar frequências não desejadas e digitalizar o sinal antes de sua transmissão, como indicado na Figura 3 - *Microchip de tratamento de dados*

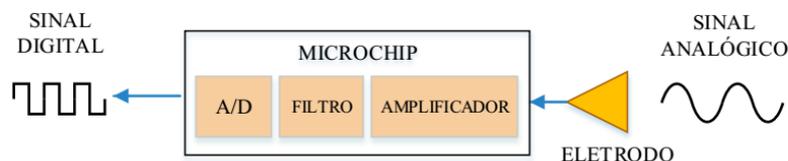


Figura 3 - Microchip de tratamento de dados.

Devido ao tratamento dos dados ser próximo a fonte, as interferências são reduzidas. Atualmente os blocos de Amplificação e de Conversão Analógica Digital já foram desenvolvidos por Dutra[6] e Colleta [7]. Já o Circuito de Filtro ainda está em desenvolvimento.

1.3.3 Central de comunicação

Responsável por gerenciar os microchips e o fluxo dados coletados, a comunicação entre central e computador é feita através de um protocolo de comunicação bidirecional.

Entre a central e o eletrodo será desenvolvido um protocolo para padronizar a troca de dados que, em um momento irão para os eletrodos para configuração dos parâmetros de operação e, em outro momento, virão para central com sinais obtidos do paciente.

1.3.4 Protocolo serial

Como no sistema de EEG existem vários conjuntos de eletrodos/microchips para transmitir dados, torna-se necessária a criação de um protocolo para transmissão da informação, objetivando a redução do número de conexões e da interferência eletromagnética. Essa redução de conexões facilita a operabilidade do equipamento simplificando a quantidade de ligações necessárias para o funcionamento do sistema: um único par de fios são necessários para o funcionamento do sistema, podendo ser ligado cascadeando a entrada de um eletrodo em outro não aumentando a complexidade do sistema com o aumento de eletrodos.

Para que haja a comunicação bidirecional utilizando um número de conexões reduzidas uma opção são os protocolos seriais. A Figura 4 ilustra as ligações de um protocolo serial.

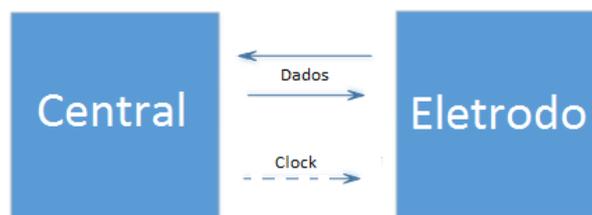


Figura 4 - Protocolo serial síncrono.

Deve existir uma relação de mestre/escravo entre esses componentes para facilitar o gerenciamento da comunicação, reduzindo o tráfego nos canais de comunicação para apenas respostas de requisições da central.

1.4 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um protocolo de comunicação serial assíncrono bidirecional para gerenciar as conexões entre a central e vários sensores de coleta e tratamento de dados.

2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

2.1 Caracterização de um Protocolo de Comunicação

Consoante ao lecionado por Rodríguez-Aragón[8], um protocolo de comunicação é caracterizado como um conjunto de regras que possibilitam a troca de mensagens entre duas ou mais entidades em um determinado canal. São definidas sintaxes, semânticas e sincronização para a troca de informações e opcionalmente pode-se implementar um código para correção de erros.

Pode-se dizer que qualquer conjunto de regras para troca de mensagens que consiga a troca de informações é caracterizado como protocolo de comunicação. Como exemplo atual de protocolo de comunicação narra-se que durante um experimento da empresa Facebook, para melhorar negociações utilizando inteligência artificial, surgiu um novo padrão de comunicação entre as partes que facilitava as negociações [9]. Esse novo padrão de comunicação estava se tornando diferente do padrão de comunicação humano, mas ainda assim era um padrão de troca de mensagens efetivo, com um conjunto de regras próprio que valia entre as partes. Esse novo padrão de comunicação é um protocolo.

2.2 Protocolo Serial para EEG

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é apresentar a implementação de um protocolo de comunicação serial bidirecional assíncrono. O desenvolvimento foi dividido em duas partes estruturais: a camada física (elétrica), responsável pelo transporte físico dos dados e a camada lógica (programável), responsável pelo gerenciamento dos dados trocados pela camada física.

2.2.1 Camada Física

Para a camada de transporte foi utilizado como base o protocolo UART. O princípio do protocolo foi modificado para atender os requisitos do projeto. Adicionou-se um BIT de verificação de paridade.

Por ser um protocolo assíncrono e bidirecional, pode-se ter a troca de mensagens sem a necessidade de um sinal de sincronia entre emissor e receptor.

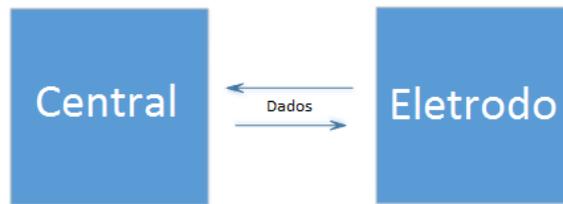


Figura 5 - Exemplo de comunicação utilizando o protocolo UART

Além das linhas de dados, existem condutores para alimentação do sistema na camada física. Nelas são implementados a serialização dos dados e cálculo do BIT de paridade para inserção na mensagem.

2.2.2 Camada Lógica

Todo o gerenciamento da camada física é realizado pela camada lógica. A operação da camada lógica é dividida em estados, onde cada estado é responsável por uma tarefa. Como exemplo tem-se registro de novo microchip, envio de parâmetros de configuração do microchip e requisito de dados coletados.

Tabela 3 Códigos das operações do protocolo.

B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0	Operação	Decimal
0	0	0	0	0	0	0	1	Grava Amp	1
0	0	0	0	0	0	1	0	Grava Filtro	2
0	0	0	0	0	0	1	1	Grava Serial	3
0	0	0	0	0	1	0	0	Grava Conversor	4
0	0	0	0	0	1	0	1	Recebido	5

0	0	0	0	0	1	1	0	Eco	6
0	0	0	0	1	1	1	1	Ler Conversor	15
0	0	0	0	1	1	1	0	Ler Amp	14
0	0	0	0	1	1	0	1	Ler Filtro	13
0	0	0	0	1	1	0	0	Ler Serial	12
0	0	0	0	1	0	1	1	Continue	11
0	0	0	0	1	0	1	0	Ler EEG	10
0	0	0	0	0	1	1	1	Início	7
0	0	0	0	1	0	0	0	Início longo	8
1	1	1	1	1	1	1	1	Erro	255

Na Tabela 3 são apresentadas algumas dessas operações e os respectivos códigos binários dos estados. Há a possibilidade de ampliação das funcionalidades, pois existem valores de códigos binários não utilizados, o que permite uma flexibilização e expansão das funcionalidades do sistema. O princípio de funcionamento de uma operação entre central e eletrodo é ilustrado na Figura 6.

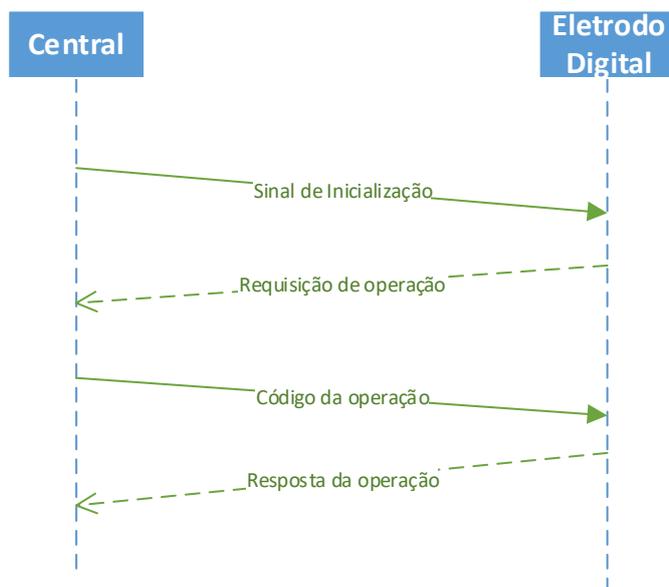


Figura 6 - Exemplo de comunicação entre central e eletrodo digital gerenciado pelo protocolo

2.2.3 Operações

Foram configuradas operações básicas para a troca de informações:

1. Registro;

2. Configurar amplificador, filtro e conversor;
3. Eco;
4. Gravar serial;
5. Ler configurações do amplificador, filtro e conversor;
6. Ler serial;
7. Ler EEG.

Cada uma dessas operações efetua uma tarefa específica. Na hipótese de erro faz-se a repetição da mensagem e, caso o erro se repita, acontece um retorno do estado de espera. Este erro é caracterizado pela mensagem de conteúdo 0xFF.

Com o sistema evoluindo para agregar as funcionalidades esperadas dele, a troca de mensagens esperadas entre central e eletrodo passam a ter outra base para funcionamento, como ilustrado na Figura 7, agregando código de endereçamento e um sinal de inicialização para separá-lo da operação de registro no sistema (rotina inicial do sistema) e poder implementar funções de gerenciamento de energia no eletrodo.

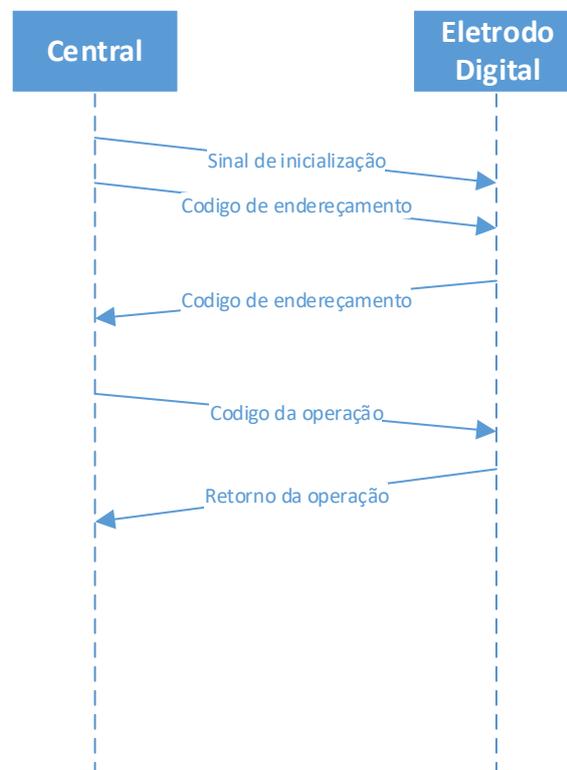


Figura 7 - Resposta típica para operação de simples precisão.

2.2.3.1 Operação de Registro

Essa operação registra o conjunto coletor (Eletrodo e Microchip) na central de comunicação. Para fazer isso, é necessário que cada Microchip envie seu serial (único de 32 bits). Como consequência, o Microchip recebe um endereço para comunicação (código de endereçamento) único no sistema (8 bits).

O funcionamento dessa operação é ilustrado pela Figura 8. A operação consiste em envio de uma inicialização longa que o eletrodo identifica como pedido para envio de serial para registro. Para envio do serial, ele é dividido em 4 pacotes e espera-se confirmação de cada pacote enviado para envio do seguinte. Ao final do envio dos pacotes, a central atribui a o eletrodo um código para endereçamento único no sistema.

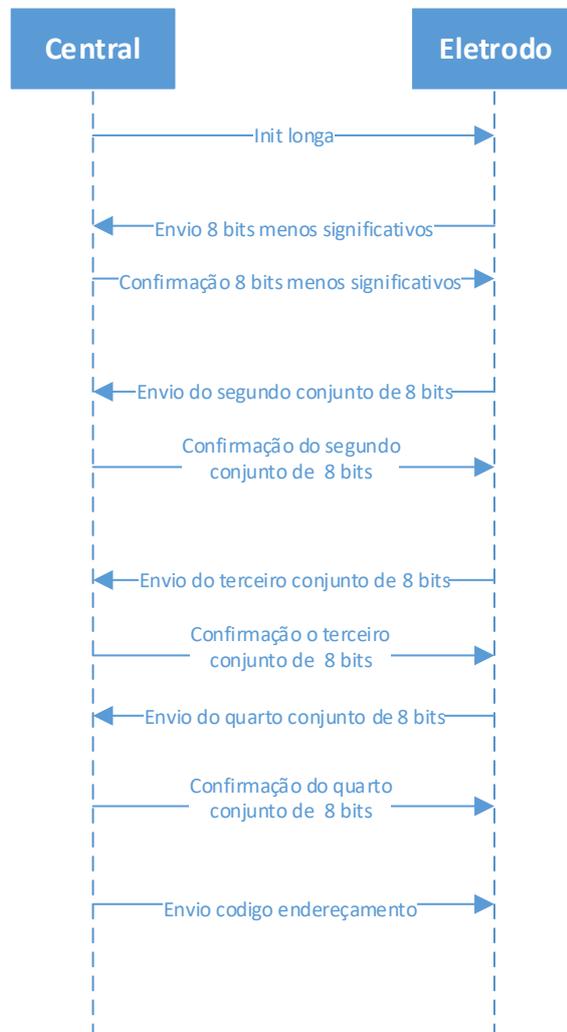


Figura 8 - Rotina de registro do microchip.

Com uma nova inicialização do sistema é necessário que aconteça um novo registro de todos os sensores.

2.2.3.1.1 Registro Simultâneo de mais de um Eletrodo Digital.

Na operação de registro do eletrodo, mais de um eletrodo pode responder ao mesmo tempo. Por conta disso, deve-se tratar esse caso de colisão na operação de registro. Dois exemplos de protocolo com tratamento de colisão são os protocolos CSMA/CD [10] e CSMA/CA [11]. No primeiro caso, é identificado a colisão no envio. No segundo caso, é enviado anteriormente um sinal de controle antes de se enviar a mensagem para evitar a colisão.

Para o protocolo desenvolvido é utilizado um padrão semelhante ao CSMA/CD. De acordo com as respostas da central, o eletrodo identifica uma colisão e aguarda um novo momento para registro. A resposta esperada é o valor de bytes enviado, caso o valor enviado seja diferente do recebido, a colisão é identificada. Um exemplo de colisão de registro é mostrado pela Figura 9.

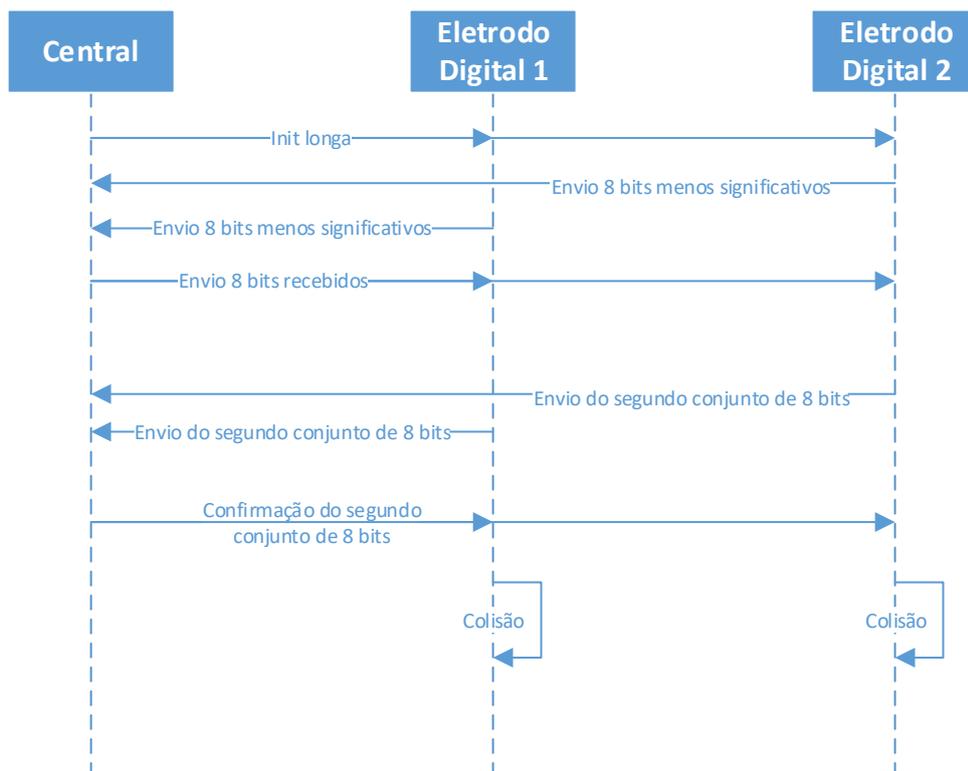


Figura 9 – Os dois eletrodos detectam colisão no registro do eletrodo.

Caso a colisão seja identificada, é realizado um período de espera para aguardar um novo registro. Para transmitir a informação de colisão, os eletrodos param de responder a central, esperando uma nova chamada de registro.

No caso de registro, podem ocorrer diversas possibilidades na colisão. Os estudos realizados para o tratamento dessas colisões, são divididos nos seguintes grupos:

1. Colisão de Eletrodo com dois dos valores (byte parcial de serial) enviados sejam iguais ao valor de resposta. Exemplo: Byte serial parcial 1 = 0b00000100, Byte serial parcial 2 = 0b00000100, Byte de resposta = 0b00000100;
2. Colisão de Eletrodos com um dos valores (Byte parcial de serial) enviados seja igual ao valor de resposta e outro não seja. Exemplo: Byte serial parcial 1 = 0b11110000, Byte serial parcial 2 = 0b11110001, Byte de resposta = 0b11110000;
3. Colisão de Eletrodo com nenhum dos valores (byte parcial de serial) enviados sejam iguais ao valor de resposta. Exemplo: Byte serial parcial 1 = 0b00010100, Byte serial parcial 2 = 0b11110101, Byte de resposta = 0b00010100.

Nos dois primeiros casos (Colisão de Eletrodo com dois dos valores e Colisão de Eletrodos com um dos valores) a operação de registro continua, pois, o padrão recebido é o padrão enviado. No caso da Colisão de Eletrodo com dois dos valores, a colisão não é identificada por esse byte parcial de serial e será identificada num próximo byte. Já na Colisão de Eletrodos com um dos valores, a colisão só é identificada por um dos elementos, permitindo que o outro elemento continue com a operação de registro. A detecção de colisão de registro por somente um dos eletrodos é ilustrado na Figura 10.

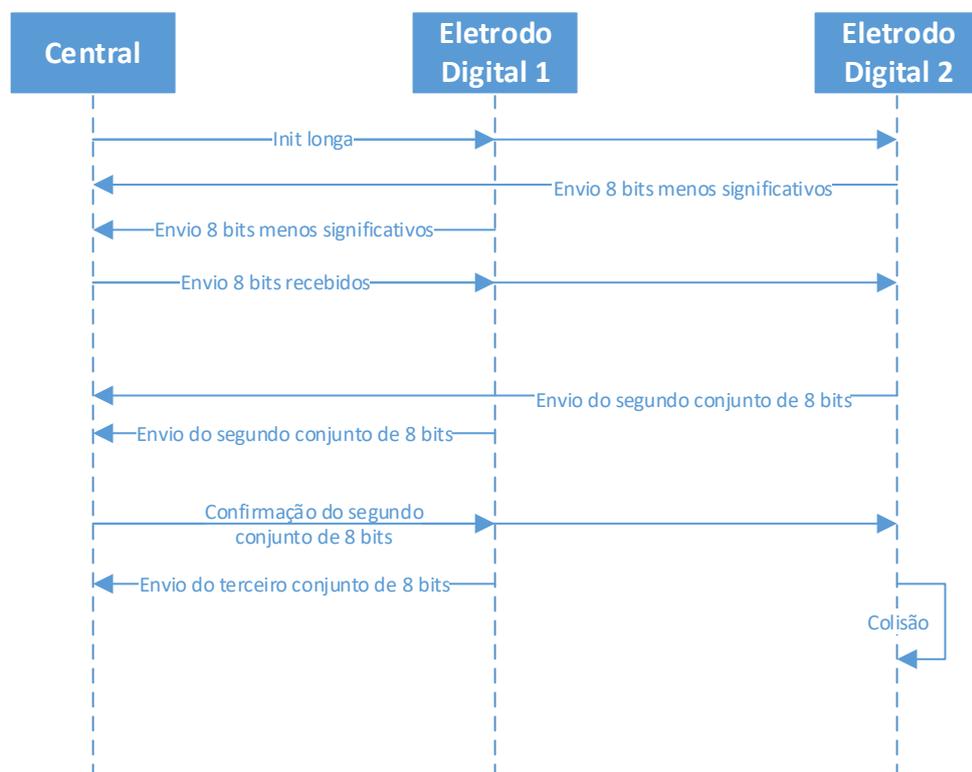


Figura 10 - Um dos eletrodos detecta colisão de registro.

No terceiro caso, Colisão de Eletrodo com nenhum dos valores, a colisão é identificada pelos dois eletrodos, pois eles não identificam o número enviado como deles. Com isso, o eletrodo realiza uma espera de tempo aleatória para aguardar por outro registro. Este exemplo está ilustrado no diagrama da Figura 9 – Os dois eletrodos detectam colisão no registro do eletrodo. A central identifica a colisão pela falta de resposta dos eletrodos.

2.2.3.3 Operação Configurar Amplificador, Ganho ou Filtro

Durante a operação do sistema, pode ser necessária uma nova configuração dos sistemas internos do microchip para melhorar a qualidade do dado coletado. Para que isso aconteça é preciso que a central consiga enviar um comando para o sensor desejado.

O envio desse comando ocorre com o encaminhamento do endereço de comunicação e o novo valor do parâmetro. Assim que a central recebe do computador qual microchip deve ser alterado e o seu novo valor, ele repassa essa configuração para o microchip desejado. Essa configuração pode ser realizada para qualquer um dos três valores de configuração. Cada uma dessas configurações possui um único código de operação. Apesar das similaridades, são operações diferentes e independentes.

As etapas para envio dessa nova configuração são ilustradas no diagrama da Figura 11.

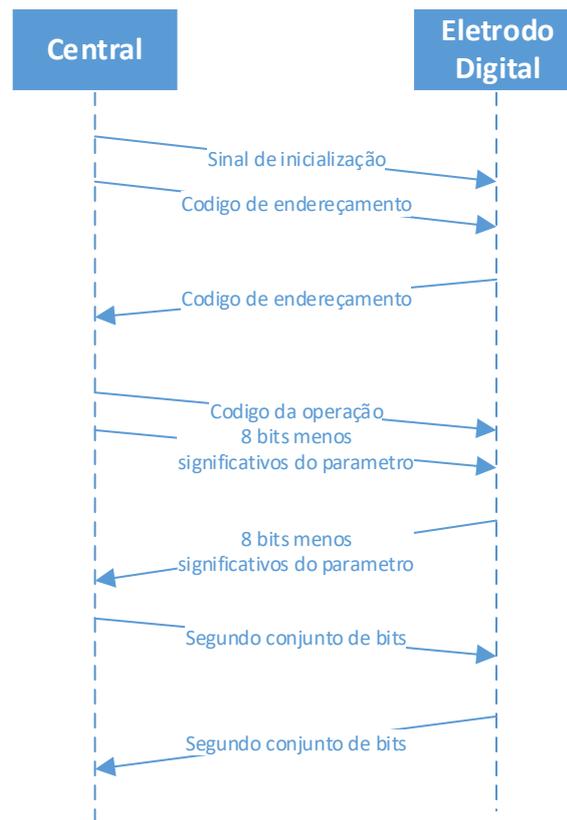


Figura 11 - Diagrama de configuração dos parâmetros de conversão.

Conforme o observado na Figura 11, a operação é iniciada com o envio do endereço de microchip desejado, seguido do código da operação. Esse código varia de acordo com o valor da configuração desejada, fazendo com que as operações sejam independentes, mas similares.

2.2.3.4 Operação Configurar Serial

Essa operação é semelhante a operação de configuração de amplificador e de filtro. A principal diferença com as outras duas operações é que a operação Configurar Serial é feita somente uma vez na linha de produção do microchip, sendo esse parâmetro um identificador único do microchip. O fluxo do processo é ilustrado pelo diagrama da Figura 12.

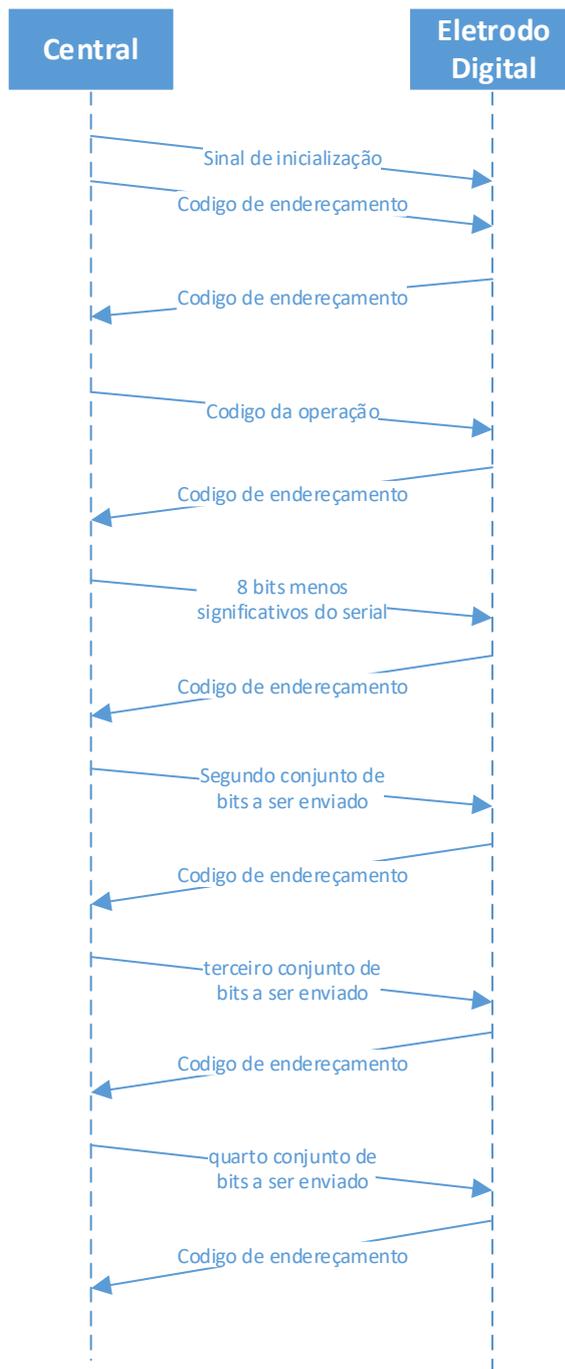


Figura 12 - Gravação do número serial.

2.2.3.5 Operação Eco

A operação de eco é uma função que permite testar o funcionamento do eletrodo e sua conexão com a central. Nessa operação é enviado a requisição para uma operação de eco (código de operação próprio) e, em seguida, uma mensagem aleatória de 1 byte. Em resposta,

o microchip reenvia o byte recebido, conseguindo, assim, que se teste o meio de comunicação e funcionamento do microchip. A operação segue o fluxo ilustrado na Figura 13 - *Operação de eco*

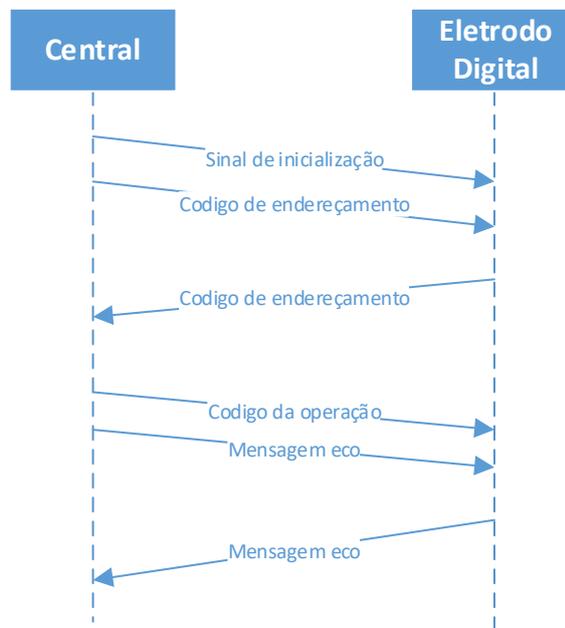


Figura 13 - Operação de eco.

2.2.3.6 Operação Ler Configuração Amplificador, Ganho ou Filtro

As operações que realizam a leitura dos valores de configuração do amplificador, ganho ou do filtro são funções diferentes e independentes.

O padrão das operações se inicia enviando o endereço do microchip a ser lido, seguido do código da operação. O microchip responde a requisição da central com o valor da configuração desejada. Como o valor é maior que 1 byte (tamanho da mensagem), o valor da configuração é dividido em várias mensagens, com confirmação de recebimento por parte da central de cada byte de mensagem. O diagrama que ilustra a operação é mostrado na Figura 14.

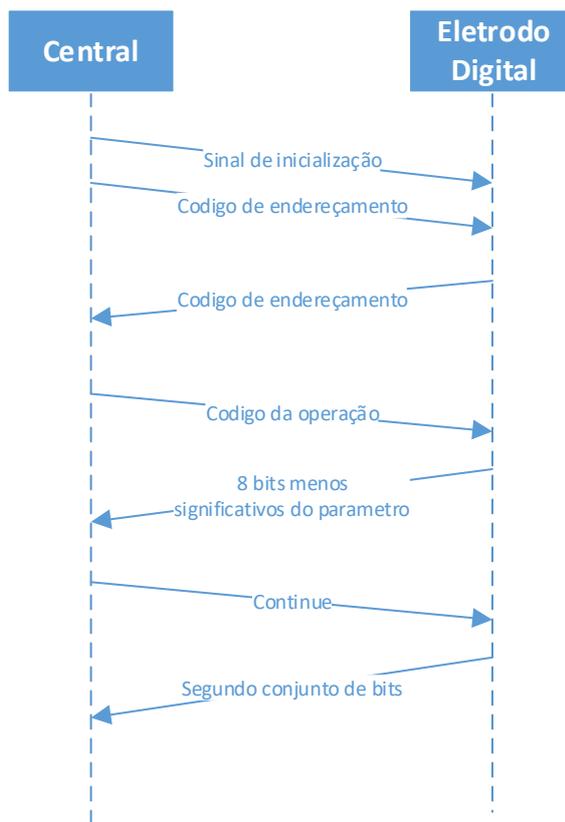


Figura 14 - Leitura de parâmetro de configuração.

2.2.3.7 Operação Ler Serial

A operação de leitura do valor serial é uma operação de configuração do microchip, assim como a configuração de escrita do serial.

Essa operação é executada como alternativa direta a operação de inicialização do sistema. A inicialização registra um número de endereçamento para o microchip no funcionamento, dentro de um sistema de leitura de dados EEG.

Já a operação de leitura de serial é uma operação simplificada para a leitura do número serial sem atribuição de nenhum endereçamento. O funcionamento dessa operação é similar a outras operações de leitura de registro no microchip onde é enviado um código de operação e, como resposta são enviados os primeiros bytes do registro serial do microchip. Conforme se demonstra no diagrama da Figura 15.

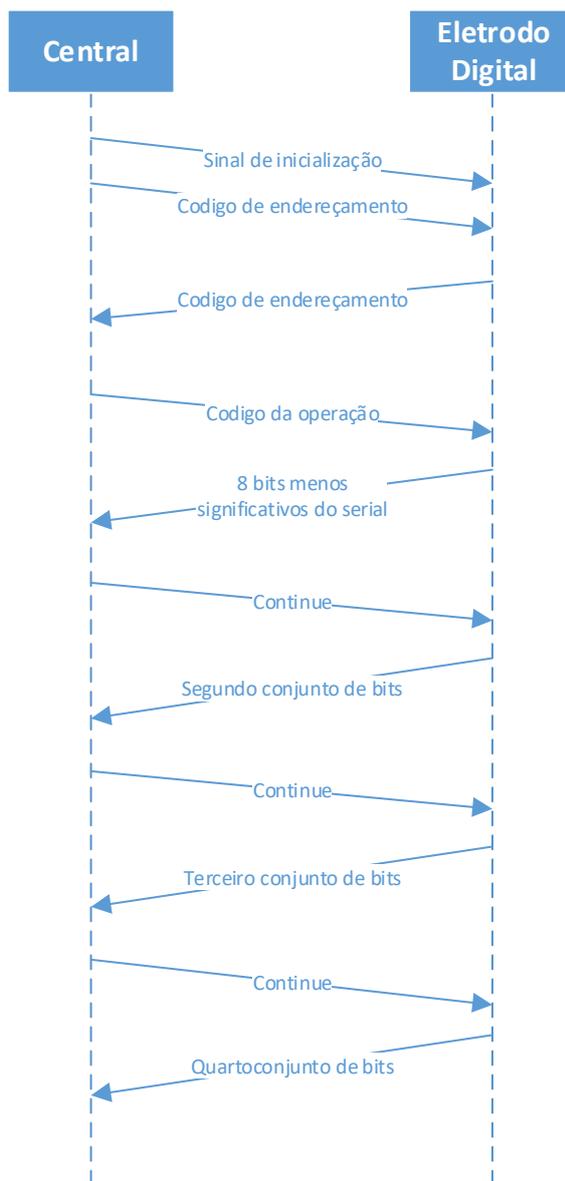


Figura 15 – Operação de leitura do serial do eletrodo.

2.2.3.8 Operação Ler Dado EEG

Essa operação de leitura de dados EEG é realizada frequentemente na operação do microchip para coleta de dados lidos pelo microchip. Devido a necessidade dessa operação ser executada com frequência, o tempo necessário para sua execução deve ser baixo.

É por isso que, para a chamada da operação, o eletrodo é desperto e, logo em seguida, é enviado um código de operação e um código de endereçamento para direcionamento do comando a um único microchip, evitando-se, assim, a colisão de dados.

O funcionamento do comando é similar aos outros comandos de leitura de registro. Envia-se do comando e código de endereçamento, obtém como resposta o valor EEG que é lido dividido em partes de 8 bits. Para efeitos de teste, na implementação do protocolo do trabalho foi utilizado uma carga com até 32bits de dados uteis sendo enviados pelo eletrodo. A *Figura 16* - Operação de leitura de dado EEG coletado

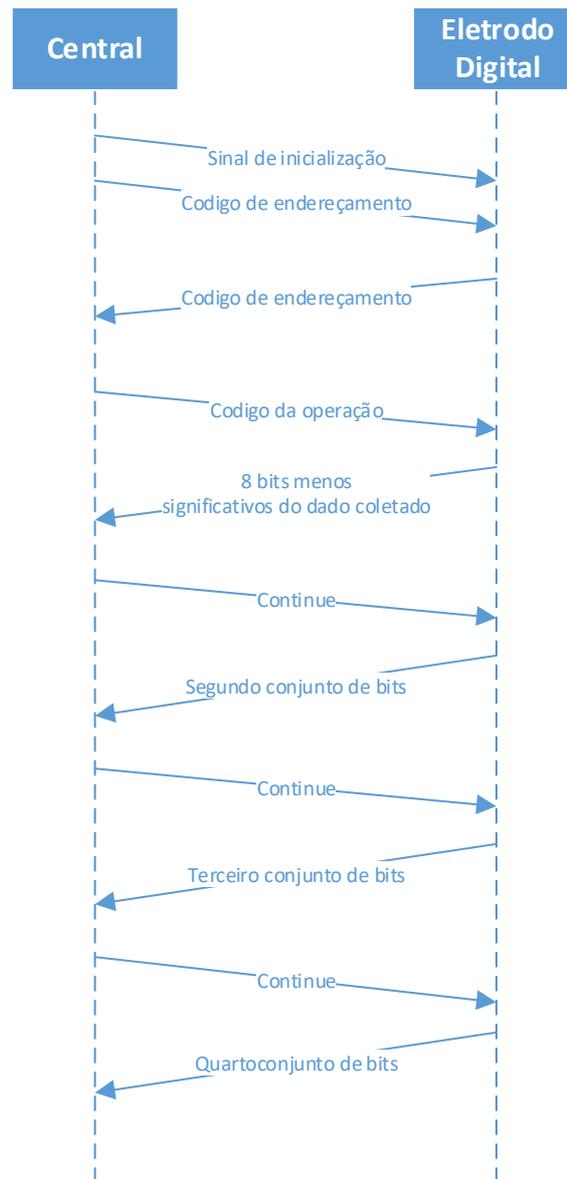


Figura 16 - Operação de leitura de dado EEG coletado.

3 RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Implementação

Esse projeto foi desenvolvido e validado em linguagem Verilog com a finalidade de testar o funcionamento do protocolo. Utilizou-se a plataforma Quartus II e a placa alvo do projeto seria uma Altera Cyclone II (modelo EP2C20F484C7).

Para implementação do eletrodo foram implementados dois módulos: o de comunicação serial UART e módulo que implementa o gerenciamento da comunicação proposta. Houve essa separação pelo motivo de possível substituição do protocolo UART por outro protocolo de camada inferior.

3.2 Resultados

3.2.1 Operação Registro

Uma atenção especial foi dada a operação de registro. Essa operação é crítica para o funcionamento do sistema, pois vários eletrodos respondem ao processo de registro ao mesmo tempo. Devido a limitações de recursos disponíveis, não foi possível testar com uma quantidade próxima ao limite do protocolo (256 eletrodos). Entretanto, foi possível testar com alguns casos que mais causam problema para a operação de registro com até 3 eletrodos. O resultado pode ser observado pela Figura 17. Essa forma de onda foi obtida através de simulação no software ModelSim importando o projeto Verilog desenvolvido no software Quartus II.

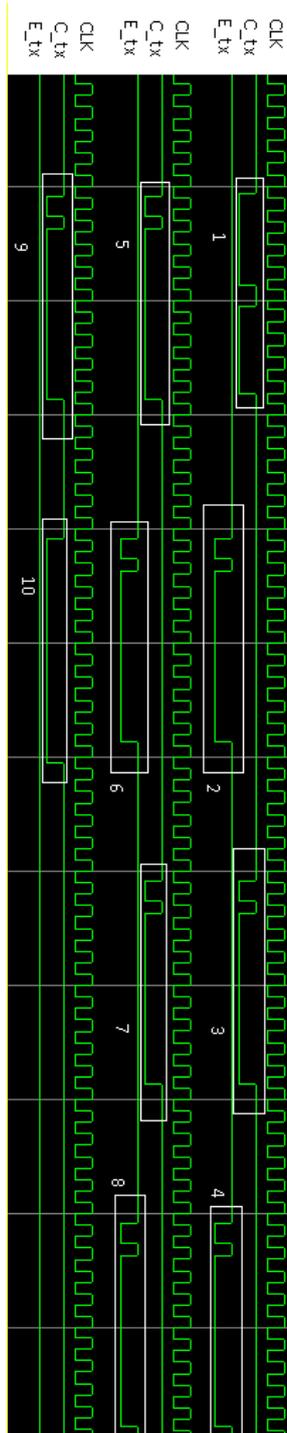


Figura 17 - Operação de registro.

O sinal de *clock* é para referência temporal, isto é, ele não é transmitido entre o eletrodo e central. As mensagens trocadas foram marcadas na imagem e as descrições das informações trocadas estão listadas a seguir:

1. Sinal de inicialização longa;
2. Byte menos significativo do serial (0x01);
3. Confirmação do byte menos significativo do serial (0x01);
4. Segundo conjunto de bytes (0x01);
5. Confirmação do segundo conjunto de bytes (0x01);
6. Terceiro conjunto de bytes (0x01);
7. Confirmação do terceiro conjunto de bytes (0x01);
8. Quarto conjunto de bytes (0x01);
9. Confirmação do quarto conjunto de bytes (0x01);
10. Envio código de endereçamento do eletrodo registrado (0x00).

3.2.2 Operação Envia Configuração Amplificador, Ganho ou Filtro

As operações de configuração são muito semelhantes entre si, alterando apenas o parâmetro a ser modificado. Por isso, para a simulação, foi escolhida apenas a operação que altera o parâmetro de ganho da conversão.

A operação que altera o ganho do eletrodo, envia o sinal de inicialização do dispositivo para tirá-lo do estado de espera e o código de operação. Durante esse período, foi observado que é aconselhável adicionar um atraso entre esses dois sinais para que os dados não sejam enviados muito próximos, causando falha na comunicação.

Após o eletrodo tomar conhecimento da operação, ele retorna como resposta ao seu endereçamento, para não haver dúvidas com relação a qual eletrodo está respondendo. Assim que ocorre a confirmação é iniciada a transferência dos bytes que compõe o parâmetro com 2 bytes (16 bits).

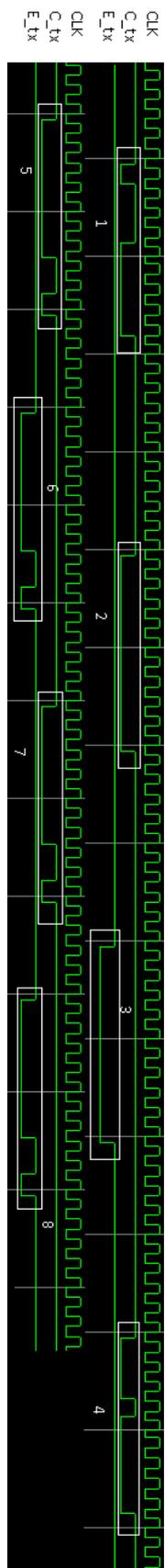


Figura 18 - Simulação do envio de configuração de parâmetro.

Na Simulação mostrada na *Figura 18*, o sinal de *clock* é interno e apresentado apenas para referência. As mensagens trocadas são:

1. Sinal de inicialização;
2. Código de endereçamento (0x00);
3. Confirmação de recebimento por parte do eletrodo (volta do código de endereçamento);
4. Código da operação (0x04);
5. Envio byte menos significativo (0xC0);
6. Confirmação o byte menos significativo (0xC0);
7. Envio byte mais significativo (0xC0);
8. Confirmação o byte mais significativo (0xC0).

3.2.3 Operação Ler Configuração Amplificador, Ganho ou Filtro

Assim como a operação de escrita, a operação de leitura começa com o sinal de inicialização e código da operação. Assim que é confirmada a operação, o eletrodo começa o envio dos bytes da configuração.

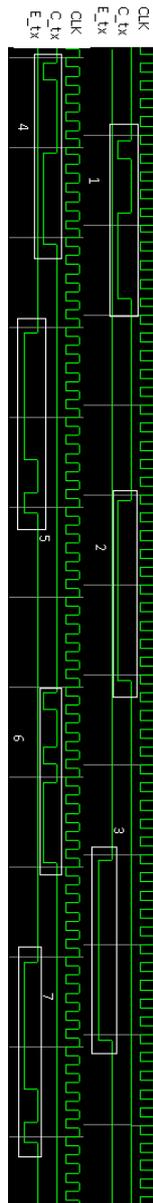


Figura 19 - Operação de ler parâmetro de configuração.

O sinal de clock na Figura 19 é somente para referência temporal. As mensagens trocadas foram:

1. Sinal de inicialização;
2. Código de endereçamento (0x00);
3. Confirmação de recebimento por parte do eletrodo (volta do código de endereçamento);
4. Código da operação (0x0F);
5. Byte menos significativo do parâmetro de configuração;

6. Requisição de continuidade das mensagens (0x0B);
7. Byte mais significativo do parâmetro de configuração.

3.2.4 Operação Gravar Serial

Esta operação é realizada apenas uma vez para estabelecer uma chave única, servido como identificação do eletrodo. Esse número será responsável por criar uma identificação única no sistema mesmo com substituição de um eletrodo no sistema.

A operação deve ser realizada numa configuração de uma central para um eletrodo. Esta operação consiste no envio e confirmação de 32 bits em blocos menores com confirmação do número recebido para garantia do funcionamento do eletrodo.

Devido a essa operação ser similar a operação de configuração dos parametros do eletrodo, a simulação não foi detalhada no presente trabalho

3.2.5 Operação Eco

Para teste do funcionamento do eletrodo sem alteração de nenhum parâmetro ou realização de uma operação de leitura de valor que poderia ser demorada, existe a operação de eco. Essa operação é de curta duração e consegue verificar se os canais de comunicação e eletrodo estão funcionando. Caso essa operação falhe, há um problema com o sistema. As simulações são apresentadas na Figura 20.



Figura 20 - Simulação operação eco

A linha de *clock* existe para referência, essa linha é interna ao modulo. Na simulação da operação eco foram trocadas 6 mensagens. Segue a descrição de cada uma delas:

1. Sinal de inicialização;
2. Código de endereçamento (0x00);
3. Confirmação de recebimento por parte do eletrodo (volta do código de endereçamento);
4. Código da operação (0x06);
5. Mensagem eco (0x06);
6. Resposta da mensagem eco (0x06).

3.2.6 Operação Ler Serial

A operação de ler serial é uma operação que existe para oferecer uma opção de debug do eletrodo em caso de falhas no sistema. Nessa opção é possível ler o valor do serial de forma mais direta, sem a necessidade de realização de uma operação de inicialização do eletrodo em um sistema. A simulação atingiu resultados similares à operação de leitura de parâmetros de configuração.

3.2.7 Operação Ler Dado EEG

Essa operação é o núcleo da função do eletrodo, isto é, transmitir a informação coletada pelo eletrodo para a central, para ela ser transmitida para um computador onde receberá processamento adequado.

Novamente, essa operação obteve um resultado similar a operação de leitura dos parâmetros, diferenciando na quantidade de mensagens trocadas com a central devido ao maior número de bits de informação.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O protocolo desenvolvido no trabalho teve como propósito de transferir as informações do eletrodo digital para a central. Após o processamento de dados ser realizado ainda internamente, os eletrodos são orquestrados pela central para transferência das informações de forma serial. A técnica utilizada para transmissão permite que vários eletrodos sejam conectados no sistema e transportem os dados a central de forma serial.

Os resultados encontrados com a implementação permitem afirmar que o protocolo é viável e atender às necessidades básicas do sistema para a troca de informações. A implementação gerou uma produção intermediária de um artigo foi apresentado na ICM 2017 no Líbano (Anexo A).

Alguns pontos de sugestão levantados durante o final da implementação para melhoria da solução seriam:

1. Checagem de canal para detectar colisões causadas por mau funcionamento de algum componente, como, por exemplo, o canal CSMA/CA. Caso ainda se mantenha o meio comum de comunicação, sugere-se a implementação de algoritmos melhores de prevenção de colisão.
2. Alterar o funcionamento do protocolo de transporte (UART) para que haja a transmissão de mais bytes por vez. Outra sugestão é a substituição do protocolo de transporte (UART) por outro, já padronizado, que agregue mais performance no sistema. Seriam assim, alternativas para se enviar menos mensagens e reduzir as chances de colisão de dados na fase de registro.
3. Utilização da criptografia das mensagens trocadas. A criptografia previne o uso indevido das informações passadas. Em se tratando de dados pessoais, sigilo é essencial.
4. Implementação de protocolo sem fio entre central e computador. Apesar do número reduzido de fios necessários para funcionamento do sistema, a alternativa sem fio seria desejável por facilitar a operação do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRONZINO, J. D. Principles of Electroencephalography: The Biomedical Engineering Handbook. United States: CRC IEEE Press, 2000. Volume 1
- [2] PAUL., CLAYTON. Introduction to EMC. New Jersey, USA: Wiley, 1992.
- [3] R., P. C. Introduction to EMC. New Jersey, USA: Wiley, 1992. ISBN 978-0471755005
- [4] ANATEL. ATRIBUIÇÃO DE FAIXAS DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL. 2018. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=348213>> Acesso em 05/10/2018.
- [5] 3GPP. Rel-13_description_20150917. 2015. Disponível em: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-13_description_20150917.zip. Acessado em 06/10/2018.
- [6] DUTRA, O. de O. Um Amplificador Neural de Baixo Ruído e Baixa Potência Utilizando uma Topologia Folded Cascode OTA com Malha de Realimentação PID e Ganho Ajustável para EEG SoC Arrays. 2011. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Federal de Itajubá, Itajubá.
- [7] COLLETTA, G. D. Uma arquitetura de conversão A/D baseada na aproximação sucessiva de sinais PWM em tecnologia CMOS. 2011. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- [8] RODRÍGUEZ-ARAGÓN, L. J. Tema 4: Internet y Teleinformática. Disponível em: <https://previa.uclm.es/profesorado/licesio/Docencia/IB/IBTema4.pdf>. Acesso em: 01/08/2018.
- [9] REDAÇÃO GALILEU. Inteligência Artificial de projeto do Facebook cria linguagem própria. Revista Galileu, São Paulo, 2017.
- [10] IEEE. 802.3-1985 IEEE STANDARDS FOR LOCAL AREA NETWORKS: CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS WITH COLLISION DETECTION (CSMA/CD) ACCESS METHOD AND PHYSICAL LAYER SPECIFICATIONS. 1985. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/30707>. Acessado em 29/09/2018.

[11] IEEE. ENHANCED BACKOFF SCHEME IN CSMA/CA FOR IEEE 802.11. 2003.
Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1286113>. Acessado em 29/09/2018.

Anexos

Implementation of a Bidirectional Serial Communication Protocol Using Shared Channel

Alexandre Z Rodrigues, Robson L Moreno, Paulo C Crepaldi , Tales C Pimenta
Universidade Federal de Itajubá - Brasil

Abstract—Ultra-dense array of Electroencephalogram (EEG) may contain 256 or even 512 electrodes, which offers a challenge to provide intercommunication between each electrode and a central communication hub. This article presents a solution for communication between several electrodes and a hub, in same channel, to be implemented by a pair of wires. Since each electrode may be differently located over the scalp, and since they can perform signal amplification and filtering, they must be individually configured, and thus the communication must be bidirectional. A dedicated channel to each electrode would be unfeasible due to the large number of wiring. Thus, we have developed an asynchronous bidirectional communication protocol that allows a large number of devices in a single channel. The communication hub acts a single master and all electrodes are the slaves, but only one at a time. The protocol was implemented in Verilog and validated in a system implemented with FPGA boards.

Keywords—UART; asynchronous Serial protocol; Verilog HDL; EEG; Electroencephalogram;

I. INTRODUCTION

Currently, the need for integrated communication is becoming increasingly common in many areas, including biomedical equipments. The ultra-dense Electroencephalogram – EEG, containing 256 or 512 electrodes is becoming widely used for the analysis of the brain activity. The use of active electrodes has been proposed in order to map and study the brain networks [1], while reducing the effects of electromagnetic interference [2]. The active electrodes provide acquisition, amplification, filtering and AD conversion of the brain signals. A central chip collects the data from all active electrodes and transmit it to an external recording device [1].

Considering a system of large number of peripheral devices, a dedicated channel for each electrode would not be feasible. If each electrode uses a pair of wires for communication (transmit and receive information), a system of 256 electrodes would require 512 wire to perform the communication between each electrode and a hub. As the number of electrodes increases [1] [5], the conventional approaches become impracticable, since it must include also the power lines.

A possible simplification would be use of a unique channel to all electrodes. A channel of just two communication wires (transmitter and receiver), plus the power lines, could solve the hardware difficulties. That kind of shared channel has been already used by some communication protocols, such as UART. In many protocols, one byte is sent at a time, plus a flag as indication of end of a message. The message could, or could not,

include a parity bit to check integrity. Some protocols, including UART, do not need a synchronization signal (clock), thus the propagation delays do not cause any harm. Due to those features, that protocol would be a good choice to implements our communication system. Nevertheless, some features would not be important to our system, and some other needed features are not available. Therefore, we had to develop a communication protocol to suit our application, and to avoid any license or royalties to the project.

The remaining of this article is organized as follows. Section II will describe the protocol and its implementation. Section III presents the results, followed by brief conclusions.

II. THE PROTOCOL

A. Eletrical Layer (Transport Protocol)

As mentioned earlier we have developed a new protocol to avoid any avoid any license or royalties difficulties. It should be of simple implementation and must meet the project requirements.

The proposed circuit has two asynchronous independent channels, to transmit and receive data. Each transmission is identified by an initialization bit, the data byte (8 bits), a parity check bit and an end of message bit. At the end of data transmission, the channel goes to high until next data, as indicated in Figure 1.



Fig. 1 – Transmission example: 11100101b with parity.

During standby mode, the communication channel remains in high level in order to minimize power consumption. Since the protocol is asynchronous, it is possible send a message without the need of an additional clock line, or even the need of a PLL to synchronize clocks. That is highly desirable in a system of any number of devices.

B. Software Layer (Core Protocol)

Unlike the UART protocol that works in a master/slave configuration, the protocol of our project allows multiples slaves devices in the same channel. All electrodes receive the messages from the hub, but only a specific electrode responds. The response is made only by the electrode addressed by the hub,

while the other electrodes remain quite (high impedance mode). That feature is similar to I²C [6], though our protocol is asynchronous while I²C is synchronous.

As default, each message sent by the hub contains an addressing code and an operation code. After the addressed electrode responds to the requested instruction, it is considered ready to the next one. After that, the communication hub can start a new operation. The only two operations that do not follow that scheme are the Initialization and the Set Serial. Those two operations have their own sequences, as they will be presented. Table I lists the main operations performed by our protocol. Under error, the hub or electrode returns an error code and repeats the message.

TABLE I. VFC FREQUENCY VERSUS INTERVAL BETWEEN PULSES.

Binary								Operation	Decimal
B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0		
0	0	0	0	0	0	0	1	Set Amp	1
0	0	0	0	0	0	1	0	Set Filter	2
0	0	0	0	0	0	1	1	Set Serial	3
0	0	0	0	0	1	0	0	Received	4
0	0	0	0	0	1	0	1	Echo	5
0	0	0	0	1	1	1	0	Read Amplifier	14
0	0	0	0	1	1	0	1	Read Filter	13
0	0	0	0	1	1	0	0	Read Serial	12
0	0	0	0	1	0	1	1	Continue	11
0	0	0	0	1	0	1	0	Read EEG	10
0	0	0	0	0	1	1	1	Initialization	7
0	0	0	0	0	1	1	0	Wakeup	6
1	1	1	1	1	1	1	1	Error	255

1) Initialization Routine – 7_D

The Initialization routine runs during system initialization. It identifies all connected electrodes and attributes an addressing code to each one. The addressing code should have the smallest possible number of bits for faster communication. The Initialization routine starts with a wakeup signal and then sends the proper initialization code. If there is an electrode without addressing code, there will be a response. Once the communication hub knows that there is a component without addressing code, the hub requests the 8 most significant bits of the electrode serial number. Once the hub acknowledges the data, the electrode sends the next 8 most significant bits. Therefore it is performed an association between the serial number and the addressing code for an efficient communication. After sending the 32 bits, the hub send the addressing number to the electrode. The process ends after the electrode acknowledgement.

Figure 2 provides a graphical representation of the Initialization operation. In case of an error caused by collision, there is a proper routine. It puts two or more electrodes to wait a random time, similarly to CSMA/CD protocol

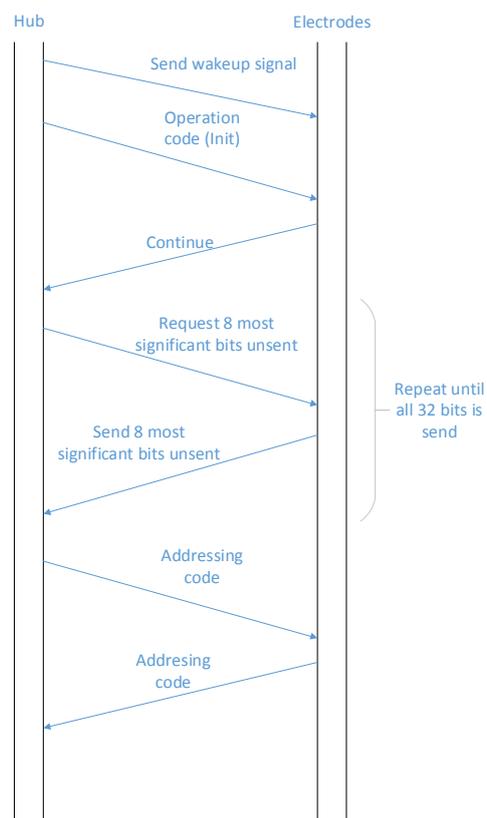


Fig. 2 - Initialization operation.

2) Set Amplifier parameter and Set Filter parameter – 1_D and 2_D

Since the electrodes can perform some signal processing [3], the protocol must be able to perform electrode configuration. The electrode configuration can set up filtering, amplification and A/D conversion parameters that can be performed by specific routines. The hub sends a wakeup signal and an addressing code. Once the electrode responds, the hub sends the operation code of the desired configuration parameter. The electrode confirms again and the hub sends the parameter value, in blocks of eight bits. The electrode confirms after each 8 bits block, as indicated by the graphical representation in Figure 3.

3) Set Serial – 3_D

This operation is performed only once by manufacturer. It is sent just a wakeup signal, since there is no addressing code. The electrode provides a 11_D as confirmation response since there is no serial number in memory. Then the communication hub sends the operation code 11_D. After the confirmation, it is send the serial number, in packages of 8 bits. There is a confirmation after each 8 bits package.

The operation, indicated in Figure 4, is performed to one electrode at a time. In order to avoid serial number duplicities, only one electrode connected to the communication hub at a time.

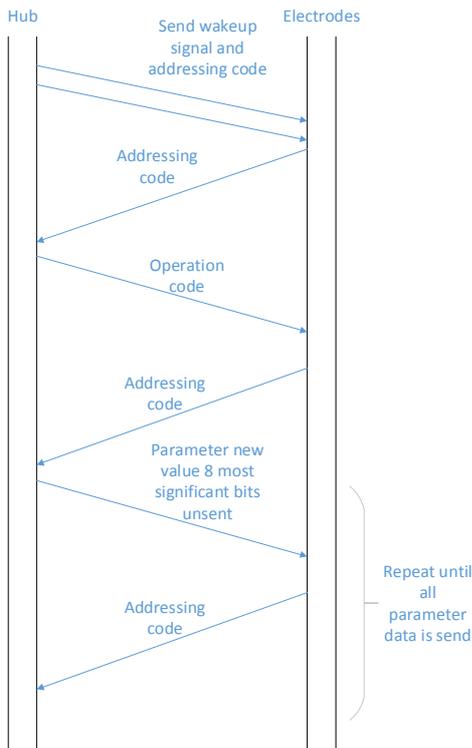


Fig. 3 - Message diagram of set electrode parameter.

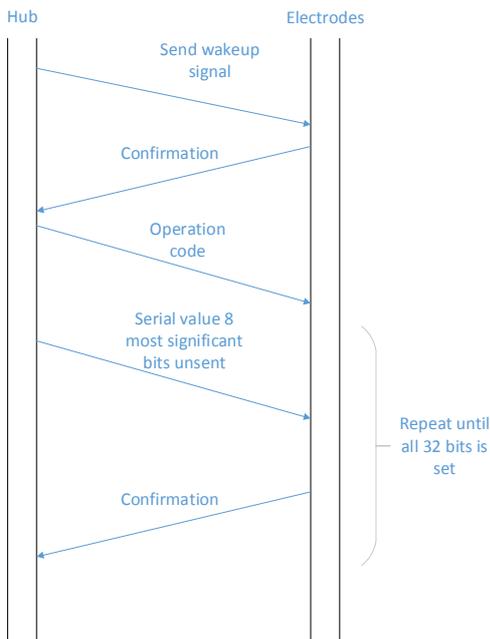


Figure 4 - Setting serial number.

4) Read Amplifier parameter and Filter parameter – 14_D and 13_D

The Read Amplifier and the Read Filter operations may be conducted to validate or verify the parameter setting. The

reading operation takes less steps to be processed. The hub sends a wakeup signal and the device addressing code. After the confirmation, an operation code (14_D or 13_D) is sent to read the intended parameter. The requested parameter is provided as an answer by electrode, as shown in Figure 5.

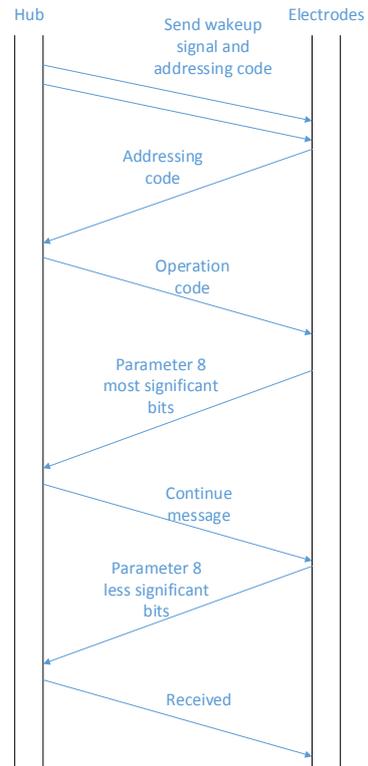


Figure 5 - Reading Amplifier or Filter parameter.

5) Read EEG Data – 10_D

The Read EEG operation is similar to the Read Amplifier and the Read Filter operations. After the response to the wakeup signal, the hub sends the Read EEG (10_D) and the electrode address. The electrode returns two messages containing the collected EEG data, as indicated in Figure 6.

CONCLUSIONS

The protocol presented in this paper implements a bidirectional communication between a central hub and several electrodes. The electrodes are part of an ultra-dense array of 256 or 512 electroencephalogram electrodes. Besides acquisition, each electrode performs filtering, amplification and analog to digital conversion, thus reducing susceptibility to external noise. The large number of electrodes demanded their connection on the same communication channel, so each one must be individually addressed. Additionally, since each electrode is located on a different location over the scalp, each one must be individually configured, in other words, each one has its own parameters.

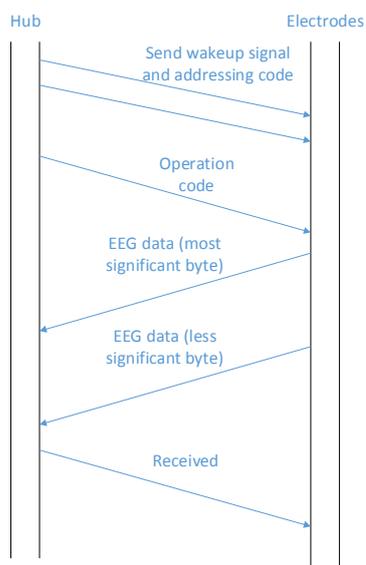


Figure 6 - EEG signal reading.

The communication hub collects the data of all electrodes and send it to the external registering device. The hub also receives the configurations from the external device and directs that to the electrodes.

The proposed protocol has two layers, therefore it is possible to swap the electrical layer to another communication pattern. The propose protocol presents similarities to UART, although it was developed to suit our project, aiming the simplicity of

implementation. As compared to a previous work that use a simpler system [1], our proposal proved to be more robust, scalable and allows multiples electrodes on the same channel. The communication protocol was developed on Quartus II suite and validated on FPGA boards, therefore it can be implemented in custom IC. The obtained results demonstrated the proposed asynchronous protocol meets the project requirements, and proved to be suitable to many other applications in which there are a single master and many slaves.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by CAPES, CNPq and FAPEMIG.

REFERENCES

- [1] T. B. Onofre, "Desenvolvimento de um protocolo de comunicação Bidirecional em VHDL para Eletrodos Digitais de EEG" M.S. Theisis, IESTI, UNIFEI, Itajuba, BR,2014
- [2] F. Yi-yuan, C Xue-jun, "Design and simulation of UART Serial Communication Module Based on VHDL", 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications,2011
- [3] O. Dutra, T. Pimenta, "Low power low noise bio-amplifier with adjustable gain for digital bio-signals acquisition systems", IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS), pp.1-4, 2013.
- [4] G. Colletta, L. Ferreira, T. Pimenta, P. Crepaldi, "A Successive Approximation A/D Converter Using a PWM Modulator DAC", IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), pp.333-337, 2012.
- [5] A. Santos, E. Dias, F. Cardoso, T. Pimenta, "Digital Multiplexer of an EEG Signal Acquisition System", XVIII International IBERCHIP Workshop, 2012.
- [6] F. Leens, "An introduction to I²C and SPI Protocols", IEEE Intrumentation & Measurement Magazine, pp8-13, 2009