

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E
TELECOMUNICAÇÕES

PEDRO DE PAULA JANINI

**REDE DE ÁREA CORPORAL SEM FIO PARA RASTREAMENTO
INERCIAL 3D EM TEMPO REAL PARA APOIO À REABILITAÇÃO
PÓS ACIDENTE VASCULAR ENCEFÁLICO**

UBERLÂNDIA

2021

PEDRO DE PAULA JANINI

REDE DE ÁREA CORPORAL SEM FIO PARA RASTREAMENTO
INERCIAL 3D EM TEMPO REAL PARA APOIO À REABILITAÇÃO PÓS
ACIDENTE VASCULAR ENCEFÁLICO

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Alcimar Barbosa Soares

UBERLÂNDIA

2021

PEDRO DE PAULA JANINI

**REDE DE ÁREA CORPORAL SEM FIO PARA RASTREAMENTO
INERCIAL 3D EM TEMPO REAL PARA APOIO À REABILITAÇÃO
PÓS ACIDENTE VASCULAR ENCEFÁLICO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia.

APROVADA EM: 26 de novembro de 2021

Prof. Dr. Alcimar Barbosa Soares

Orientador
UFU

Prof. Dr. Marcelo Barros de Almeida

UFU

Prof. Dr. Sérgio Ricardo de Jesus Oliveira

UFU

UBERLÂNDIA

2021

Agradecimentos

Ao Professor Dr. Alcimar Barbosa Soares pela orientação, incentivo e conhecimentos transmitidos neste trabalho.

Agradeço também a todos professores e colegas da equipe do Laboratório de Engenharia Biomédica (BioLab), em especial aos professores Marcelo Barros e Sérgio Oliveira por toda ajuda oferecida.

Aos meus pais por terem sempre me apoiado e incentivado minha jornada como estudante.

Aos meus amigos que fizeram com que a graduação fosse mais leve e divertida.

A todos os professores, técnicos e funcionários da Faculdade de Engenharia Elétrica que fizeram parte da minha formação.

A Universidade Federal de Uberlândia pela excelente formação.

Resumo

O uso de sensores tem se tornado cada vez mais comum e importante em nossas vidas. Prova disso é a crescente popularização das Wireless Body Area Network (WBAN) para diversos usos como no rastreamento corporal. A captura de movimentos por si só possui diversos fins como: o uso em videogames, diagnósticos clínicos, reabilitação, treinamento de atletas, avaliação biomecânica, e demais aplicações. Em situações como a de um paciente pós Acidente Vascular Encefálico (AVE), com comprometimento total ou parcial de alguns movimentos, o uso de sensores inerciais vinculados a uma WBAN torna-se de grande valia para a análise dos movimentos corporais. Neste contexto, a captura de dados para o uso em análises biomecânica e cinemática dos movimentos pode ser útil durante a reabilitação desses pacientes. Mesmo existindo muitas opções de executar o rastreamento dos movimentos do corpo humano, a descrição contínua e em tempo real de movimentos corporais ainda é um desafio. Para contornar essas limitações o objetivo desse projeto é propor um modelo de rede sem fio de sensores inerciais, que permita o sincronismo das informações advindas de diversos sensores. Essa rede tem o uso destinado principalmente ao rastreamento dos movimentos dos membros superiores durante a reabilitação de pacientes pós AVE. O protótipo consiste em dois tipos principais de nós de rede chamados central e sensor. O nó central é o nó concentrador de dados, o qual garante o controle dos demais nós da rede. O nó sensor utiliza sensores inerciais (acelerômetro e giroscópio) e sensor magnético (magnetômetro) para capturar os movimentos. O protótipo de rede tem como intuito transmitir as informações de maneira confiável, sincronizada, em tempo real, com uma alta velocidade de taxa de dados. Para isso são utilizados também microprocessadores e rádios transceptores de rádio frequência. De modo a validar o modelo, foram realizados testes para avaliar a latência, confiabilidade e sincronismo da rede. Foi obtido como resultado a implementação de um modelo de *hardware* e *software* de uma rede de sensores inerciais capaz de rastrear de maneira síncrona e em tempo real os movimentos dos membros superiores. A rede de sensores foi configurada de modo a fazer aquisição de dados inerciais a uma taxa de 100Hz sendo que o valor de latência da rede resultou em apenas 7,4% do período desse valor. A confiabilidade dos dados e o sincronismo entre os nós também se mostraram adequados a aplicação após a análise visual dos resultados por meio de gráficos gerados em tempo real pela aplicação no computador.

Palavras-chaves: WBAN, Sensores Inerciais, Tempo Real, Rádio Frequência.

Abstract

The use of sensors has become increasingly common and important in our lives. The various destined uses of the Wireless Body Area Network (WBAN) such as body tracking is a proof of that. Body motion Tracking by itself has several purposes like video games, clinical diagnosis, rehabilitation, athlete's training, biomechanical analysis, and others. The body motion tracking can be relevant in situations like post-stroke patients performing rehabilitation due to partial or total loss of body movements. In this case, a WBAN of inertial sensors can be used to perform body motion tracking. Then, the data provided by the sensors can be used in biomechanical and kinematic analysis of the movements executed by the patient. Even though there are many options to perform tracking of human body movements a continuous and real-time tracking of body movements is still a challenge. To overcome some of these limitations, the aim of this project is to propose an inertial sensors wireless network model, which allows the synchronism of a number of sensors. The main use of this network is tracking the movements of the upper limbs during the rehabilitation of post-stroke patients. The network prototype has two types of nodes called central and sensor. The central node is the data concentrator node that controls the other nodes in the network. The sensor node uses inertial sensors (accelerometer and gyroscope) and a magnetic sensor (magnetometer) to capture the movements. The network prototype has the purpose of transmitting information reliably, synchronized, in real-time, with a high data rate speed. For this, microprocessors and radiofrequency transceivers are also used. To validate the model, tests were performed to evaluate the network latency, reliability, and synchronism. The results show the implementation of a hardware and software model of an inertial sensor network capable of tracking the movements of the upper limbs in a synchronous and real-time way. The sensor network was configured in order to make inertial data acquisition at a rate of 100Hz. The network latency value resulted in only 7.4% of the data sampling period. After the visual analysis of the results through graphics generated in real-time by the application on the computer, the reliability of the data and the synchronism between the nodes were also adequate to the main purpose of the work.

Key-words: WBAN, Inercial Sensors, Real-Time, Radio Frequency.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Exemplo de um dispositivo comercial de captura de movimento baseado no uso de rastreadores magnéticos. | 2 |
| Figura 2 – Representação de um sistema óptico para captura de movimentos do corpo humano. | 3 |
| Figura 3 – Comparação do tamanho do sensor inercial em relação a uma moeda. | 3 |
| Figura 4 – Representação da topologia de rede do tipo Estrela. | 7 |
| Figura 5 – Representação da topologia de rede do tipo Malha. | 8 |
| Figura 6 – Representação da topologia de rede do tipo Árvore. | 8 |
| Figura 7 – Representação da topologia de rede do tipo Cluster. | 9 |
| Figura 8 – Arquitetura de rede. | 10 |
| Figura 9 – Canais IEEE 802.15.4 na banda ISM (PHY - Camada Física). | 11 |
| Figura 10 – Exemplo com 3 nós transmissores respeitando o protocolo <i>Slotted</i> ALOHA. | 14 |
| Figura 11 – Exemplo de colisão para protocolo ALOHA. | 14 |
| Figura 12 – Exemplo de prevenção de colisão para o protocolo CSMA/CA em uma rede Wi-Fi. | 16 |
| Figura 13 – Posicionamento de nós sensores ao longo dos segmentos do corpo humano. | 18 |
| Figura 14 – Estrutura de um acelerômetro de dois eixos. | 20 |
| Figura 15 – Estrutura de um giroscópio de um eixo. | 21 |
| Figura 16 – Esquema mostrando a configuração do efeito Hall. | 22 |
| Figura 17 – Sistema de rastreamento inercial <i>MVN Analyze</i> | 23 |
| Figura 18 – Fotografias do sensor <i>InertiaCube4</i> | 24 |
| Figura 19 – Posicionamento de nós sensores no corpo. | 26 |
| Figura 20 – Esquema mostrando: os elementos de hardware constituintes de cada nó, a relação entre os nós da WBAN e a ligação do NC via USB ao computador. | 28 |
| Figura 21 – Pacote do protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> TM | 29 |
| Figura 22 – Estrutura dos tipos de mensagens. | 30 |
| Figura 23 – Representação da comunicação feita entre os nós durante o experimento. | 32 |
| Figura 24 – Representação da forma de onda esperada após plotagem dos dados pela aplicação. | 32 |
| Figura 25 – Representação dos sinais esperados relacionados aos eventos de transmissão e recepção dos bytes. | 33 |
| Figura 26 – Ampliação feita nos sinais representados pela Figura 25. | 34 |
| Figura 27 – Representação da comunicação feita entre os nós durante o segundo experimento. | 35 |
| Figura 28 – Representação das formas de ondas esperadas após plotagem dos dados vindos de cada NS. | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 – Representação dos sinais esperados relacionados aos eventos de transmissão dos bytes para dois NS. | 36 |
| Figura 30 – Ampliação feita nos sinais representados pela Figura 29 mostrando a diferença temporal entre os sinais. | 36 |
| Figura 31 – Posição dos sensores inerciais no membro superior direito para a execução dos movimentos. | 38 |
| Figura 32 – Elementos da rede montados para execução dos experimentos. | 39 |
| Figura 33 – Forma de onda gerada pela aplicação após plotagem dos dados vindos do NS. | 40 |
| Figura 34 – Sinais gerados pelo NS e NC devido a transferência e recebimento de dados vistos no osciloscópio. | 40 |
| Figura 35 – Ampliação feita nos sinais da Figura 34 mostrando a diferença temporal entre eles. | 41 |
| Figura 36 – Forma de onda gerada pela aplicação após plotagem dos dados vindos do NS. | 41 |
| Figura 37 – Sinais gerados pelo NSs devido a transferência de dados vistos no osciloscópio. | 42 |
| Figura 38 – Ampliação feita nos sinais da Figura 37 mostrando a diferença temporal entre eles. | 42 |
| Figura 39 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Z do NS1 com NS2 parado. | 43 |
| Figura 40 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Z do NS2 com NS1 parado. | 44 |
| Figura 41 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Y do NS1 com NS2 parado. | 45 |
| Figura 42 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Y do NS2 e NS1 parado. | 46 |
| Figura 43 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo X do NS1 e NS2 parado. | 47 |
| Figura 44 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo X do NS2 e NS1 parado. | 48 |
| Figura 45 – Resultados referentes ao movimento de flexão e extensão de cotovelo, com o cotovelo apoiado em uma mesa. | 49 |
| Figura 46 – Resultados referentes ao movimento de supinação e pronação de cotovelo, com o cotovelo apoiado em uma mesa. | 50 |
| Figura 47 – Resultados referentes ao movimento de rotação interna do ombro, com o braço posicionado paralelo ao solo. | 51 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parâmetros da Camada Física para redes IEEE 802.15.4 | 11 |
|---|----|

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|--------|--|
| WBAN | <i>Wireless Body Area Networks</i> |
| MEMS | <i>Micro Electro Mechanical Systems</i> |
| CI | Circuito Integrado |
| IMU | Unidade de Medição Inercial |
| NC | Nó Central |
| NS | Nó Sensor |
| AVE | Acidente Vascular Encefálico |
| RF | Rádio Frequência |
| MAC | <i>Medium Access Control</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| CCA | <i>Clear Channel Assessment</i> |
| ISM | <i>Industrial Scientific and Medical</i> |
| BPSK | Binary Phase Shift Keying |
| O-QPSK | <i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i> |
| DSSS | <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> |
| CSMA | <i>Carrier Sense Multiple Access</i> |
| UFU | <i>Universidade Federal de Uberlândia</i> |

Sumário

| | |
|--|------------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | ii |
| Abstract | iii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos | 4 |
| 1.2 Organização do Trabalho | 4 |
| 2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE | 6 |
| 2.1 Rede de Área Corporal Sem Fio | 6 |
| 2.1.1 Introdução | 6 |
| 2.1.2 Topologia | 6 |
| 2.1.2.1 Topologia em Estrela | 7 |
| 2.1.2.2 Topologia em Malha | 7 |
| 2.1.2.3 Topologia Árvore | 8 |
| 2.1.2.4 Topologia Cluster | 8 |
| 2.1.3 Tipo de Aquisição e Envio de Dados | 9 |
| 2.1.4 Arquitetura | 10 |
| 2.1.5 Camada Física | 10 |
| 2.1.6 Subcamada MAC | 11 |
| 2.1.6.1 Protocolos de Divisão de Canal | 12 |
| 2.1.6.2 Protocolos de Acesso Aleatório | 13 |
| 2.1.6.3 Protocolos de Revezamento | 17 |
| 2.2 Rastreamento Inercial | 17 |
| 2.2.1 Cinemática Direta | 17 |
| 2.2.2 Sensores Inerciais | 18 |
| 2.2.2.1 MEMS | 19 |
| 2.2.2.2 Acelerômetro | 20 |
| 2.2.2.3 Giroscópio | 20 |
| 2.2.2.4 Magnetômetro | 21 |
| 2.3 Estado da Arte e Dispositivos Comerciais | 22 |
| 3 PROPOSTA DE UMA WBAN PARA O RASTREAMENTO INERCIAL | 25 |
| 3.1 Topologia de Rede | 25 |
| 3.2 Nó Central (NC) | 26 |
| 3.3 Nó Sensor (NS) | 26 |
| 3.4 Protocolo de rede | 28 |
| 3.4.1 Protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> TM | 28 |
| 3.4.2 Protocolo de Troca de Informações | 29 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5 | Software de aplicação | 31 |
| 3.6 | Experimentos de Validação | 31 |
| 3.6.1 | Experimento 1: Um NS em comunicação com o NC | 31 |
| 3.6.2 | Experimento 2: Dois NS em comunicação com o NC | 34 |
| 3.6.3 | Experimento 3: Dois NS em comunicação com o NC utilizando-se Dados Reais | 37 |
| 4 | VALIDAÇÃO E RESULTADOS | 39 |
| 4.1 | Resultados do Experimento 1 | 39 |
| 4.2 | Resultados do Experimento 2 | 41 |
| 4.3 | Resultados do Experimento 3 | 42 |
| 5 | DISCUSSÃO | 52 |
| 6 | CONCLUSÃO | 54 |
| | Referências | 56 |

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica relacionada a miniaturização e conectividade sem fio de dispositivos, como sensores, atuadores e computadores, com o passar do tempo causou uma expansão no uso desses dispositivos para diversos fins. Um dos frutos desses avanços tecnológicos foi o advento das redes de área corporal sem fio, também conhecidas como WBAN (*Wireless Body Area Network*).

Uma WBAN consiste no conjunto de dispositivos com capacidade de comunicação sem fio, os quais desempenham suas funcionalidades nas proximidades do corpo humano. Frequentemente, esses dispositivos, chamados nós, são posicionados sobre, sob (como no caso de implantes) ou nos arredores do corpo. Quando se trata, por exemplo, de um conjunto de nós sensores eles podem monitorar as funcionalidades do corpo humano, bem como características do ambiente adjacente a ele.

Algumas das diversas aplicações das WBANs são: monitoramento de sinais vitais, administração automatizada de remédios, entretenimento, jogos, esportes e outras (CAVALLARI et al., 2014). Assim, sabido o grande número de aplicações e vantagens relacionadas ao uso das WBANs tem sido cada vez mais comum a implementação delas.

Dentro deste cenário, quando se trata do rastreamento do movimento do corpo humano, o uso de uma WBAN para este fim pode ser vantajoso. O rastreio e análise da movimentação do corpo têm grande motivação visto a importância e o extenso número aplicações como treinamento de atletas, jogos de vídeo games, animações cinematográficas, reabilitação de movimentos, análises biomecânicas e outras.

Existem várias estratégias adotadas para o rastreamento do movimento corporal, bem como diferentes categorias de equipamento utilizados para aquisição de dados, a depender das necessidades da aplicação. Por exemplo, (PEI et al., 2016) usou em seu trabalho o dispositivo comercial *Kinect* para capturar gestos. O intuito do trabalho foi utilizar o *Kinect*, combinado com o uso de realidade virtual e métodos tradicionais de reabilitação para propor um novo sistema de avaliação e reabilitação para pacientes acometidos por Acidente Vascular Encefálico (AVE). Em alguns casos, no lugar de usar dispositivos comerciais, pesquisadores preferem desenvolver sistemas dedicados de maneira mais específica a uma aplicação. A exemplo disso, (MELZI; BORSANI; CESANA, 2009) optou por construir um sistema com sensores de medição de acelerometria integrados a uma WBAN, visando monitorar a execução de exercícios de preparação e reabilitação física, fornecendo um feedback ao usuário de modo a corrigir erros e evitar lesões.

Encontram-se no mercado algumas formas de efetuar a captura de movimentos fazendo o uso de sistemas inerciais, mecânicos, ópticos, eletromagnéticos e/ou acústicos. Mesmo com

essa quantidade de opções para realizar medições, o rastreamento contínuo e em tempo real de movimentos corporais ainda é um desafio. Até então, é difícil obter o rastreamento de um indivíduo de maneira prática, personalizável, acessível e em diferentes ambientes. Essa dificuldade se dá pelas próprias restrições dos dispositivos e sistemas de rastreamento o que impele em muitos casos a busca por alternativas mais adequadas e personalizadas.

Cada técnica de captura de movimento possui, naturalmente, vantagens e desvantagens. Os sistemas de captura eletromagnéticos, por exemplo, baseiam-se em rastreadores eletromagnéticos, os quais funcionam medindo a relação espacial entre transmissores e receptores. Os receptores são posicionados no corpo e conectados a unidade de controle eletrônico por cabos individuais. O transmissor gera um campo eletromagnético de baixa frequência detectado pelos receptores. Os receptores então, a partir desse sinal, calculam e devolvem a unidade de controle a posição em coordenadas cartesianas x, y, z e orientação (*yaw*, *pitch* e *roll*) (MENACHE, 2011).

Essa categoria de sistema de captura magnética possui vantagens como: captura e saída de dados em tempo real e não há necessidade de pós processamento dos dados de posição e orientação. Por outro lado, de maneira geral, eles não são acessíveis, a não ser por grandes laboratórios e empresas com bons recursos financeiros. Além disso, esses sistemas são susceptíveis a interferências devido a campos eletromagnéticos, podem apresentar a oclusão de marcadores, e utilizam cabos em muitos casos.



Figura 1 – Exemplo de captura de movimentos utilizando sensor magnético *Nest of Birds*.

Fonte: (GMITERKO; LIPTAK, 2013)

Há também os sistemas de captura do tipo óptico constituídos por sensores ópticos, câmeras de vídeo e fontes de luz ou refletores. Os sensores ópticos e câmeras são posicionados no ambiente para capturar ondas eletromagnéticas. Essas ondas são enviadas das fontes de luz, as quais são posicionadas nas articulações do corpo.

Em muitos dos sistemas ópticos de captura de movimento disponíveis comercialmente existem limitações como a necessidade de pós-processamento e problemas de oclusão de marcadores. [Referência] Ainda, os sistemas ópticos exigem um arranjo com um grande número de equipamentos, em sua maioria câmeras, fazendo com que possuam um alto custo e sejam menos práticos de serem utilizados em determinadas situações e locais.

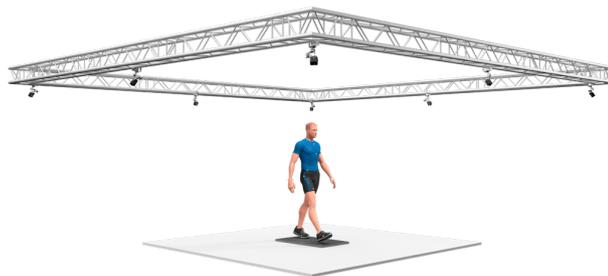


Figura 2 – Representação de um sistema óptico para captura de movimentos do corpo humano.

Fonte: (OPTITRACK, 2020)

Outra possibilidade, são os sistemas inerciais, sendo uma alternativa amplamente utilizada como nos trabalhos de (BUONOCUNTO; MARINONI, 2014), (MELZI; BORSANI; CESANA, 2009), (NERINO et al., 2013). Esses sistemas se baseiam em Unidade de Medição Inercial (IMU), os quais são sensores eletrônicos que utilizam acelerômetro e giroscópio e eventualmente magnetômetro (MIMU). IMUs e MIMUs são dispositivos baratos e de pequeno tamanho fazendo-os fáceis de serem utilizados em ambientes hospitalares ou domésticos (NERINO et al., 2013). Por outro lado, (NERINO et al., 2013) afirma que eles fornecem suas medições de orientação baseados no campo gravitacional e magnético da Terra, tornando-os sensíveis a distorções de natureza magnética muito presentes no ambiente doméstico. Outra desvantagem do uso dos sensores inerciais é o erro acumulativo que muitos deles apresentam, conhecido como *drift*.

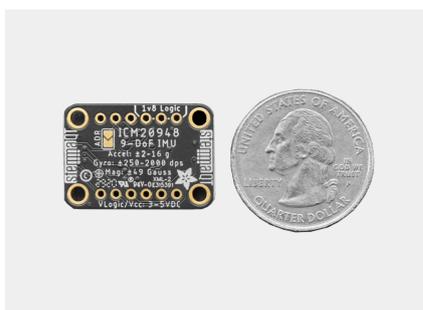


Figura 3 – Comparação do tamanho do sensor inercial comercial *ICM-20948 9-DoF IMU* da empresa *InvenSense* em relação a uma moeda de 25 centavos de dólar.

Fonte: Autor

Mesmo com tamanho reduzido, como mostrado na Figura 3, alguns sensores inerciais comerciais contam com um microprocessador embarcado no mesmo produto. Esse fato faz com que muitos desses sensores sejam mais facilmente utilizados, já que a unidade de controle elimina a necessidade de pós processamento e facilita o uso do mesmo em uma rede de sensores.

Diante do exposto a respeito dos tipos de rastreamento de movimentos e o uso de WBANs para esse fim, a utilização de sensores inerciais pensados como nós de uma WBAN

pode ser interessante visto a necessidade do uso de um sistema simplificado em *hardware*, sem fios, leve, vestível e mais acessível em caráter monetário.

Lançando mão desses recursos, alguns pesquisadores da área de Engenharia e Biomédica estão propondo alternativas utilizando WBANs para estudar mais a fundo a atuação biomecânica do corpo humano. Alguns desses estudos têm como maior objetivo desenvolver métodos de tratamento alternativos para pessoas com limitações funcionais e motoras, como o caso de pacientes acometido por AVE, atletas lesionados, pessoas em pós operatório e outros.

Em situações como, por exemplo, a de um indivíduo após um episódio de AVE essas tecnologias podem ser utilizadas durante as seções do tratamento de reabilitação como fizeram (FANG et al., 2020), (KIM; YANG; GERLA, 2011). Assim, médicos, fisioterapeutas e outros profissionais envolvidos no tratamento podem avaliar e compreender mecanismos relacionados a aprendizagem motora, por exemplo.

No entanto, implementar uma rede com um número razoável de sensores a comunicarem entre si, sem o uso de fios, traz consigo desafios. A título de exemplo, o emprego de uma quantidade de nós sensores, localizados em vários pontos do corpo, o suficiente para rastrear com maior precisão os movimentos, implica em uma alta densidade de informação. Além disso, a alta velocidade de captura e envio de dados é igualmente uma dificuldade.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma rede de sensores inerciais sem fio, que permita o sincronismo das informações advindas de diversos sensores. Essa rede tem o uso destinado principalmente ao rastreamento dos movimentos dos membros superiores durante a reabilitação de pacientes pós AVE.

De modo a realizar o objetivo principal mencionado, algumas metas precisam ser atingidas, a começar por definir a topologia de rede e protocolo de comunicação para múltiplos nós sensores. Em sequência, implementar um modelo de *hardware* e *software* visando a comunicação entre o único nó central (NC) e um nó sensor (NS). Para mais, executar a comunicação entre os nós da rede, utilizando a implementação de um modelo com o NC e dois NS segundo a topologia de rede e protocolo de comunicação definidos. Enfim, avaliar o desempenho da rede em termos da velocidade de comunicação e sincronismo entre os diversos NS.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em 6 capítulos sendo o primeiro capítulo destinado à introdução. Em seguida, no segundo capítulo, foi feita uma revisão da literatura contando com a base teórica, pesquisas e dispositivos comerciais relacionados ao tema. Logo após, o terceiro capítulo apresenta uma proposta de rede de sensores sem fio para o rastreamento inercial de-

talhando quais foram os materiais e métodos utilizados para tanto. Depois, no quarto capítulo é apresentado os resultados referentes aos experimentos de validação executados. Por fim, o capítulo cinco apresenta a discussão e demais considerações finais a cerca do que foi realizado no trabalho e no capítulo seis são apresentadas as conclusões.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Rede de Área Corporal Sem Fio

2.1.1 Introdução

Como mencionado anteriormente, uma WBAN, é constituída de um conjunto de dispositivos que se comunicam entre si, utilizando o meio sem fio. Esses dispositivos, normalmente sensores e/ou atuadores, chamados nós, desempenham suas funcionalidades posicionados nas proximidades do corpo humano através de tecnologias vestíveis e/ou por técnicas invasivas.

O uso das WBANs destina-se tanto a diversas áreas quanto a inúmeras finalidades. O uso de WBANs na área médica tem sido cada vez mais comum para o monitoramento de características fisiológicas como pressão sanguínea, níveis de glicose e oxigenação do sangue, batimentos cardíacos e outras. [colocar referencia] As WBANs também são utilizadas para capturar informações do ambiente adjacente ao corpo humano ou para o localizar em relação ao local e espaço que ele ocupa. Exemplo disso é a localização espacial através de coordenadas de GPS e o rastreamento inercial tridimensional de movimentos corporais.

Os nós de uma WBAN costumam ser um conjunto de sensores ou atuadores somado a uma unidade de transmissão e, por vezes, a uma unidade de controle como um microprocessador. Para que uma WBAN funcione adequadamente, conforme o exigido pela implementação, de modo que os nós que a compõem consigam capturar, coordenar e transmitir dados, é importante definir alguns critérios básicos de rede. Assim é relevante conhecer previamente alguns conceitos, características e protocolos utilizados em WBANs os quais são cruciais para a execução de um bom projeto. Dessa forma, nos próximos tópicos, serão revistas algumas dessas informações teóricas.

2.1.2 Topologia

A topologia é a maneira com que os elementos de uma rede são interligados a ser de maneira física ou lógica. No caso da interligação física ela pode ser feita através de cabos ou a utilizar o canal de Rádio Frequência (RF). Já a interligação lógica tem a ver com qual regra de comunicação os nós devem seguir ao se comunicarem uns com os outros. Essas regras, definidas pelo protocolo de comunicação, implementam se os nós podem comunicar livremente entre si ou apenas com algum nó específico, por exemplo. Para redes de comunicação via RF existem as topologias dos tipos estrela, árvore, *cluster* e malha, as quais serão comentadas mais a frente. A escolha deste parâmetro é importante, visto que a topologia impacta no desempenho da comunicação entre os nós.

2.1.2.1 Topologia em Estrela

É composta por um elemento concentrador ou coordenador (nó central) e demais nós conforme o necessário. Nessa categoria de rede os NS se comunicam diretamente com o NC, não havendo a necessidade de roteadores. Assim, como a comunicação sempre é ponto-a-ponto, altas taxas de transferência, entre cada NS e o NC, são possíveis.

É comum encontrar a utilização dessa topologia em muitas aplicações de WBANs, como o monitoramento de sinais biomédicos, já que em a distância entre os NS e o NC deve ser pequena por questões de economia de energia (OLIVEIRA et al., 2017). O arranjo da topologia, mostrado na Figura 4, facilita o posicionamento do NC e demais nós NS próximos entre eles.

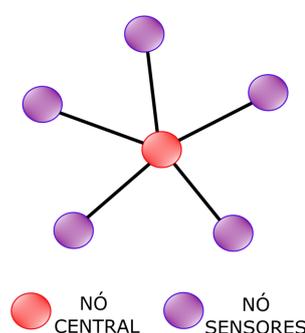


Figura 4 – Representação da topologia de rede do tipo Estrela.

Fonte: Autor

2.1.2.2 Topologia em Malha

Nessa topologia, mostrada na Figura 5, a informação vinda de um nó chega ao destino por um ou mais caminhos, a depender de qual rota a informação toma. O roteamento de informação se dá através de nós roteadores que lhes têm atribuída a capacidade de retransmitir uma informação que não lhes é endereçada.

Como há muitos caminhos para que a informação chegue ao destinatário, essa topologia tem uma maior confiabilidade. Além disso, a inter-conectabilidade dos nós confere a essa topologia a possibilidade de cobrir uma área de maior extensão. Assim, essa topologia é preferível quando a confiabilidade possui maior prioridade que taxas de transmissões maiores. Como desvantagens, essa topologia demanda maior grau de processamento e consequentemente maior consumo de energia por parte dos nós por estarem ativos por maiores períodos.

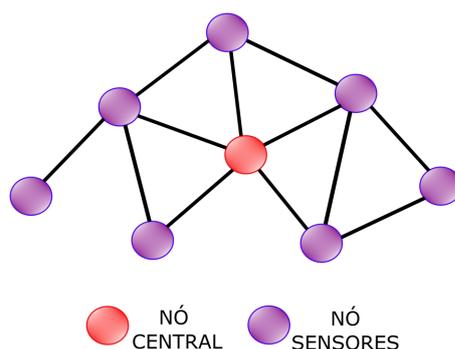


Figura 5 – Representação da topologia de rede do tipo Malha.

Fonte: Autor

2.1.2.3 Topologia Árvore

Nessa topologia a comunicação também é feita ponto-a-ponto, assim como em malha. No entanto, o que as diferenciam é o nível de controle que o nó central exerce sobre os outros nós roteadores para que a comunicação efetue-se corretamente. O nome árvore relaciona-se com os níveis que os nós recebem lembrando uma árvore, como mostrado na Figura 6. Cada nó só tem acesso aos nós vizinhos no nível acima ou abaixo dele (OLIVEIRA et al., 2017).

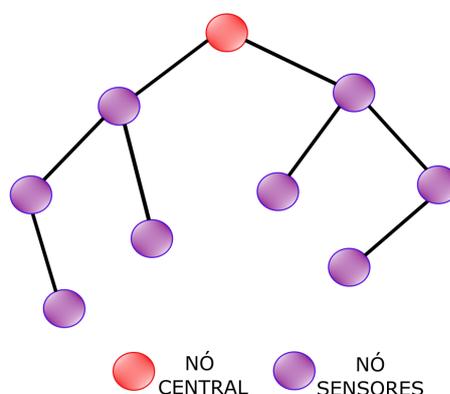


Figura 6 – Representação da topologia de rede do tipo Árvore.

Fonte: Autor

2.1.2.4 Topologia Cluster

A topologia Cluster é uma variação da Estrela, já que elas são muito semelhantes. Nesse caso, existe um nó central a comunicar diretamente com outros nós e esse conjunto é chamado Cluster. Externo ao Cluster pode haver um ou mais nós distantes os quais se comunicam com o nó central com o auxílio de um nó roteador (OLIVEIRA et al., 2017). Essa estrutura é mostrada na Figura 7.

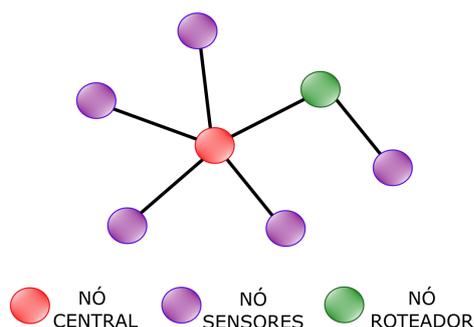


Figura 7 – Representação da topologia de rede do tipo Cluster.

Fonte: Autor

2.1.3 Tipo de Aquisição e Envio de Dados

Em uma WBAN a operação de aquisição e envio de dados pode se dar de diversas formas conforme a necessidade e finalidade da rede. Os dados podem ser capturados, por exemplo, de maneira contínua, orientada a evento, iniciada pelo nó central e híbrida (OLIVEIRA et al., 2017).

No caso da captura contínua os nós sensores comunicam-se continuamente com o nó central. Já na orientada a eventos o envio de dados só é feito quando algum evento configurado ocorre, como um *timeout*, por exemplo.

Na operação de captura iniciada pelo nó central a base é a comunicação Mestre-Escravo, sendo o nó central o mestre a requisitar a cada nó sensor (escravo) os dados. Esse modo de comunicação não exige nenhum tipo de gerenciamento especial do canal, visto que o nó central está sempre a controlá-lo. A operação híbrida normalmente envolve os tipos de aquisição mencionados anteriormente.

Além disso, há também tipos de comunicação entre nós sendo eles por: *broadcast*, *flooding*, *unicast* e *multicast* (OLIVEIRA et al., 2017). No tipo *broadcast* um nó envia uma mensagem a todos demais nós da rede. Uma comunicação desse tipo é interessante quando se deseja que os demais nós recebam a mesma mensagem em simultâneo, como uma mesma configuração, por exemplo.

A transmissão por *broadcast* é também utilizada na transmissão por *flooding*, que ocorre quando os nós da rede transmitem dados para seus respectivos nós vizinhos. Então, a informação vinda do vizinho é passada para frente também por *broadcast* para o próximo vizinho e assim por diante até que a informação alcance o destino.

Em casos de comunicação direta e endereçada entre nós, são enviadas mensagens do tipo *unicast* entre eles. Por vezes, é necessário a comunicação com mais de um nó da rede sem englobar todos os outros, ou seja, com um grupo. Nesse caso é usada a comunicação *multicast* entre um nó específico e nós sensores membros de um mesmo grupo.

2.1.4 Arquitetura

A arquitetura de algumas WBAN, como o caso da Zigbee, são padronizadas pelo padrão IEEE 802.15.4 (), cujo é baseado no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) e conta, mostrado na Figura 8, com camadas superiores não definidas, subcamada MAC (*Medium Access Control*) e camada física (PHY). Cada camada é responsável por estruturar como o padrão opera, sendo que cada uma delas oferece serviços ou recursos a camada superior. A camada PHY contém o transceptor RF com o mecanismo de controle dele. Já a subcamada MAC provém acesso ao canal físico para que as transferências ocorram. As demais camadas superiores como a de rede e a de aplicação não são definidas pelo padrão IEEE 802.15.4 e suas características vão depender e variar de acordo com cada projeto.

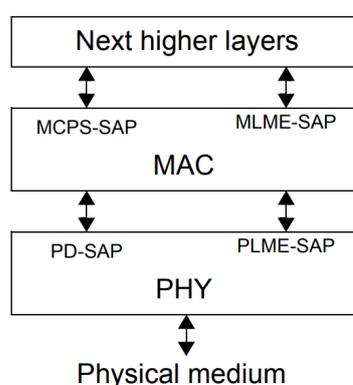


Figura 8 – Arquitetura de rede.

Fonte: (IEEE..., 2016)

2.1.5 Camada Física

De acordo com (IEEE..., 2016) os recursos da camada física são ativação e desativação do rádio transceptor, detecção de energia, indicação da qualidade do enlace, seleção de canal, transmissão e recepção de pacotes através do meio físico e *Clear Channel Assessment* (CCA). Esses recursos são fornecidos, tanto por elementos de *hardware* de RF, quanto pelo firmware de RF.

Segundo (CASAGRANDE et al., 2019), no que se trata de faixas de frequência de operação do padrão IEEE 802.15.4 podem ser utilizadas as faixas de 868MHz, 915MHz e 2,4GHz com taxas nominais de transmissão de 20Kbps, 40Kbps e 250Kbps. Este padrão utiliza 27 canais distribuídos em diferentes áreas do espectro ISM: *Industrial, Scientific and Medical*. Um canal está disponível em 868MHz, 10 canais separados entre si por 2MHz disponíveis a partir de 902MHz a 928MHz. Além disso, há 16 canais a partir de 2,4GHz a 2,4835GHz separados entre si a cada 5MHz como mostra a Figura 9.

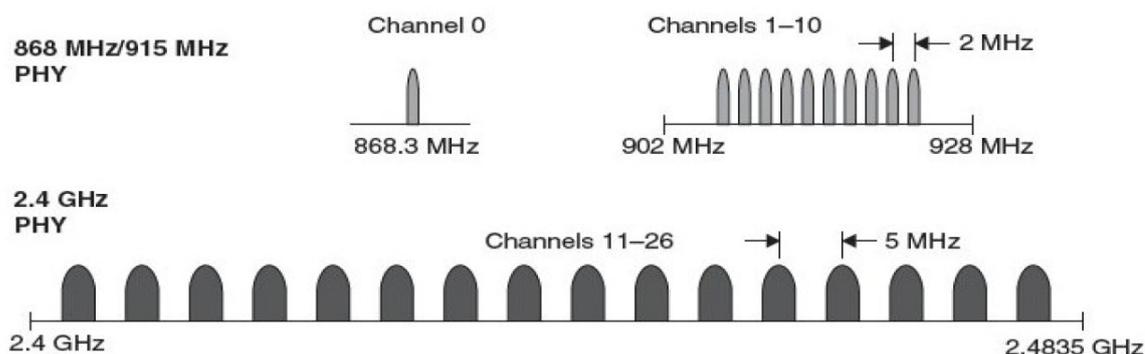


Figura 9 – Canais IEEE 802.15.4 na banda ISM (PHY - Camada Física).

Fonte: (CASAGRANDE et al., 2019)

Para a faixa de 2,4GHz o método de modulação utilizado para o padrão IEEE 802.15.4 é o O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*). Já para as faixas 868MHz e 915MHz a modulação utilizada é a BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) como mostrado na Tabela 1. Em ambos os casos, (CASAGRANDE et al., 2019) diz que o espalhamento de espectro direto (DSSS) é utilizado para minimizar a perda de dados devido a interferências e ruídos.

Tabela 1 – Parâmetros da Camada Física para redes IEEE 802.15.4

| PHY (MHz) | Parâmetros de espalhamento | | | Parâmetros de Dados | | |
|--------------|----------------------------|-------------------|-----------|-----------------------|-------------------------------------|-------------|
| | Frequência (MHz) | Taxa (Kchip/s) | Modulação | Taxa de Bit (kb/s) | Taxa de símbolos (ksímbolo/s) | Símbolos |
| 868/915 | 868-868.6 | 300 | BPSK | 20 | 20 | Binário |
| | 902-928 | 600 | BPSK | 40 | 40 | Binário |
| 2450 | 2400-2483.5 | 2000 | O-QPSK | 250 | 62.5 | 16 símbolos |

Fonte: (IEEE..., 2016)

2.1.6 Subcamada MAC

A subcamada MAC pertence à camada de Enlace de dados conforme o modelo OSI, a qual visa garantir a transferência confiável de dados entre sistemas conectados em um meio físico (OLIVEIRA et al., 2017). Nesse sentido, a subcamada MAC é responsável por praticar as regras definidas por um protocolo, que gerencia o meio compartilhado entre os nós da rede. Assim, o acesso de todos os nós da rede ao meio compartilhado torna-se possível.

Os serviços eventualmente oferecidos pela camada de enlace podem ser diferentes, a depender do protocolo utilizado. Os recursos da subcamada MAC são gerenciamento de *beacon*, acesso ao canal, gerenciamento de GTS, validação de *frame*, reconhecimento de entrega de *frame*, associação, dissociação e mecanismos de segurança para o protocolo definido por (IEEE..., 2016).

Há inúmeros protocolos de acesso ao meio utilizados em WBANs a depender da aplicação e da eficiência, que pode ser medida pelo tempo médio de atraso de um pacote e vazão média (OLIVEIRA et al., 2017). O tempo médio de atraso é o tempo entre o pacote ser gerado para transmissão e a chegada dele ao receptor. Já a vazão média é a razão entre o tráfego de dados recebido com sucesso e a capacidade máxima de transmissão do canal RF. (KUROSE, 2005) classifica os protocolos de acesso múltiplo em três categorias: protocolos de divisão de canal, protocolos de acesso aleatório e protocolos de revezamento.

2.1.6.1 Protocolos de Divisão de Canal

São técnicas de multiplexação utilizadas para dividir a largura de banda de um canal entre os nós que compartilham esse canal. Dentre os protocolos mais populares estão: TDMA, FDMA, CDMA. Em seguida será apresentada algumas informações sobre como esses protocolos operam.

TDMA

Time Division Multiple Access (TDMA) é o método de multiplexação do canal que utiliza quadros temporais para dividir o tempo de acesso de cada nó da rede ao canal disponível. Assim, cada quadro temporal é atribuído a cada um dos N nós da rede. Dessa forma, quando um nó tiver um dado a enviar ele transmite os bits desse pacote apenas durante o tempo permitido pelo quadro temporal. O TDMA é vantajoso no que se trata de não haver colisões além de ser justo, pois todos os nós ganham a mesma velocidade de transmissão. Por outro lado, o fato da velocidade de transmissão ser travada, pode ser uma desvantagem em situações que um nó da rede é o único a enviar dados. Ademais, cada nó sempre tem de esperar a vez, mesmo quando outros nós não estão enviando pacotes de dados.

FDMA

Frequency Division Multiple Access (FDMA) tem semelhanças com o TDMA, mas no lugar de dividir o canal em quadros temporais, ele divide o canal em N frequências diferentes, atribuindo os N canais de frequência aos N nós da rede. Esse protocolo possui as mesmas vantagens do TDMA (evita colisões sendo justo). No entanto, ele possui uma desvantagem em comum que é a limitação da largura de banda, mesmo quando um único nó da rede deseja enviar dados.

CDMA

Code division multiple access (CDMA) é o protocolo por divisão de canal que utiliza códigos para atribuir o uso do canal a um dos N nós da rede. Cada nó da rede tem um código, que é utilizado para codificar a informação a ser enviada. Isso permite que os nós possam enviar simultaneamente suas informações, bastando apenas que os respectivos nós receptores tenham

os códigos para decodificar os dados, sem que interferências devido aos outros nós atrapalhem a transmissão.

2.1.6.2 Protocolos de Acesso Aleatório

O protocolo de acesso aleatório é bem distinto dos protocolos descritos anteriormente por não haver uma reserva do meio de transmissão. Assim, um nó transmissor sempre utiliza a taxa de total em bits por segundo do canal. O uso do canal ocorre de maneira aleatória, e se caso houver uma colisão a solução adotada é retransmitir os dados depois de um certo atraso de tempo definido pelo protocolo. Segundo (KUROSE, 2005) existem dezenas, se não centenas, desse tipo de protocolo de acesso aleatório. Em seguida serão abordados os mais usados.

Slotted ALOHA

Nesse protocolo, os nós são sincronizados entre si e os pacotes de dados possuem sempre o mesmo tamanho. No momento que há a necessidade de envio de dados cada nó simplesmente prossegue com a transmissão. A partir daí há duas possibilidades: sucesso (dado chegou ao nó destinatário) ou insucesso (ocorreu uma colisão e o dado não chegou ao destino). Em caso de sucesso nada mais precisa ser feito, já que o objetivo foi concretizado. Em caso de insucesso, o nó retransmitirá o pacote de dados em um intervalo de tempo que dependerá da probabilidade de transmissão p daquele nó específico. Como cada nó transmissor possui uma probabilidade p de retransmissão e, por consequência, uma probabilidade $(1-p)$ de pular o intervalo de tempo e não retransmitir, sempre há uma chance dos nós retransmitirem sem colisão.

Esse protocolo é bem simples e uma de suas vantagens é que um nó pode transmitir continuamente utilizando todo o canal. Por outro lado, dependendo no número de nós a eficiência do protocolo pode ser afetada por dois principais motivos: o tempo desperdiçado quando ocorrem as colisões e intervalos de tempo que coincidir de todos os nós evitarem de transmitir.

NÓS 1, 2 E 3 COLIDEM NO PRIMEIRO INTERVALO. O NÓ 2 FINALMENTE É BEM-SUCEDIDO NO QUARTO INTERVALO, O NÓ 1 NO OITAVO INTERVALO E O NÓ 3 NO NONO INTERVALO

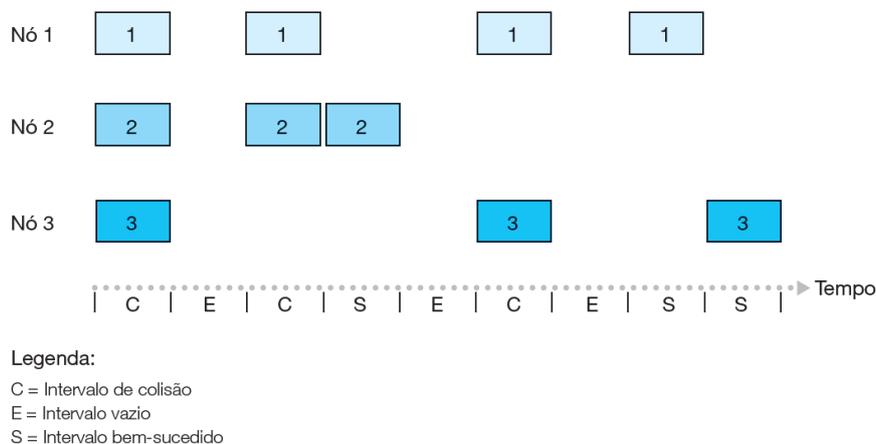


Figura 10 – Exemplo com 3 nós transmissores respeitando o protocolo *Slotted* ALOHA.

Fonte: (KUROSE, 2005)(Adaptado)

ALOHA

O protocolo ALOHA, também conhecido como ALOHA puro, é muito parecido com o *Slotted* ALOHA com a principal distinção de ser sem intervalos de tempo definidos e descentralizado. Isso significa que quando um nó deseja transmitir um dado ele apenas o faz, sem respeitar nenhum sincronismo em relação aos demais nós. Caso um pacote de dados sofrer uma colisão, o nó imediatamente fará a retransmissão com probabilidade p . Caso contrário, ele esperará por outra oportunidade de transmissão, e assim repetidamente. Por ser um protocolo descentralizado, o ALOHA puro possui metade da eficiência do slotted ALOHA (KUROSE, 2005).

TRANSMISSÕES INTERFERENTES NO ALOHA PURO

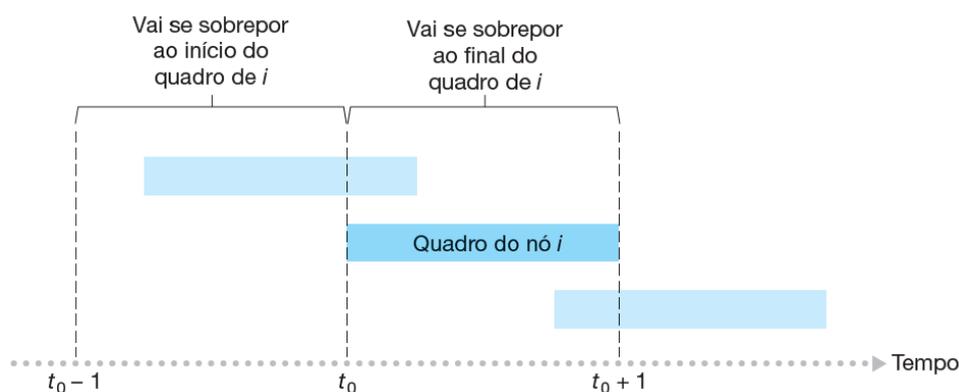


Figura 11 – Exemplo de colisão para protocolo ALOHA.

Fonte: (KUROSE, 2005)(Adaptado)

CSMA

Carrier Sense Multiple Access (CSMA) ou, também conhecido como, acesso múltiplo por detecção de portadora e suas derivações como CSMA/CD e CSMA/CA, são protocolos que têm como princípio básico a detecção de portadora. Em outras palavras, detecção de portadora nada mais é que a capacidade do nó de uma rede "escutar" o canal antes de transmitir para ver se há algum outro nó a utilizar o meio. Assim, o nó espera um tempo curto até que não detecte mais transmissões para então começar a transmitir.

Apesar de cada nó da rede estar sempre averiguando a disponibilidade do meio de transmissão, por vezes ocorrem colisões. Isso ocorre devido ao tempo que as informações de um nó demoram para alcançar os nós da rede, já que a transmissão não é instantânea. Ou seja, um nó A começa a transmitir agora e um nó B começa a transmitir t segundos depois, sendo que esse tempo t é menor que o período que os bits demoram para percorrer a distância entre o nó A e B. Dessa forma, o desempenho desse protocolo está diretamente ligado com o atraso de propagação fim-a-fim de canal (KUROSE, 2005).

CSMA/CD

Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection ou o mesmo que acesso múltiplo por detecção de portadora com detecção de colisão, é um protocolo que complementa o CSMA implementando a detecção de colisão. O CSMA percebe quando há algum nó a utilizar o canal e, por conseguinte, identifica colisões. Entretanto, esse protocolo não faz com que o nós suspendam o envio de dados depois que a colisão é percebida. Assim, o CSMA/CD cobre exatamente essa falha do CSMA, fazendo com que o nó, após detectar uma colisão, cesse a transmissão imediatamente. O cessamento da transmissão contribui para um melhor desempenho do protocolo comparado ao CSMA, já que não haverá a transmissão de um pacote inteiro inutilmente (KUROSE, 2005).

CSMA/CA

O CSMA/CA é um protocolo de acesso ao meio fruto de modificações no CSMA/CD, e é também o método mais utilizado em redes sem fio (OLIVEIRA et al., 2017). Diferentemente do CSMA/CD que apenas detecta colisões, este protocolo é configurado para reduzir a probabilidade de colisões. A estratégia adotada para isso é evitar as colisões ao máximo, daí o termo "*Collision Avoidance*" (Evitar Colisão). Dessa forma, o nó transmissor "escuta" o meio, e caso algum outro nó esteja transmitindo, ele não enviará o pacote de dados. A principal diferença entre o comportamento dos nós do CSMA/CA em relação ao CSMA/CD é que antes mesmo de começar a transmissão o nó verifica o estado do meio em relação aos demais nós. Por outro lado, um nó transmissor CSMA/CD tenta enviar primeiro o pacote para depois verificar se houve ou não colisão.

Um conceito importante do CSMA/CA é o tempo de *backoff* ou tempo de espera. Esse *backoff* são os intervalos de tempo pré definidos que cada nó espera depois que um nó inicia e conclua uma transmissão independentemente se houve ou não colisão. Ou seja, se o nó A está transmitindo os demais nós devem aguardar o tempo de espera (aleatório) para só então depois começarem a transmitir, caso o meio esteja livre. Depois que a transmissão ocorre o nó transmissor espera por um aviso de recepção com sucesso (ACK).

Em redes Wi-Fi, ou também conhecidas pelo protocolo IEEE 802.11, o CSMA/CA é implementado com dois pacotes de controle: RTS (*Request to Send* — solicitação de envio) e controle CTS (*Clear to Send* — pronto para envio). Esses pacotes RTS e CTS servem como mensagens que os nós trocam entre si para acontecer uma reserva do canal e assim um dos nós remetentes transmite tranquilamente evitando colisões. Então, antes de enviar dados, um nó remetente da rede escuta o meio, e caso o meio esteja livre ele envia uma mensagem RTS ao destinatário. No instante que o destinatário recebe o pacote RTS ele responde por difusão com um CTS para avisar o nó remetente que ele está autorizado a enviar e sinalizar aos outros nós para não enviar.

PREVENÇÃO DE COLISÃO USANDO OS QUADROS RTS E CTS

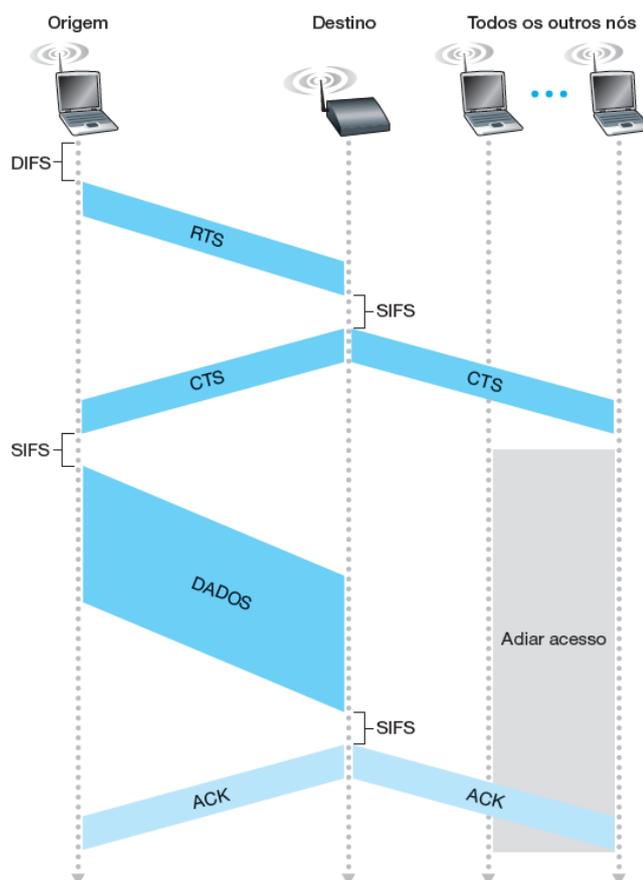


Figura 12 – Exemplo de prevenção de colisão para o protocolo CSMA/CA em uma rede Wi-Fi.

Fonte: (KUROSE, 2005)(Adaptado)

2.1.6.3 Protocolos de Revezamento

Existem dezenas de protocolos de revezamento e cada um deles podem ter muitas variações. O mais famoso deles é o protocolo *Polling*. Nesse protocolo um dos nós da rede é configurado como nó mestre e este nó seleciona por alternância circular cada um dos nós para eles enviarem informações. Segundo (KUROSE, 2005) esse protocolo elimina o problema das colisões e intervalos de tempo vazios sem transmissões, fazendo com que ele seja bem mais eficiente. No entanto, essa estratégia introduz o atraso de seleção. O atraso de seleção é o tempo que o nó demora a ser notificado que pode transmitir. Esse atraso de seleção é péssimo quando, por exemplo, apenas um nó da rede de fato tem informações a transmitir. Outra desvantagem é que a toda a rede depende do nó central e, devido a esse fato, corre riscos de não funcionar caso algum problema ocorra com o nó central.

2.2 Rastreamento Inercial

No que tange o rastreamento corporal humano, existem alguns conceitos teóricos importantes a serem entendidos como, por exemplo, caracterização dos movimentos do corpo considerando-o um corpo rígido com os seus respectivos graus de liberdade. Além disso, para que os sensores inerciais sejam utilizados adequadamente é relevante revisar alguns conceitos sobre o funcionamento e tecnologias relacionadas a eles. Alguns desses tópicos serão comentados a seguir.

2.2.1 Cinemática Direta

Cinemática é o ramo da física que descreve os movimentos dos corpos rígidos sem considerar a dinâmica e as forças que os causaram. A análise cinemática envolve a descrição do movimento a determinar velocidade, distância percorrida e a alteração na configuração dos segmentos e articulações do corpo. Um exemplo é a observação do movimento das pernas de um corredor, a velocidade e aceleração durante o percurso corrido.

De acordo com (HAMILL, 1999), o corpo humano possui seis graus de liberdade, isto é, seis movimentos básicos são desempenhados pelas articulações do corpo. Quando se trata de movimento articular, a literatura traz como "posição inicial"(ou base) a posição que o corpo humano está na vertical com a cabeça virada para a frente, palmas da mão viradas em direção ao tronco, braços ao lado do tronco, pernas juntas e os pés voltados para frente.

Considerando os seis graus de liberdade do corpo humano, podemos separar 3 pares de movimentos básicos sendo eles: flexão e extensão, abdução e adução, rotação interna e rotação externa. Além disso, existem outros movimentos especiais relacionados a parte específicas do corpo como o caso da pronação e supinação (HAMILL, 1999).

De forma geral o corpo humano pode ser representado por um sistema de segmentos

ligados por articulações. A tomar como exemplo o braço humano, o qual tem três articulações principais (ombro, cotovelo e punho) ligados por dois segmentos (braço e antebraço). Dito isso, o rastreamento dos movimentos do corpo pode ser feito posicionando sensores inerciais ao longo dos segmentos do corpo como mostrado na Figura 13.

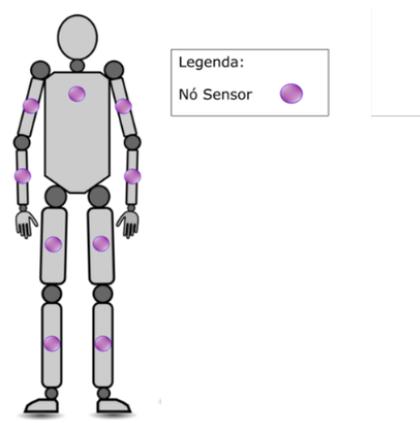


Figura 13 – Esquema exemplificando o posicionamento de nós sensores ao longo dos segmentos do corpo humano.

Fonte: Autor

2.2.2 Sensores Inerciais

Sensores inerciais são dispositivos sensíveis ao efeito da ação de forças capazes de mudar o estado inercial dos sistemas MEMS que o constitui. Assim, os sensores inerciais monitoram variações de velocidade e aceleração de maneira indireta ou direta. Ademais, essas grandezas medidas podem ser lineares ou angulares, que, após capturadas por um transdutor, são convertidas em sinal elétrico. Esse sinal elétrico, após ter sido submetido a processos de filtragem, lineares e não lineares, resulta em uma estimativa do sinal de entrada tendo como resultado um valor calibrado da aceleração e velocidade angular.

No circuito integrado (CI) de cada sensor inercial existem micro transdutores mecânicos, os quais fazem o sensoriamento. Somado a eles, também se encontram componentes microeletrônicos dentro do CI, que são destinados a fornecer sinais elétricos analógicos proporcionais às forças que o sensor é submetido. Em certos sensores inerciais, normalmente os mais caros, há dispositivos extras, responsáveis por fornecer o sinal já digitalizado, filtrado e processado.

Acelerômetro e giroscópio são os principais dispositivos nos quais os sensores inerciais são baseados. Normalmente, medições feitas pelas IMUs usam magnetômetros como complemento para incrementar a qualidade e precisão dos sensores inerciais. Com a união desses três sensores os dispositivos passam a ser referidos como MIMUs e conseguem medir campo magnético, aceleração, velocidade, posição e orientação do sensor.

Os sensores inerciais com o funcionamento baseado em MIMUs possuem erros de medições devido ao fato da aquisição de dados não ser perfeitamente contínua. Por esse motivo, quanto maior for a taxa de amostragem do sensor melhor será "noção temporal" passada ao usuário. No entanto, como é impossível ter uma taxa de amostragem tendendo ao infinito, isto é contínua, as medições perdidas entre uma amostra e outra fazem com que o sistema acumule erros.

Normalmente os sensores inerciais são baseados, principalmente, no uso de acelerômetro e giroscópio pelo motivo que um compensa as limitações do outro. Ainda, é importante distinguir que o intuito do giroscópio é caracterizar movimentos executados rapidamente, ao passo que o acelerômetro é destinado a caracterizar movimentos contínuos.

A principal limitação do acelerômetro é o fato de ele não medir exclusivamente componentes lineares de aceleração. Em outras palavras, se o acelerômetro for submetido a um giro em torno de seu centro de massa ele medirá as componentes angulares de aceleração mesmo com a ausência de aceleração linear. Por outro lado, os valores medidos por ele, não experimentam erros cumulativos.

Os giroscópios fornecem valores de velocidade angular que, a longo prazo, apresentam erros cumulativos conhecidos como *drift*. O *drift* existe devido à necessidade de integração dos valores de velocidade angular para obter os ângulos de rotação. Logo, depois de um tempo de aquisição considerável, a aferição feita apenas pelo giroscópio deriva do valor real. Daí, o acelerômetro corrige a deriva do giroscópio e o giroscópio restringe a sensibilidade do acelerômetro em relação a acelerações não lineares.

Mesmo implementados em conjunto, acelerômetro e giroscópio, ainda apresentam ao redor do eixo de força gravitacional uma deriva da posição angular. Por conseguinte, em alguns sistemas é adicionado o magnetômetro. O magnetômetro consegue indicar a direção do norte magnético da Terra, solucionando a invariabilidade do vetor aceleração para rotações sobre o eixo gravitacional.

2.2.2.1 MEMS

O acrônimo MEMS refere-se a *Micro Electro Mechanical Systems* ou sistemas microeletromecânicos. Esses sistemas são utilizados para diversos fins como parte de inúmeros dispositivos como, por exemplo, celulares. Os sistemas microeletrônicos são um recurso interessante para o desenvolvimento de muitos dispositivos graças a união de microeletrônica a base de silício com a micro usinagem.

Em outras palavras, através de técnicas de microfabricação, micro usinagem e manipulação de silício é feita a integração de estruturas mecânicas com sensores e atuadores. Essa combinação de técnicas e estruturas resultam em sistemas, como sensores inerciais, em escala micrométrica. O diferencial dos sistemas MEMS é a capacidade de considerar as propriedades mecânicas e elétricas de circuitos integrados.

Muitos dispositivos baseados em MEMS são micro sensores, os quais conseguem fazer detecções de grandezas mecânicas, térmicas, magnéticas, eletromagnéticas ou químicas e converte-las proporcionalmente em um sinal elétrico. Os acelerômetros e giroscópios, amplamente utilizados para medições feitas por sensores inerciais, são micro sensores mecânicos, por exemplo.

2.2.2.2 Acelerômetro

Os acelerômetros são sensores mecânicos sensíveis a variações de aceleração, ou mais detalhadamente, aferem a aceleração linear na direção de um eixo de referência. O sinal de saída de um acelerômetro são valores de aceleração em uma ou mais direções.

Em um acelerômetro há uma massa de prova de silício suportada por molas de silício. Conectado a essa massa de prova existem eixos fixos e eletrodos móveis como mostrado na Figura 14. Quando o acelerômetro é submetido a uma variação, os eletrodos móveis terão a sua distância em relação aos eixos fixos variada pelo princípio da inércia. A variação dessa distância altera as capacitâncias $C1$ e $C2$, fazendo com que elas não sejam mais de mesmo valor como quando em repouso. A depender do sentido e intensidade das forças atuantes no acelerômetro a diferença de capacitância entre $C1$ e $C2$ irá variar. Esse valor capacitivo após ser processado resultará no valor de aceleração medido.

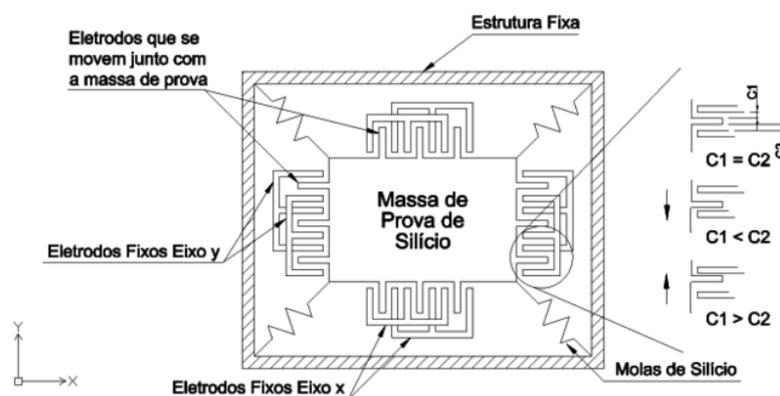


Figura 14 – Estrutura de um acelerômetro de dois eixos.

Fonte: adaptado de (TORRES, 2020)

2.2.2.3 Giroscópio

Os giroscópios medem a orientação de um objeto baseado-se na conservação de momento angular. Especificamente, giroscópios baseados em dispositivos MEMS, podem ser construídos como mostrado na Figura 15. Essa construção utiliza microestruturas sensíveis a vibrações, dentre elas uma massa de prova que oscila em apenas uma direção. A estrutura da massa de prova são dois conjuntos de mola de silício. As molas do tipo K_x permitem mobilidade da massa de prova na direção do eixo x . Por outro lado, as molas K_y permitem vibrações na direção

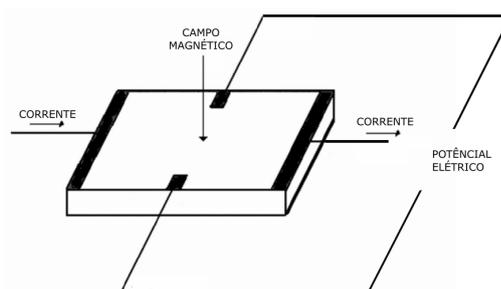


Figura 16 – Esquema mostrando a configuração do efeito Hall.

Fonte: adaptado (MAGNO; ANDRADE; ARAUJO, 2010)(adaptado)

2.3 Estado da Arte e Dispositivos Comerciais

Existem vários produtos comerciais disponíveis no mercado destinados ao rastreamento inercial. O *Xsens MVN Analyze* da *Intersense* é um exemplo, que opera baseando-se em IMUs capazes de rastrear em 3 graus de liberdade. Esse produto captura informações através de três sensores (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro) e fornece a orientação do corpo (*yaw*, *pitch*, e *roll*) a partir da integração da variação angular. Algumas das vantagens desse equipamento são: baixa latência de dados, alcance ilimitado e rastreamento livre de *jitter*. Além disso, a empresa oferece com o produto um programa com uma interface gráfica, a ser utilizado durante o rastreamento de movimentos, o que facilita muito o uso do produto.

O *Xsens MVN Analyze*, segundo (XSENSTECH, 2021), é um dispositivo sem fio capaz de capturar movimentos de todo o corpo humano, fácil de utilizar e com bom custo benefício. Esse sistema é totalmente portátil e sem limitações de volume de medição, a não ser devido às limitações do alcance da comunicação sem fio. Além disso, o *MVN Analyze* possui um sistema interpretação de dados em imagem sincronizado ao sistema cinemático de medição inercial e gráficos gerados instantaneamente a partir dos dados coletados.

A unidade de medição inercial do sistema *Xsens MVN Analyze* é chamada *Motion Tracker (MTx)*, a qual tem o funcionamento baseado unidades miniaturizadas de medição inercial sendo elas: acelerômetros linear 3D, giroscópios 3D, magnetômetros 3D e um barômetro. Cada unidade *MTx* é posicionada no corpo, por meio de um traje, em localizações estratégicas para serem feitas medições do movimento de cada segmento corporal como observado na Figura 17.

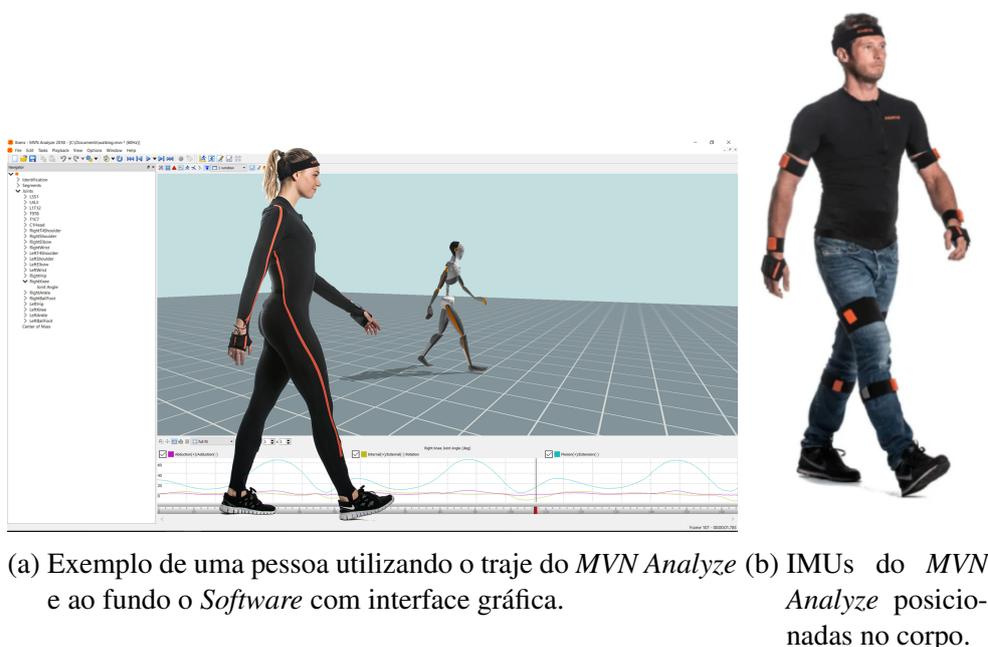


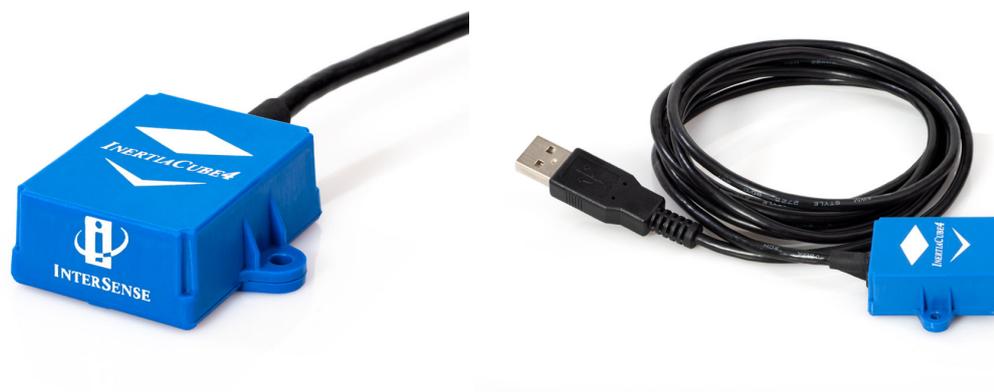
Figura 17 – Sistema de rastreamento inercial *MVN Analyze*.

Fonte: (XSENS, 2021)

Esse equipamento possui várias vantagens como, por exemplo, uma boa precisão graças ao uso de um modelo biomecânico comprovado e algoritmos de fusão de sensor. Esses algoritmos garantem a análise de movimento da mais alta qualidade, mesmo nos ambientes com perturbações magnéticas mais desafiadores (XSENS, 2021). Ainda, segundo (XSENS, 2021), o sistema *MVN Analyze* é facilmente configurável, calibrável e também conta com uma interface intuitiva e recursos de visualização em tempo real. Esses motivos fazem com que ele tenha sido utilizado em várias pesquisas (RIBEIRO et al., 2020), (WOUDA et al., 2021), (REFAI et al., 2020).

É inegável a quantidade de vantagens oferecidas pelo produto, mas há também desvantagens, a citar o preço nada acessível do equipamento, que começa em 3790 dólares americanos. Outra desvantagem é a infraestrutura e configuração em *hardware* utilizada para o funcionamento do sistema, que inclui muitos equipamentos. Assim, mesmo a empresa alegando ser um produto de fácil utilização, a complexidade do sistema poderia ser um problema para que pessoas com menos, ou nenhum, conhecimento técnico usassem o produto sem o auxílio de um profissional especializado.

InertiaCube4 (INTERSENSE, 2012) é outro exemplo de dispositivo comercial utilizado para análise de movimento humano, além de simulação e treinamento, realidade virtual e aumentada, captura de movimento e robótica. A tecnologia desse dispositivo é baseada em sistemas MEMS de 3 graus de liberdade e utiliza algoritmos de filtragem avançados (filtros de Kalman) (INTERSENSELLC, 2021).



(a)

(b)

Figura 18 – Fotografias do sensor *InertiaCube4*.Fonte: ([INTERSENSELLC, 2021](#))

O *InertiaCube4* detecta a taxa angular de rotação, gravidade e campo magnético terrestre ao longo de três eixos perpendiculares. A partir da integração das taxas angulares são obtidas as orientações *yaw*, *pitch*, e *roll* do sensor. De modo a evitar o *drift* do giroscópio, algoritmos avançados de fusão utilizam as medições do gravitômetro e do magnetômetro ([INTERSENSELLC, 2021](#)).

Segundo a empresa fabricante, *InterSense*, algumas vantagens do *InertiaCube4* são: latência de dados muito baixa, alcance ilimitado, calibração precisa de fábrica, rastreamento suave e sem *jitter* e o uso de algoritmos de compensação magnética estática e dinâmica.

Mesmo sendo cerca de um terço do valor, comparado ao *Xsens MVN Analyze*, o *InertiaCube4* ainda não pode ser considerável acessível por também estar na casa dos milhares de dólares americanos. Outra desvantagem do equipamento é o fato que cada IMU é conectada ao computador por um cabo, como mostrado na Figura 18b, o que o torna não tão prático de ser utilizado em muitas aplicações.

Baseado nas informações discutidas ao longo das seções do capítulo 2, no capítulo seguinte será apresentado qual foi o sistema proposto para execução do rastreamento dos movimentos corporais, bem como os detalhes de configuração do mesmo.

3 PROPOSTA DE UMA WBAN PARA O RASTREAMENTO INERCIAL

Nesse capítulo serão apresentadas as principais informações a respeito do modelo implementado para o rastreamento inercial utilizando a arquitetura de uma WBAN. O modelo proposto buscou ser o mais adequado possível as necessidades da aplicação propostas pelo trabalho, isto é, o rastreamento dos membros superiores durante a reabilitação de pacientes pós AVE. O rastreamento é feito usando sensores inerciais de 3 graus de liberdade, que fornecem como dados as coordenadas tridimensionais de um acelerômetro, um giroscópio e um magnetômetro. Para que a aquisição de dados pelos sensores inerciais, o envio e recebimento dos dados fossem executados na velocidade mínima desejada a rede foi estruturada baseando-se em alguns conceitos, que serão discutidos ao longo desse capítulo. Essas informações foram divididas em seções, abordando: a topologia de rede, as definições dos tipos de nós da rede, os protocolos implementados e os experimentos de validação.

3.1 Topologia de Rede

A WBAN de sensores inerciais foi embasada na utilização da topologia de rede Estrela, tendo dois tipos de nós: nó sensor (NS) e nó central (NC). Essa escolha se justifica por três motivos, sendo o primeiro deles o fato das informações capturadas por cada NS ter o mesmo grau de importância na rede, já que a união dessas informações descreverão os movimentos executados. Assim, a hierarquia entre os NSs é a mesma, já que não há diferença de prioridade entre as informações coletadas por cada sensor. O segundo motivo é que todos os NSs estão próximos e em um mesmo raio de distância do NC, excluindo então a necessidade de um nó roteador, como implementado na topologia *Cluster* por exemplo. Por fim, não há a necessidade de troca de informações entre NSs, apenas entre NC e NS.

Os NSs podem ser posicionados em vários pontos estratégicos do corpo, como pode ser visto na Figura 19. A quantidade de NSs pode variar conforme o objetivo e complexidade do rastreamento, como, por exemplo, capturar os movimentos do corpo todo ou capturar movimentos de partes específicas (braço direito, braço esquerdo, membros inferiores e outros). Para a captura do movimento de um dos braços são necessários no mínimo dois NSs, um posicionado entre o ombro e o cotovelo e outro entre o cotovelo e o punho, além de um NC parado em cima de uma mesa conectado ao computador, como observado na Figura 19. Os sensores inerciais normalmente não são colocados em cima das articulações, pois esses pontos do corpo se movimentam bem mais que os segmentos entre eles. Assim, para obter uma descrição mais limpa do movimento ou menos ruidosas, é preferível posicionar os sensores ao longo dos segmentos corporais.

A escolha da topologia estrela permite conseqüentemente que a rede opere com a taxa de transferência total do canal, considerando que a comunicação sempre será ponto-a-ponto entre NS e NC.

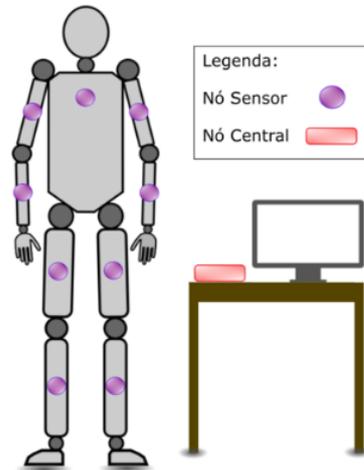


Figura 19 – Esquema exemplificando o posicionamento de nós sensores no corpo.

Fonte: Autor

3.2 Nó Central (NC)

O NC é o nó concentrador da rede e tem como funções: controlar a aquisição de dados feita pelos nós sensores, comandar o envio de informações entre os nós, concentrar os dados recebidos dos NSs e enviá-los para o computador via USB. Para isso, ele é constituído de: um microprocessador STM32 modelo NUCLEO-F767ZI e um rádio transceptor da *Nordic Semiconductor* modelo nRF24L01 (SEMICONDUCTOR, 2007). Dessa forma, o rádio transceptor se encarrega de fazer a comunicação sem fio e o microprocessador é o responsável por toda a parte de controle e processamento de dados embarcado. O microcontrolador STM32 é responsável por receber os dados vindos dos NSs e salvá-los em um *buffer* de tamanho igual a 5 vezes o tamanho de dados recebido por cada NS. Depois, quando esse *buffer* de dados vindo dos N sensores inerciais encher, ele é repassado ao *software* de aplicação em Python utilizando a interface USB. Esse *buffer* foi implementado para que a quantidade de bytes por segundo enviados a USB fosse maior, evitando assim que 19 bytes (tamanho do *payload* de dados) fossem enviados a USB sempre que o NC recebesse dados inerciais de cada NS.

3.3 Nó Sensor (NS)

Cada NS tem como função capturar os dados inerciais, receber comandos do NC e enviar os dados adquiridos quando requisitado. O conjunto do NS conta com um rádio transceptor

da *Nordic Semiconductor* modelo nRF24L01, um STM32 modelo F103C8T6 e um sensor inercial modelo ICM20498 da *Invesense* ([SEMICONDUCTOR, 2010](#)).

O sensor inercial é o dispositivo usado para captura de informação referente ao rastreo 3D do corpo. O rádio transceptor é responsável por receber comandos do NC e transmitir ao NC, sem fio, as informações repassadas vindas do sensor inercial. Ele possui um microcontrolador incumbido de executar o *firmware* da aplicação. Esse *firmware* foi escrito de maneira a requisitar 18 bytes de dados do sensor inercial e guardá-los em um *buffer* na memória temporária. Assim, o intuito *dobuffer*, de tamanho igual a 5 posições de 18 bytes, é salvar temporariamente os dados amostrados evitando que eles não se percam até o momento que forem requisitados pelo NC. Além disso, o microcontrolador recebe e interpreta comandos capturados pelo rádio. Outra função desempenhada por ele é enviar ao rádio os dados salvos no *buffer* quando é recebido do NC comando de requisição de envio de dados.

Como mencionado anteriormente, o sensor inercial tem como saída as coordenadas tridimensionais do x, y e z do acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, portanto 9 eixos. Cada dado referente a um eixo tem tamanho de 2 bytes, o que explica o fato do tamanho total dos dados amostrados salvos no *buffer* ser de 18 bytes. A taxa de amostragem desses dados é de 100Hz, simultaneamente, para todos os sensores.

Para ser possível ter uma ideia mais objetiva da configuração de cada nó da rede, é mostrado na Figura um esquema inspirado no que foi exposto a respeito dos nós da rede.

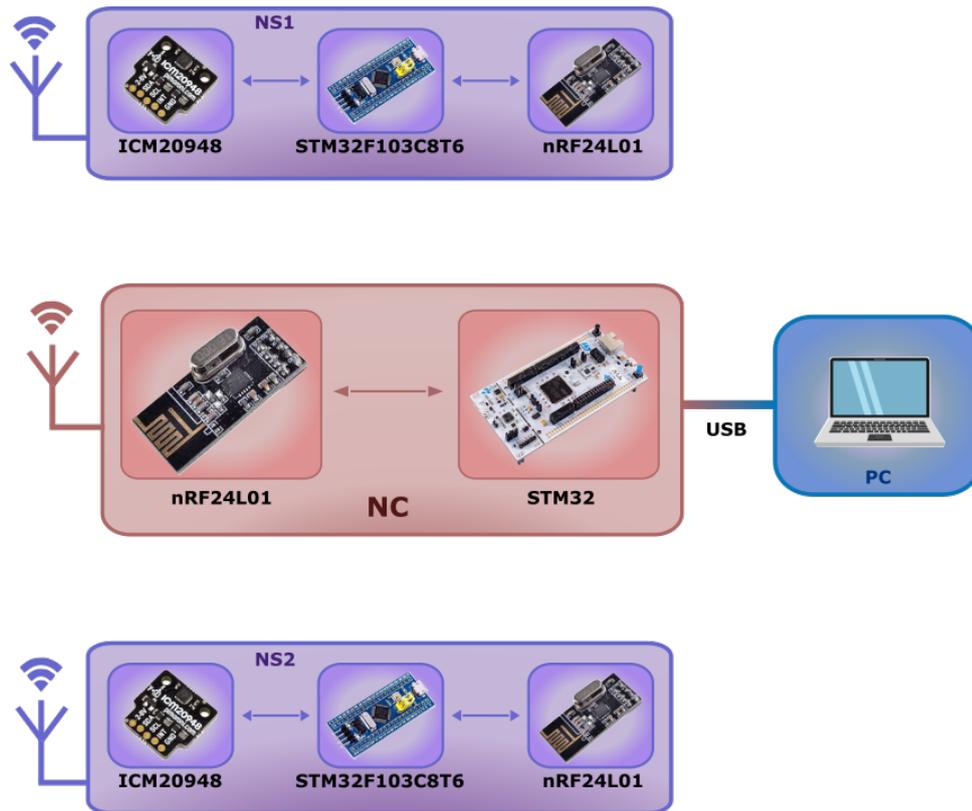


Figura 20 – Esquema mostrando: os elementos de hardware constituintes de cada nó, a relação entre os nós da WBAN e a ligação do NC via USB ao computador.

Fonte: Autor

3.4 Protocolo de rede

Foram utilizados dois protocolos de rede sendo eles o protocolo nativo do rádio nRF24L01, *Enhanced ShockBurst™*, e o protocolo do próprio autor. O protocolo *Enhanced ShockBurst™* garante os serviços prestados pela camada PHY e subcamada MAC. Já os serviços da camada de aplicação foram garantidos pelo protocolo de troca de informações. Ambos os protocolos foram configurados de modo a garantir que: o NC se comunicasse com os NSs, tanto por mensagens *broadcast*, quanto por mensagens endereçadas e que cada NS respondesse o NC com mensagens endereçadas. A ideia implementada foi fazer com que os NSs se comportassem como escravos do NC. Assim, os NSs só executam um comando ou mandam algum dado somente se o NC requisitar.

3.4.1 Protocolo *Enhanced ShockBurst™*

O transceptor de RF dos rádios, que tem o *Enhanced ShockBurst™* embutido, opera na banda de frequência ISM em 2.4GHz, utiliza a modulação GFSK e configurado com uma taxa de dados de 2Mbps no canal de frequência de $(2400 + 92)$ MHz. O protocolo em questão, o qual baseia-se em CSMA como protocolo da camada de enlace, dedica-se a montagem

e temporização automática de pacotes (SEMICONDUCTOR, 2010). Esse protocolo permite implementações de baixo consumo de energia e comunicação de alto desempenho. O *payload* dos pacotes trocados pelo protocolo, mostrados na Figura 21, foi configurado para ser usado com tamanho dinâmico entre 0 e 32 bytes. Essa escolha foi tomada já que o *payload* varia entre 2 bytes (quando há envio de comandos) e 19 bytes (quando há envio de amostras feitas pelo sensor inercial).

Cada rádio da rede foi endereçado, no modo estático, com o mesmo endereço de 3 bytes "0x787878", ou seja, ao nível de camada de enlace todos os nós da rede possuem o mesmo endereço. Essa estratégia foi adotada para que o NC conseguisse enviar mensagens do tipo *broadcast*, pois o protocolo *Enhanced ShockBurst™* originalmente permite apenas troca de mensagens do tipo *unicast*, sendo o canal *half-duplex*. Dessa forma, passamos a lidar com mensagens *broadcast* entre os rádios (camada de enlace) e mensagens endereçadas ou *broadcast* entre nós (camada de aplicação).

A escolha de implementação de endereços semelhantes para todos os nós da rede é de extrema importância para garantir o sincronismo da aquisição de dados. Dessa maneira, permitir que o NC envie em simultâneo, mensagens de controle de aquisição de dados para todos os NS da rede implica na inicialização/finalização síncrona da amostragem de dados inerciais pelos NS.



Figura 21 – Pacote do protocolo *Enhanced ShockBurst™*.

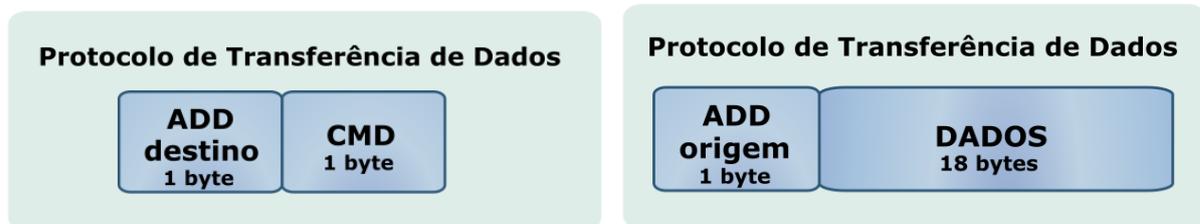
Fonte: Autor

3.4.2 Protocolo de Troca de Informações

O protocolo de troca de informações dita as regras pelas quais a rede é estruturada ao nível da camada de aplicação. É nessa camada que é definido como e quais são as mensagens trocadas entre os nós, e também o endereço de cada um deles. Os endereços atribuídos aos nós têm tamanho de 1 byte, sendo: 0x00 *broadcast*, 0x01 do NC, 0x02 do NS 1, 0x03 do NS 2 e assim por diante caso existam outros NS.

Existem dois tipos de fluxo de mensagens: do NC para os NSs e de um NS para o NC. A estrutura das mensagens é mostrada nas Figuras 22a e 22b. Quando o campo "ADD destino" é igual a 0x00 significa que a mensagem é *broadcast*, e se diferir de 0x00 a mensagem é *unicast* (endereçada a um nó específico). Quando ocorre na rede a troca de mensagens *unicast* é para o

caso que o NC requisita a algum NS que ele envie como resposta ao NC dados inerciais capturados. Ou seja, o protocolo em questão opera baseado no protocolo de revezamento *Pooling*, onde o NC faz sequencialmente a todos os NS um *pooling* por dados. Assim, conforme solicitado os NS respondem de maneira sequencial enviando os dados coletados. A princípio, o *pooling* é adequado a aplicação se considerado o número máximo de NS que pretende ser utilizado, mesmo não sendo o protocolo de acesso ao meio mais eficiente.



(a) Estrutura do tipo de mensagem enviada do NC para os NSs. (b) Estrutura do tipo de mensagem enviada dos NSs para o NC.

Figura 22 – Estrutura dos tipos de mensagens.

Fonte: Autor

O campo CMD refere-se ao comando a ser executado pelo NS a pedido do NC. Existem três tipos de comandos, os quais os códigos, nomes e descrição se encontram a seguir.

- **0x01 - Start Acquisition:** esse comando *broadcast* é enviado do NC para os NSs quando deseja-se iniciar a aquisição de dados do sensor inercial de cada NS simultaneamente. Os dados vindos do sensor inercial são salvos em um *buffer*, de tamanho 90 bytes, na memória temporária do STM32F103C8Tx em uma taxa de 100Hz. Esse *buffer* funciona baseado na estratégia de enfileiramento *First In First Out* (FIFO). Como o *buffer* possui espaço para 5 amostras de 18 bytes, é esperado que os dados salvos nele não sejam perdidos, considerando que a taxa de requisição de dados é no mínimo 200Hz.
- **0x02 - Stop Acquisition:** esse comando *broadcast* é enviado do NC para os NSs quando deseja-se parar simultaneamente a aquisição de dados feita pelo sensor inercial de cada NS. Isto é, não serão enfileiradas amostras de 18 bytes nos *buffers* de cada NS.
- **0x35 - Send Data:** esse comando *unicast* é enviado do NC para um NS para que o primeiro conjunto de 18 bytes de dados seja retirado da fila e enviados ao NC. Para o caso de uma configuração de rede com dois NS, esse *pooling* por dados ocorre a cada 2,5ms. Assim, cada NS recebe um comando "Send Data" a cada 5ms. Para configurações utilizando um número maior de NSs é preciso configurar a frequência de *poolings* feita pelo NC para valores maiores que 20Hz. O aumento na taxa de envio do comando "Send Data" é importante para garantir que as amostras salvas no *buffer* a cada 10ms não sejam perdidas. Outra alternativa complementar a esse problema seria aumentar a capacidade da FIFO de

cada NSs. No entanto, independentemente do tamanho desse *buffer* a taxa de retirada de dados sempre tem que ser maior que a taxa de amostragem de dados em cada NS.

3.5 Software de aplicação

Para ser possível avaliar se os dados amostrados e transmitidos pelos NSs e posteriormente recebidos pelo NC estavam corretos, foi desenvolvido um programa em Python como *software* de aplicação. O intuito do programa é ler em tempo real o conjunto de amostras enviadas pelo NC ao computador via USB.

Para isso, após executada a aplicação, sempre que o computador recebe via USB o bit de identificação do vetor de dados '\$' são lidos 95 bytes (5 amostras) e salvos em um vetor. O vetor de amostras lido contém bytes de indentificação correspondente a origem dos dados (NS1, NS2, etc). Então, a aplicação percorre esse vetor identificando a origem das amostras e executa os cálculos para obter os valores de aceleração gravitacional e velocidade angular a partir dos primeiros 9 bytes de cada amostra.

Conforme as amostras são varridas e as informações de cada NS calculadas, os valores de aceleração gravitacional e velocidade angular dos eixos x, y e z podem ser utilizados para serem analisados quantitativamente ou graficamente como será discutido a frente nos experimentos de validação.

3.6 Experimentos de Validação

Uma vez definido as características principais do projeto, as estratégias para garantir o funcionamento integrado de todas as partes do sistema e o *software* de aplicação, foram pensados alguns experimentos de validação que serão descritos a seguir.

3.6.1 Experimento 1: Um NS em comunicação com o NC

Na primeira etapa de experimentos para a validação do protótipo foi avaliado a digitalização sem perda da informação enviada de um NS ao NC. Ou seja, o experimento teve como um dos objetivos avaliar se os bytes de informação gerados no NS chegavam ao destino (aplicação) sem estarem corrompidos. Além disso, pretendeu-se também avaliar a latência no enlace entre os dois nós.

O experimento consistiu no envio de dados simulados, já que os objetivos eram avaliar se os dados chegavam corretamente em um intervalo de tempo adequado e analisar o comportamento em *real time* do sistema, não importando efetivamente a natureza dos dados. Os dados enviados pelo NS são dois números hexadecimais 0x33 e 0xAA. O NC foi configurado para enviar um comando de "Start Acquisition", e em seguida pedir 1 byte de dados do NS a cada 5ms enviando o comando "Send Data". O NS obedece ao primeiro comando recebido e começa

a guardar no *buffer* 100 bytes do número 0x33 e depois 100 bytes do número 0xAA. Consequentemente, o NS responde os primeiros 100 pedidos com amostras do número 0x33 e outros 100 pedidos com amostras referentes a 0xAA. Assim, a cada 2 segundos chegam 200 bytes de dados no NC, sendo 100 bytes do número 0x33 e 100 bytes do número 0xAA.

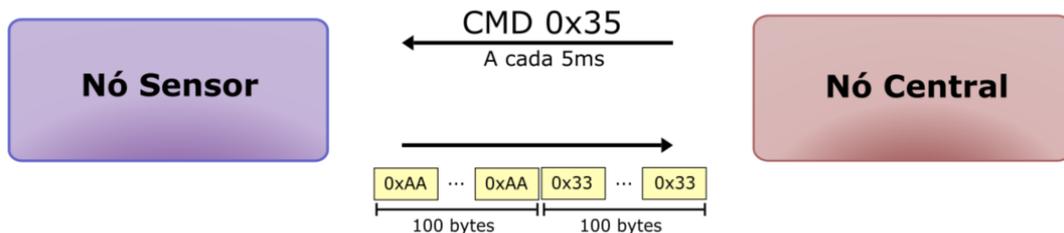


Figura 23 – Representação da comunicação feita entre os nós durante o experimento.

Fonte: Autor

Para avaliar se os valores numéricos 0x33 e 0xAA chegam corretamente ao NC, foi feita uma conversão dos dados numéricos em forma de gráfico. Após chegarem ao NC os valores numéricos são repassados ao *software* de aplicação, em linguagem de programação Python, executado no computador. Se o *software* recebe 0x33 deve ser plotado no gráfico o valor 1, e no caso de receber 0xAA deve ser plotado 0. Assim, espera-se que, conforme a chegada sequencial dos bytes, uma forma de onda quadrada seja construída como representado na Figura 24. Se a forma de onda der como esperado, significa que os dados chegam corretamente e dentro do intervalo de tempo esperado.

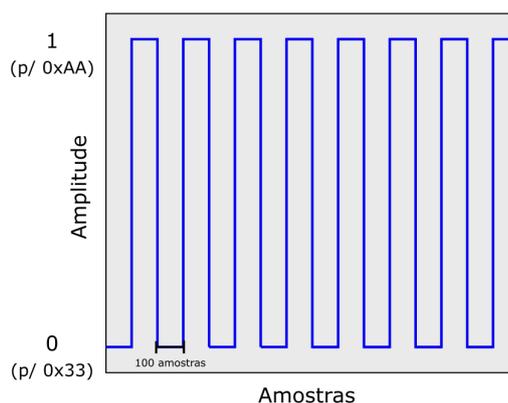


Figura 24 – Representação da forma de onda esperada após plotagem dos dados pela aplicação.

Fonte: Autor

A segunda fase do experimento diz respeito a latência do enlace, e teve como objetivo analisar com o osciloscópio qual a diferença temporal entre a transmissão do dado e o recebimento dele. Para isso foram configurados dois pinos de saída do STM32 de cada nó. O nível

lógico desses pinos variava conforme a transmissão ou recebimento dos valores numéricos 0x33 e 0xAA. Quando o NS transmite 0x33 o pino escolhido vai para 0, e para transmissão de 0xAA vai para 1. Da mesma forma, quando o NC recebe 0x33 o pino escolhido vai para 0, e para o recebimento de 0xAA vai para 1.

Com o auxílio de um osciloscópio os sinais desses dois pinos podem ser analisados, ligado ao canal 1 do osciloscópio o pino do NS e ao canal 2 o pino do NC. A alteração no nível lógico dos pinos a cada transmissão e recepção terá como resultado dois sinais como representado na Figura 25.

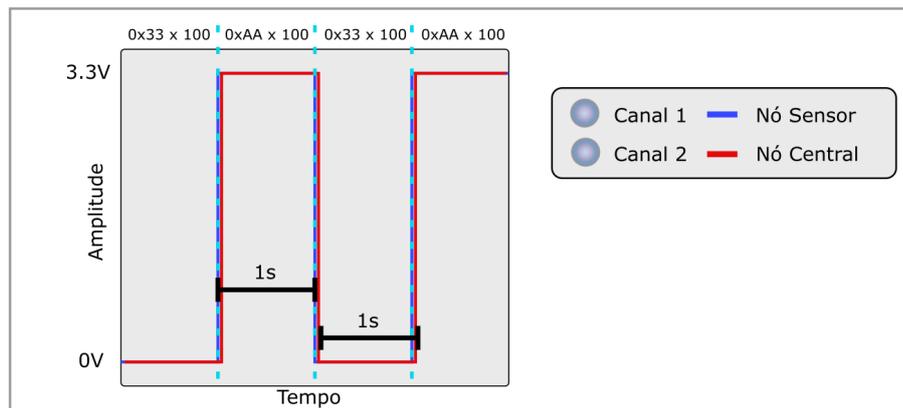


Figura 25 – Representação dos sinais esperados relacionados aos eventos de transmissão e recepção dos bytes.

Fonte: Autor

É esperado que esses sinais, apesar de parecerem, não estejam em fase. A diferença de tempo entre eles está relacionada ao quão adequado a latência da rede está para ela poder ser considerada com um tempo real.

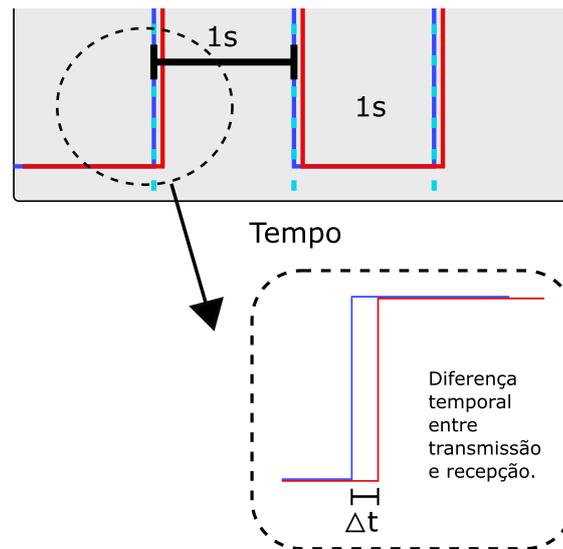


Figura 26 – Ampliação feita nos sinais representados pela Figura 25 mostrando a diferença temporal entre os sinais.

Fonte: Autor

3.6.2 Experimento 2: Dois NS em comunicação com o NC

O segundo experimento é semelhante ao primeiro, mas utilizando-se dois NS em comunicação direta com o NC, como mostrado na Figura 27. O primeiro intuito desse experimento é verificar se para dois NS os dados não são perdidos ou corrompidos. Isso pode ser feito analisando a forma de onda plotada conforme os dados repassados do NC para a aplicação. O resultado esperado é análogo ao resultado desejado referente a parte 1 da seção 3.6.1, porém duplicado já que há um NS a mais. Dois gráficos serão gerados pela aplicação, os quais devem ser algo como mostrado na Figura 28. O gráfico de número 2, mostrado na Figura 28, está relacionado aos dados recebidos pelo NC do NS 2, onde 1 representa bytes recebidos igual a 0x38 e 0 representa bytes de valor 0x32. Foram escolhidos os valores de 0x38 e 0x32 aleatoriamente com único intuito de fazer com que os nós enviados por cada NS fossem diferentes.

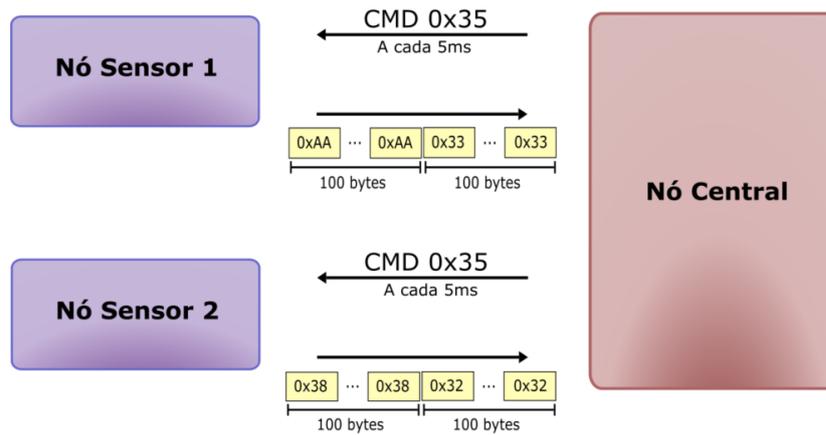


Figura 27 – Representação da comunicação feita entre os nós durante o segundo experimento.

Fonte: Autor

[figura 30 ta errada]

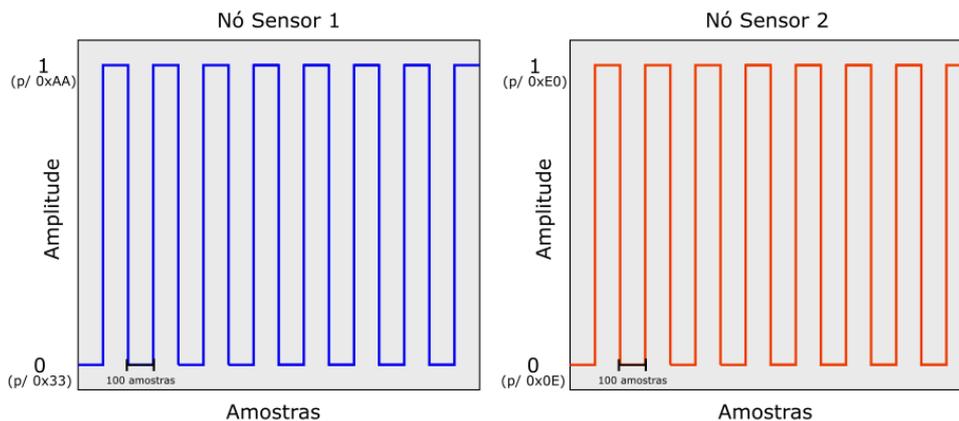


Figura 28 – Representação das formas de ondas esperadas após plotagem dos dados vindos de cada NS.

Fonte: Autor

Como neste experimento são usados dois NS espera-se os NSs respondam em simultâneo ao comando de início de aquisição o que por si só garante que as informações sejam amostradas de maneira síncrona pelos NSs. No entanto, a requisição de dados não é síncrona, por esse motivo foi pensada na segunda parte do experimento uma maneira de investigar a diferença tempo dos poolings sequenciais feito pelo NC ao NS. Para isso, foi usado o osciloscópio com o canal 1 ligado a um pino de saída do microcontrolador do NS 1 e o canal 2 ligado a um pino de saída do microcontrolador do NS 2. O nível lógico dos pinos altera-se segundo qual byte de dado os NS enviam. Para o NS 1 a relação de nível lógico e valor numérico se mantém como no experimento 1. Para o NS 2, quando ele envia 0x38 ao NC o nível lógico do pino de saída é 1 e para o envio de 0x32 nível lógico é 0.

O resultado esperado dessa aquisição feita com o uso do osciloscópio são dois sinais parecidos com o que é mostrado na Figura 29. Esses sinais possuem um defasamento temporal, o qual deve ser exatamente a diferença temporal entre os poolings de requisição de dados. Esse defasamento é mostrado com mais detalhes na Figura 30. Quanto menor for o defasamento dos sinais, maior taxa de requisição de dados feita pelo NC.

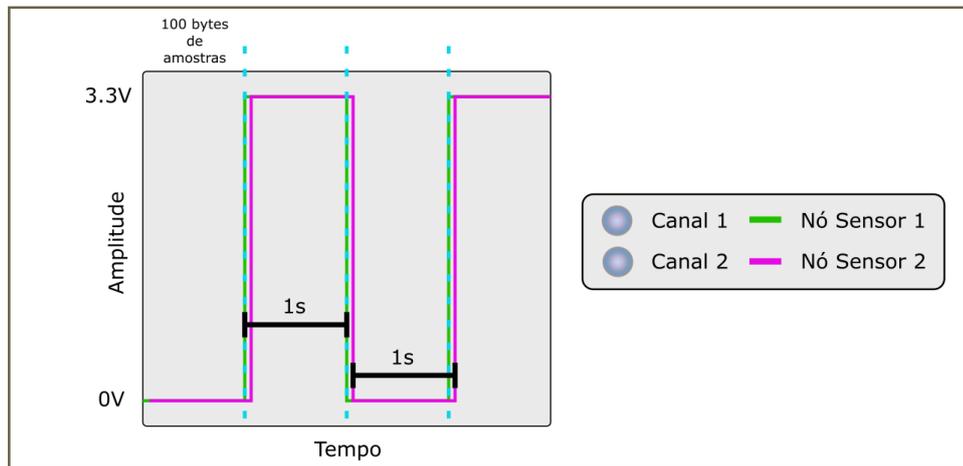


Figura 29 – Representação dos sinais esperados relacionados aos eventos de transmissão dos bytes para dois NS.

Fonte: Autor

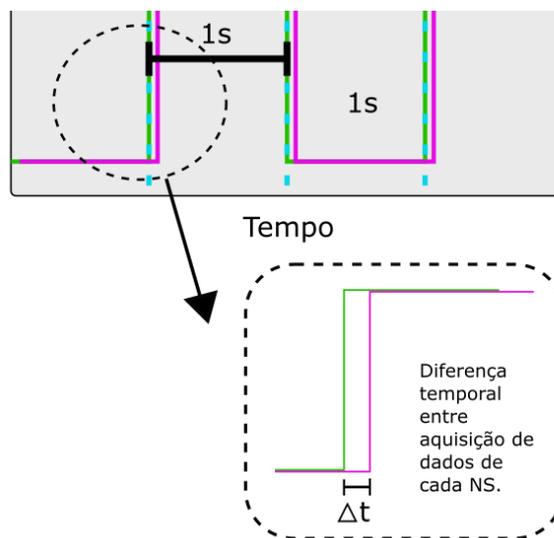


Figura 30 – Ampliação feita nos sinais representados pela Figura 29 mostrando a diferença temporal entre os sinais.

Fonte: Autor

3.6.3 Experimento 3: Dois NS em comunicação com o NC utilizando-se Dados Reais

Este último experimento visa mostrar que para 2 NSs, os quais transmitem dados dos seus respectivos sensores inerciais, é possível ver em tempo real os dados sendo plotados pela aplicação no computador. Assim, o que se espera é a plotagem dos dados de dois sensores inerciais. Os dados de cada sensor são 6 eixos correspondendo a X, Y e Z do acelerômetro e giroscópio.

Para verificar se os dados amostrados correspondiam com o desejado, foram feitos alguns movimentos com os sensores.

Movimento 1

Com um dos sensores inerciais acoplado a uma régua, e posicionado horizontalmente no eixo Z do acelerômetro, foram feitos movimentos alternando entre aproximadamente +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Z. O intuito foi avaliar se a aceleração gravitacional variava entre os valores de cerca de +/- 1G e, ao mesmo tempo, se para o eixo X do giroscópio, havia variação de velocidade angular, já que o movimento envolvia um giro em torno do eixo X do giroscópio. O outro sensor inercial também acoplado a uma régua encontrava-se parado posicionado horizontalmente em relação ao eixo Z de acelerometria.

Movimento 2

Com um dos sensores inerciais acoplado a uma régua, e posicionado horizontalmente no eixo Y do acelerômetro, foram feitos movimentos alternando entre aproximadamente +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Y. O intuito foi avaliar se a aceleração gravitacional variava entre os valores de cerca de +/- 1G e, ao mesmo tempo, se para o eixo X do giroscópio, havia variação de velocidade angular, já que o movimento envolvia um giro em torno do eixo X do giroscópio. O outro sensor inercial também acoplado a uma régua encontrava-se parado posicionado horizontalmente em relação ao eixo Z de acelerometria.

Movimento 3

Com um dos sensores inerciais acoplado a uma régua, e posicionado horizontalmente no eixo X do acelerômetro, foram feitos movimentos alternando entre aproximadamente +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo X. O intuito foi avaliar se a aceleração gravitacional variava entre os valores de cerca de +/- 1G e, ao mesmo tempo, se para o eixo Y do giroscópio, havia variação de velocidade angular, já que o movimento envolvia um giro em torno do eixo Y do giroscópio. O outro sensor inercial também acoplado a uma régua encontrava-se parado posicionado horizontalmente em relação ao eixo Z de acelerometria.

Movimentos com os sensores acoplados ao braço

A última fase do experimento 3 foi feita utilizando dois sensores inerciais localizados sobre o braço e o antebraço. Com o Sensor Inercial 1 acoplado ao braço próximo ao cotovelo e o Sensor Inercial 2 acoplado ao antebraço próximo ao punho, como mostrado da Figura 31, foram feitos alguns movimentos com o braço direito. Os movimentos incluíram: flexão e extensão de cotovelo, supinação e pronação de cotovelo e rotação interna de ombro. Conforme os movimentos foram executados os dados capturados por cada sensor inercial foram repassados em tempo real a aplicação e representados graficamente. O objetivo dessa parte do experimento foi verificar como o sistema comportava com os sensores devidamente posicionados ao membro superior direito e se quando o membro executava os movimentos os dados plotados eram compatíveis com o esperado em tempo real.

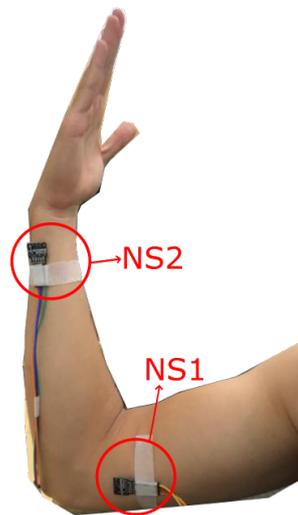


Figura 31 – Posição dos sensores inerciais no membro superior direito para a execução dos movimentos.

Fonte: Autor

4 VALIDAÇÃO E RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos discutidos no capítulo anterior. Todos os resultados foram obtidos a partir da montagem em *hardware* mostrada nas fotos da Figura 32. Foram utilizados no NC, como base para realização de todos os experimentos, a STM32 Nucleo e um rádio transceptor, como visto na foto mais à esquerda da Figura 32. À direita da Figura 32, mais acima é possível ver o conjunto do sensor inercial, rádio transceptor e STM32 do primeiro nó NS utilizado, e mais a baixo do outro NS utilizado.

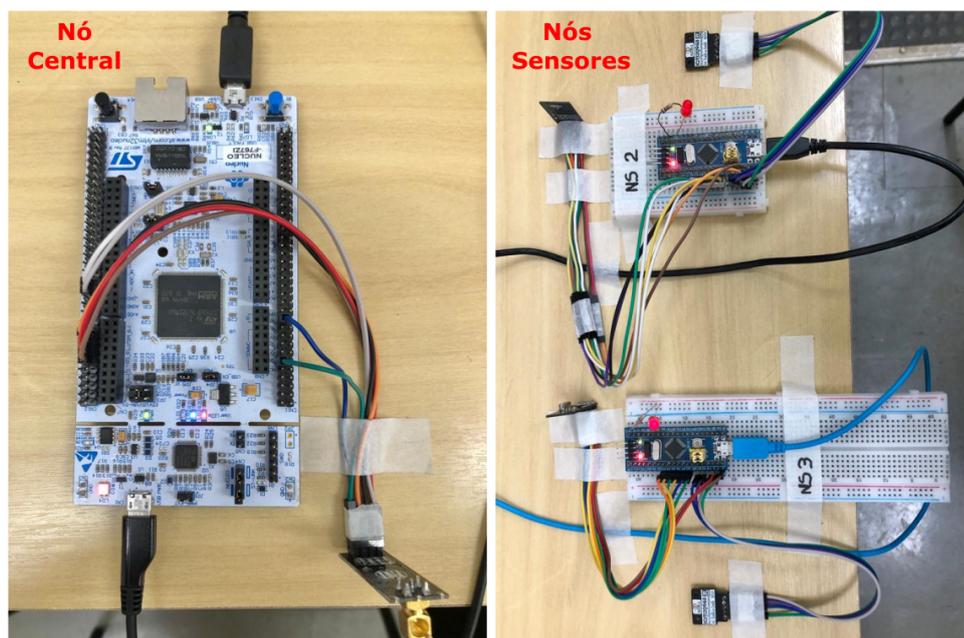


Figura 32 – Elementos da rede montados para execução dos experimentos com até dois NSs.

Fonte: Autor

4.1 Resultados do Experimento 1

O primeiro resultado referente ao experimento 1 é destacado na Figura 33, onde é mostrada a forma de onda sintética gerada, em tempo real, conforme as amostras de bytes dos números 0x33 e 0xAA chegavam ao computador vindos do NC.

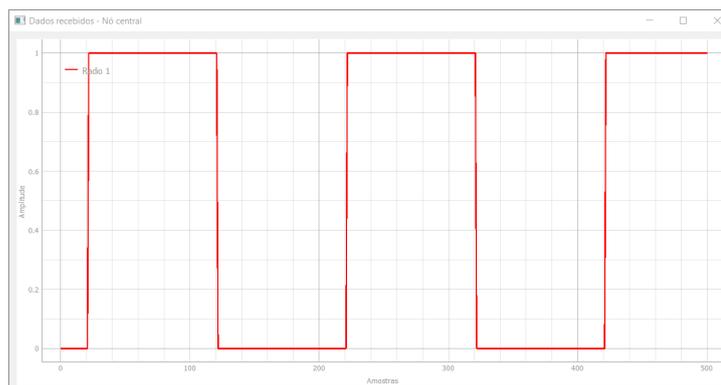


Figura 33 – Forma de onda gerada pela aplicação após plotagem dos dados vindos do NS.

Fonte: Autor

A Figura 34 mostra os sinais vindos dos pinos de saída do NS e do NC capturadas pelo osciloscópio. Depois, alterando a escala temporal do osciloscópio para $500\mu\text{s}$ foi possível visualizar as formas de ondas ampliadas. Como resultado dessa ampliação foi obtida a Figura 35, que mostra, com o auxílio dos cursores, a diferença temporal entre os sinais de $740\mu\text{s}$. Essa diferença era esperada, já que a defasagem da onda amarela em relação à onda verde representa o atraso entre a informação deixar o NS e ser recebida no NC. Grande parte desse intervalo de tempo é devido ao processamento envolvido na transmissão e recebimento por parte dos rádios transceptores e dos microcontroladores de cada nó.

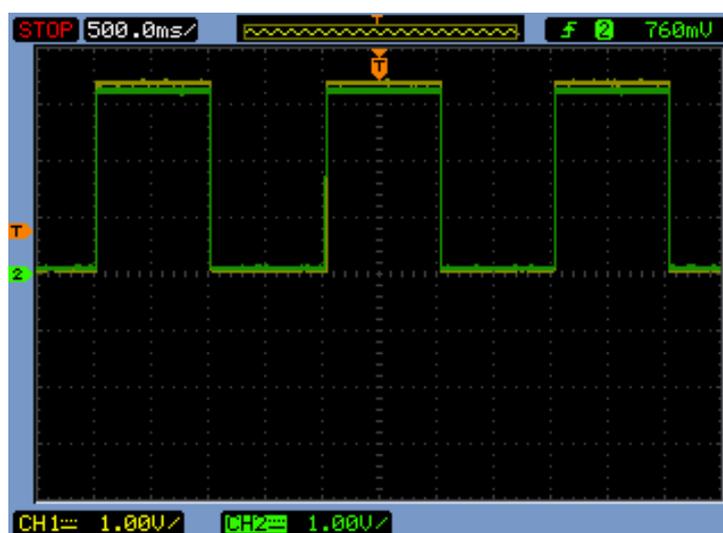


Figura 34 – Sinais gerados pelo NS e NC devido à transferência e recebimento de dados vistos no osciloscópio.

Fonte: Autor



Figura 35 – Ampliação feita nos sinais da Figura 34 mostrando a diferença temporal entre eles.

Fonte: Autor

4.2 Resultados do Experimento 2

A primeira parte do experimento 2 é destacada na Figura 36, que mostra as formas de ondas sintéticas construídas, em tempo real, conforme as amostras de bytes dos números 0x33 e 0xAA (origem NS 1) e 0x32 e 0xA8 (origem NS 2) chegavam ao computador vindos do NC. O resultado gráfico construído a partir dos dados recebidos mostra que os dados foram digitalizados, enviados e recebidos conforme a sequência e quantidade correta guardada no *buffer* por cada NS.

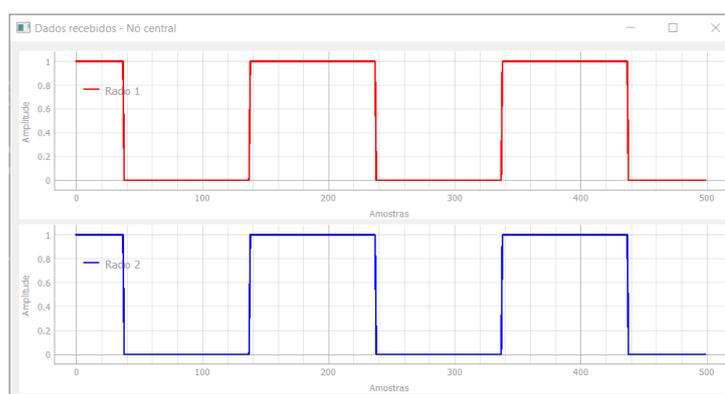


Figura 36 – Formas de onda geradas pela aplicação após plotagem dos dados vindos dos NSs.

Fonte: Autor

Em seguida, com o auxílio do osciloscópio foram capturadas as formas de ondas mostradas na Figura 37, onde se observam os sinais vindos dos pinos de saída do NS 2 e do NS 3. Depois, alterando a escala temporal do osciloscópio para 2ms foi possível visualizar as formas

de ondas ampliadas. Como resultado dessa ampliação foi obtida a Figura 38, onde se observa, com o auxílio dos cursores, a diferença temporal entre os sinais de 5,04ms. Essa diferença temporal era o valor esperado, considerando que o NC efetua poolings a cada 5ms em cada NS.

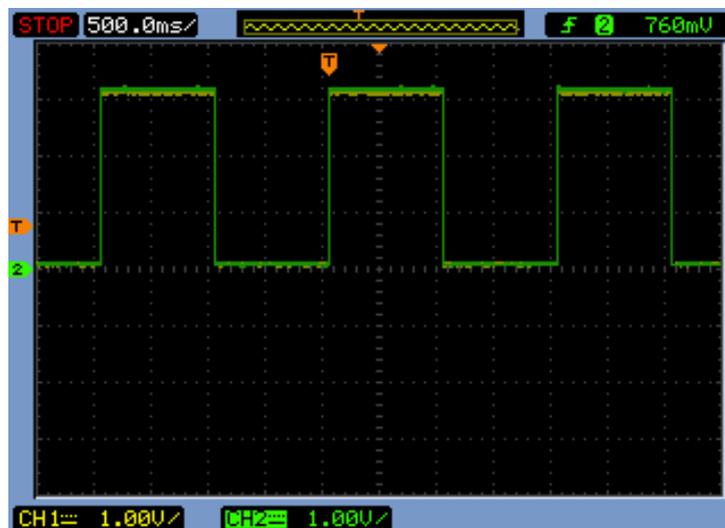


Figura 37 – Sinais gerados pelo NSs devido à transferência de dados vistos no osciloscópio.

Fonte: Autor

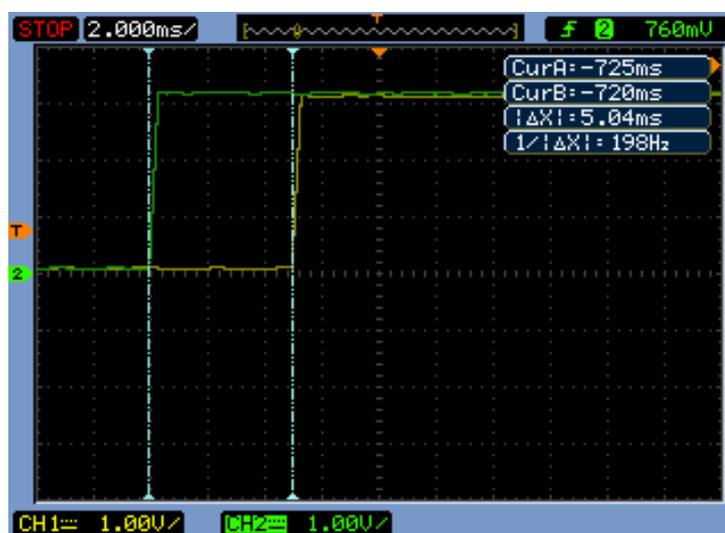


Figura 38 – Ampliação feita nos sinais da Figura 37 mostrando a diferença temporal entre eles.

Fonte: Autor

4.3 Resultados do Experimento 3

Durante o experimento 3 foram capturadas as respostas associadas a movimentos dos sensores inerciais, para diversas situações como descrito no capítulo anterior.

Movimento 1A

Na Figura 39 são mostrados quatro gráficos, sendo eles: 1 - dados do acelerômetro do NS1 (canto superior esquerdo), 2 - dados do giroscópio do NS1 (canto inferior esquerdo), 3 - dados do acelerômetro do NS2 (canto superior direito) e 4 - dados do giroscópio do NS2 (canto inferior direito). Como esperado, os dois gráficos à direita não apresentaram variações nos valores de aceleração gravitacional e velocidade angular, pois o NS2 estava parado.

Os gráficos à esquerda apresentaram variações nas medições do acelerômetro e do giroscópio devido à movimentação feita com o NS1. No gráfico 1 houve um comportamento de alternância entre aproximadamente ± 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Z. Em relação ao gráfico 2, houve variação na velocidade angular do eixo X, o que faz sentido dado que foram feitos giros em torno dele.

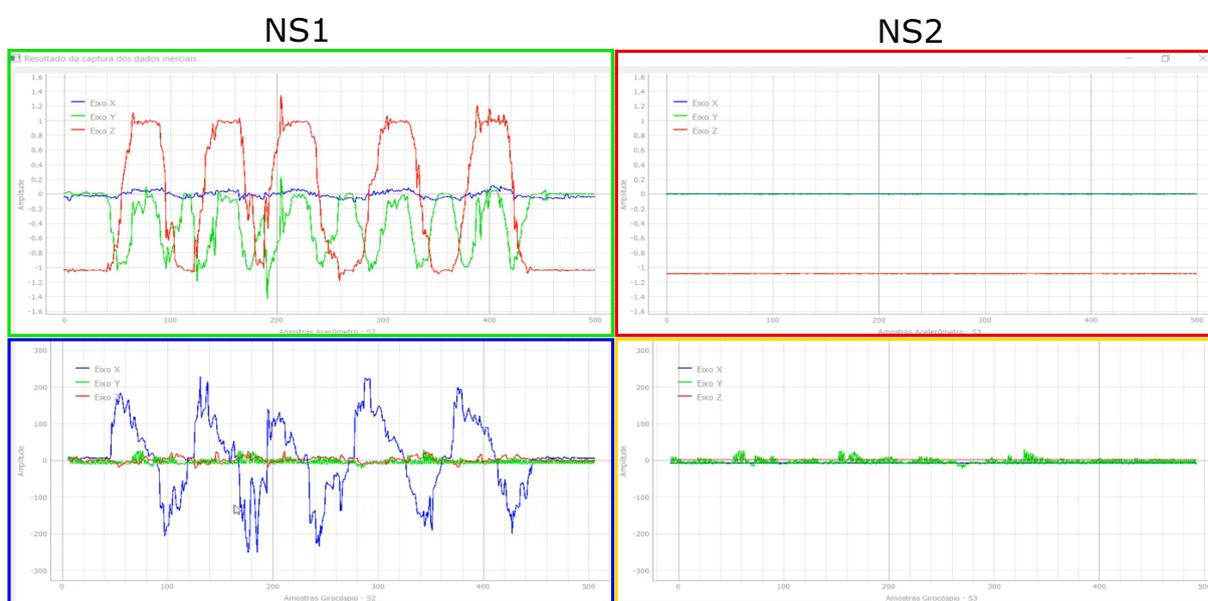


Figura 39 – Resultado do movimento de alternância entre ± 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Z do NS1 com NS2 parado.

Fonte: Autor

Movimento 1B

Na Figura 40 são mostrados quatro gráficos, sendo eles: 1 - dados do acelerômetro do NS1 (canto superior esquerdo), 2 - dados do giroscópio do NS1 (canto inferior esquerdo), 3 - dados do acelerômetro do NS2 (canto superior direito) e 4 - dados do giroscópio do NS2 (canto inferior direito). Como esperado, os dois gráficos à esquerda não apresentaram variações nos valores de aceleração gravitacional e velocidade angular, pois o NS1 estava parado.

Os gráficos à direita apresentaram variações nas medições do acelerômetro e do giroscópio devido à movimentação feita com o NS2. No gráfico 3 houve um comportamento de alternância entre aproximadamente ± 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Z. Em rela-

ção ao gráfico 4, houve variação na velocidade angular do eixo X, o que faz sentido dado que foram feitos giros em torno dele.

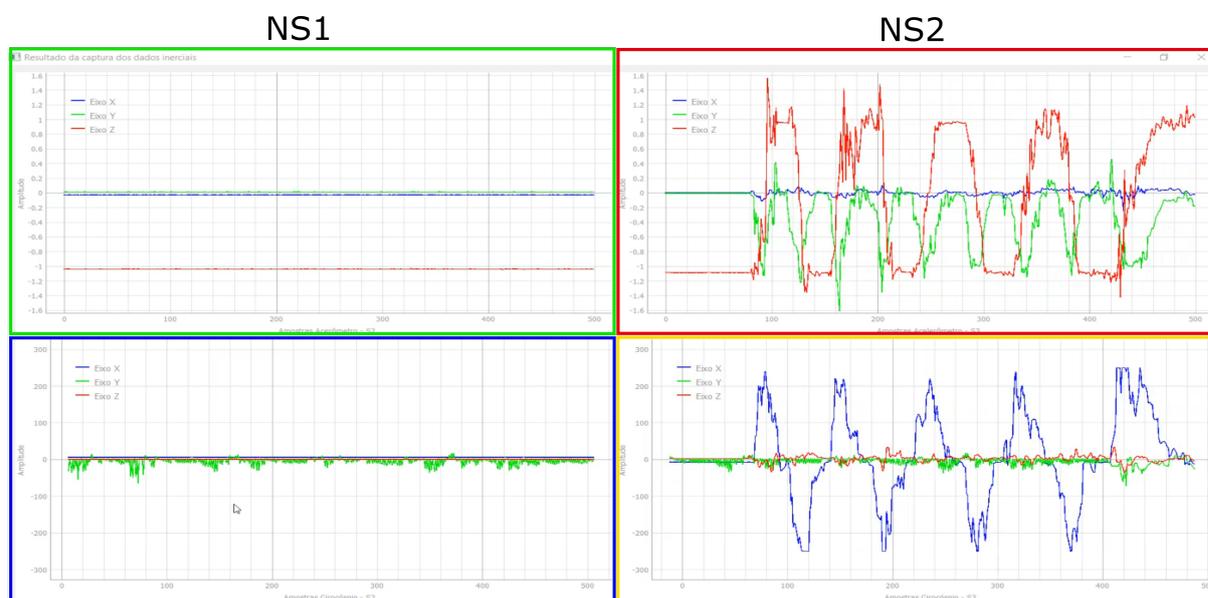


Figura 40 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Z do NS2 com NS1 parado.

Fonte: Autor

Movimento 2A

Na Figura 41 são mostrados quatro gráficos, sendo eles: 1 - dados do acelerômetro do NS1 (canto superior esquerdo), 2 - dados do giroscópio do NS1 (canto inferior esquerdo), 3 - dados do acelerômetro do NS2 (canto superior direito) e 4 - dados do giroscópio do NS2 (canto inferior direito). Como esperado, os dois gráficos à direita não apresentaram variações nos valores de aceleração gravitacional e velocidade angular, pois o NS2 estava parado.

Os gráficos à esquerda apresentaram variações nas medições do acelerômetro e do giroscópio devido à movimentação feita com o NS1. No gráfico 1 houve um comportamento de alternância entre aproximadamente +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Y. Em relação ao gráfico 2, houve variação na velocidade angular do eixo X, o que faz sentido dado que foram feitos giros em torno dele.

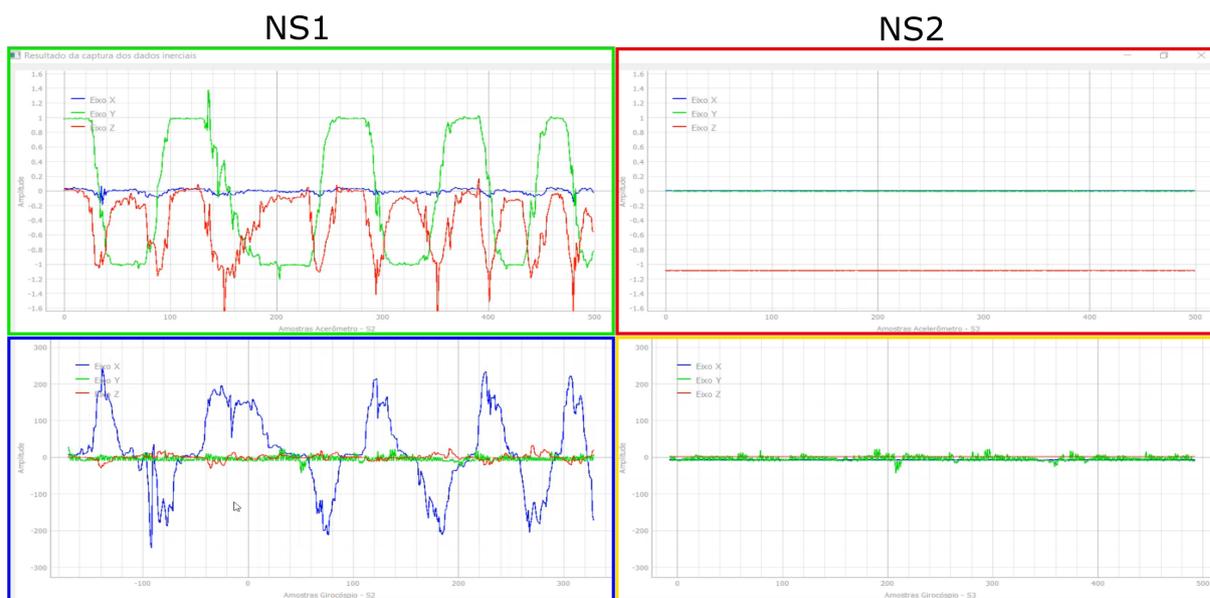


Figura 41 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Y do NS1 e NS2 parado.

Fonte: Autor

Movimento 2B

Na Figura 42 são mostrados quatro gráficos, sendo eles: 1 - dados do acelerômetro do NS1 (canto superior esquerdo), 2 - dados do giroscópio do NS1 (canto inferior esquerdo), 3 - dados do acelerômetro do NS2 (canto superior direito) e 4 - dados do giroscópio do NS2 (canto inferior direito). Como esperado, os dois gráficos à esquerda não apresentaram variações nos valores de aceleração gravitacional e velocidade angular, pois o NS1 estava parado.

Os gráficos à direita apresentaram variações nas medições do acelerômetro e do giroscópio devido à movimentação feita com o NS2. No gráfico 3 houve um comportamento de alternância entre aproximadamente +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Y. Em relação ao gráfico 4, houve variação na velocidade angular do eixo X, o que faz sentido dado que foram feitos giros em torno dele.

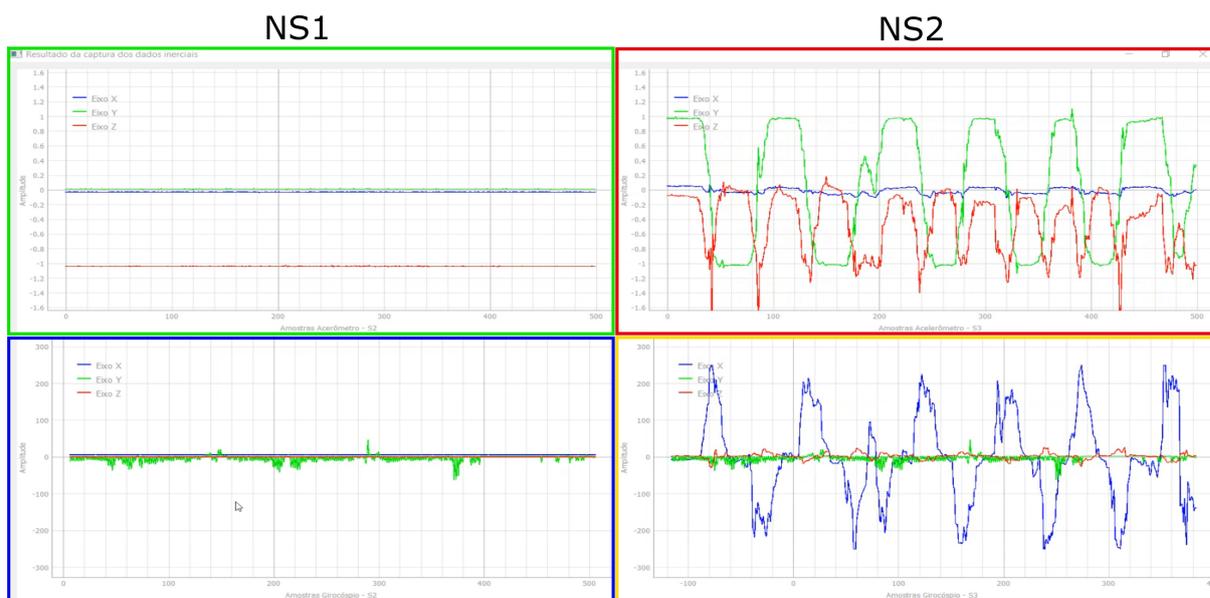


Figura 42 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo Y do NS2 e NS1 parado.

Fonte: Autor

Movimento 3A

Na Figura 43 são mostrados quatro gráficos, sendo eles: 1 - dados do acelerômetro do NS1 (canto superior esquerdo), 2 - dados do giroscópio do NS1 (canto inferior esquerdo), 3 - dados do acelerômetro do NS2 (canto superior direito) e 4 - dados do giroscópio do NS2 (canto inferior direito). Como esperado, os dois gráficos à direita não apresentaram variações nos valores de aceleração gravitacional e velocidade angular, pois o NS2 estava parado.

Os gráficos à esquerda apresentaram variações nas medições do acelerômetro e do giroscópio devido à movimentação feita com o NS1. No gráfico 1 houve um comportamento de alternância entre aproximadamente +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo X. Em relação ao gráfico 2, houve variação na velocidade angular do eixo Y, o que faz sentido dado que foram feitos giros em torno dele.

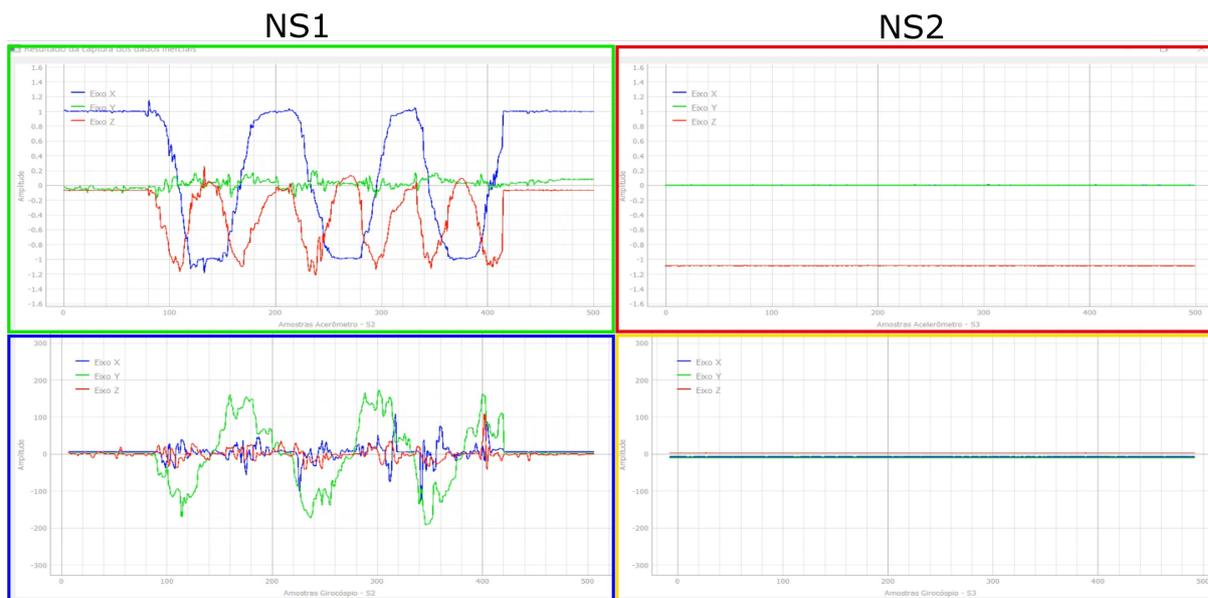


Figura 43 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo X do NS1 e NS2 parado.

Fonte: Autor

Movimento 3B

Na Figura 44 são mostrados quatro gráficos, sendo eles: 1 - dados do acelerômetro do NS1 (canto superior esquerdo), 2 - dados do giroscópio do NS1 (canto inferior esquerdo), 3 - dados do acelerômetro do NS2 (canto superior direito) e 4 - dados do giroscópio do NS2 (canto inferior direito). Como esperado, os dois gráficos à esquerda não apresentaram variações nos valores de aceleração gravitacional e velocidade angular, pois o NS1 estava parado.

Os gráficos à direita apresentaram variações nas medições do acelerômetro e do giroscópio devido à movimentação feita com o NS2. No gráfico 3 houve um comportamento de alternância entre aproximadamente +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo X. Em relação ao gráfico 4, houve variação na velocidade angular do eixo Y, o que faz sentido dado que foram feitos giros em torno dele.

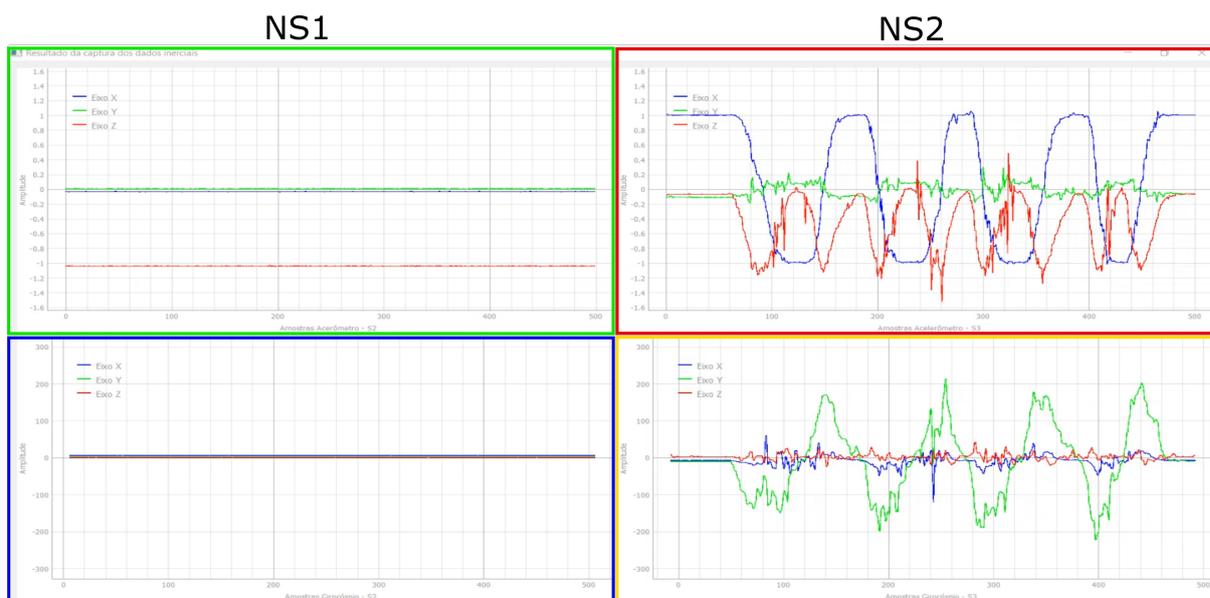


Figura 44 – Resultado do movimento de alternância entre +/- 1 G de aceleração gravitacional para o eixo X do NS2 e NS1 parado.

Fonte: Autor

Movimentos com os sensores acoplados ao braço

Flexão e extensão de cotovelo

Os resultados referentes ao movimento de flexão e extensão de cotovelo, com o cotovelo apoiado em uma mesa, podem ser visto graficamente na Figura 45. Devido ao fato do sensor 1 posicionado no braço quase não ter sofrido movimentação, os valores de aceleração gravitacional e velocidade angular se mantiveram praticamente constante durante a aquisição como mostrado nos gráficos de borda verde e azul.

Por outro lado, o sensor 2 posicionado próximo ao punho amostrou variação de aceleração gravitacional, principalmente para os eixos X e Y do acelerômetro, além de variação de velocidade para o eixo Z do giroscópio. Dessa forma, os valores mostrados nos gráficos de borda vermelha e amarela condizem com o movimento executado pelo sensor 2.

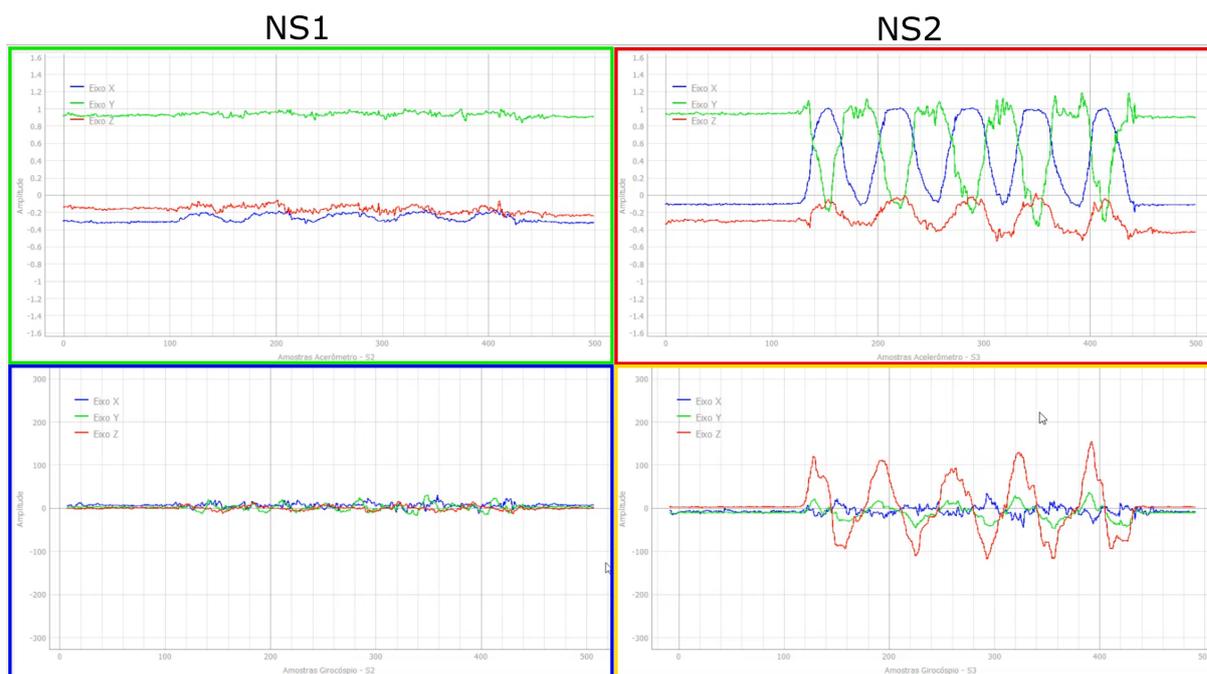


Figura 45 – Resultados referentes ao movimento de flexão e extensão de cotovelo, com o cotovelo apoiado em uma mesa.

Fonte: Autor

Supinação e pronação de cotovelo

Os resultados referentes ao movimento de supinação e pronação de cotovelo, com o cotovelo apoiado em uma mesa, podem ser visto graficamente na Figura 46. Devido ao fato do sensor 1 posicionado no braço quase não ter sofrido movimentação, os valores de aceleração gravitacional e velocidade angular se mantiveram praticamente constante durante a aquisição como mostrado nos gráficos de borda verde e azul.

Por outro lado, o sensor 2 posicionado próximo ao punho amostrou variação de aceleração gravitacional, principalmente para o eixo Y do acelerômetro, além de variação de velocidade para o eixo X do giroscópio. Esses valores fazem sentido devido à giro em torno do eixo X do giroscópio devido à supinação e pronação do braço. Dessa forma, os valores mostrados nos gráficos de borda vermelha e amarela condizem com o movimento executado pelo sensor 2.

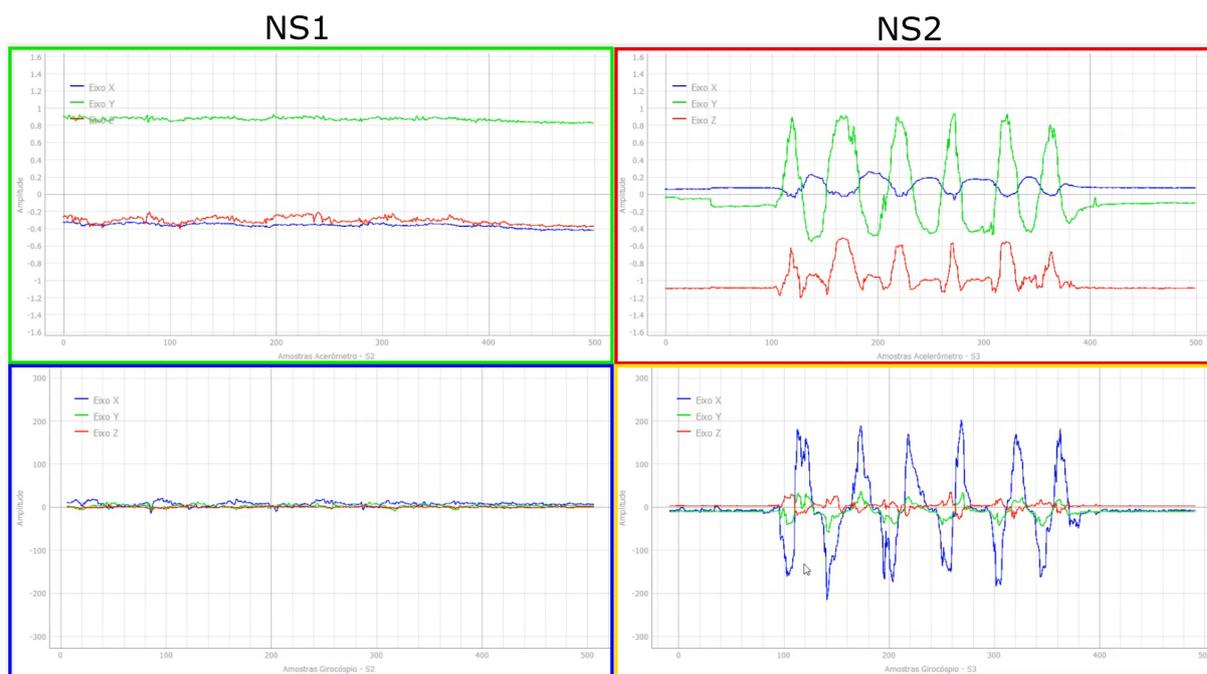


Figura 46 – Resultados referentes ao movimento de supinação e pronação de cotovelo, com o cotovelo apoiado em uma mesa.

Fonte: Autor

Rotação interna do ombro

Os resultados referentes ao movimento de rotação interna do ombro, com o braço posicionado paralelo ao solo, podem ser visto graficamente na Figura 47. Devido ao fato do sensor 1 posicionado no braço ter sofrido uma rotação em torno do eixo X do giroscópio, houve uma variação de velocidade angular do eixo X no gráfico de borda azul. Os valores de aceleração gravitacional variaram de maneira média para todos os eixos do acelerômetro como mostrado no gráfico de borda verde, já que o sensor 1 moveu-se mais delicadamente comparado ao sensor 2.

Por outro lado, o sensor 2 posicionado próximo ao punho amostrou maior variação de velocidade angular, principalmente para o eixo Z do giroscópio, devido ao movimento de rotação principalmente em torno dele. Além disso, houve de variação de aceleração da gravidade para todos os eixos do acelerômetro. Esses valores fazem sentido devido principalmente à alternância da posição do punho entre a vertical e horizontal. Dessa forma, os valores mostrados nos gráficos de borda vermelha e amarela condizem com o movimento executado pelo sensor 2.

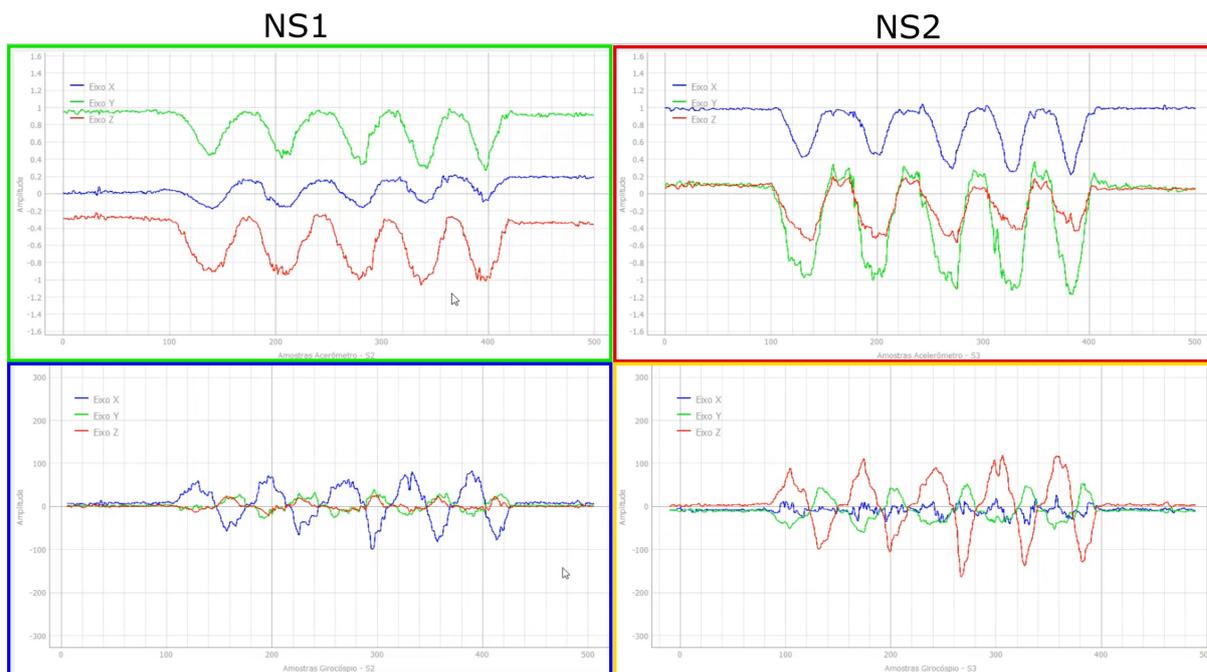


Figura 47 – Resultados referentes ao movimento de rotação interna do ombro, com o braço posicionado paralelo ao solo.

Fonte: Autor

Considerando os resultados obtidos e os comentários a respeito, no próximo capítulo será feita uma discussão sobre os principais resultados alcançados no trabalho.

5 DISCUSSÃO

Como descrito no capítulo anterior, foram obtidos diversos resultados a partir de três experimentos, que visaram a avaliar o sistema sob perspectivas diversas. As duas etapas do experimento 1 demonstraram que a informação recebida é confiável em um enlace da rede quando há comunicação entre um NS e NC, visto que não se observou perda de informação. Por fim, este experimento apontou que, para o protótipo construído, o atraso entre o envio de dados pelo NS e recebimento no NC é de $740\mu s$. Significa então que a rede tem um tempo de resposta adequado para ser considerada em tempo real. A latência da rede nesse caso significa apenas 7,4% do valor da taxa de amostragem de dados de 10ms implementada pelos sensores inerciais. Outra conclusão importante a respeito do experimento 1 é a limitação do número de NSs é a no máximo 10 considerando o valor latência de $\Delta t = 740\mu s$. Essa limitação também está relacionada ao fato da latência total da rede ter de ser menor que a taxa de amostragem de 100Hz, para que não haja perda de dados.

O experimento 2 foi útil para investigar o comportamento da rede quando há mais de um NS capturando dados. Assim como no experimento 1, os dados enviados pelos dois NSs foram recebidos pelo NC sem perdas e erros, como mostrado na Figura 36. Consequentemente, pode ser dito que a rede manteve-se confiável e segura quando mais um NS foi inserido. Além disso, com a inserção de mais um NS pode-se comprovar o sincronismo entre o início de aquisição de dados para ambos NSs.

Na segunda etapa do experimento 2, pode-se aferir que a diferença temporal entre as respostas de cada NS ao *pooling* de envio de dados foi de $5,04ms$, como mostrado na Figura 38. Esse valor faz sentido quando há dois NS na rede, pois a cada $2,5ms$ o NC envia o comando "Send Data" a um dos NS. Com uma taxa de amostragem de 100Hz para os dois NS $\Delta t = 5,04ms$ é suficiente e adequado. Nesse caso, a taxa de envio é menor que a de amostragem, evitando que os dados salvos no *buffer* do NS sejam perdidos. Caso fossem implementados mais que dois NSs, para essa mesma taxa de amostragem de 100Hz, Δt teria que ser encurtado para que os dados salvos no *buffer* não fossem perdidos.

Acerca dos resultados do experimento 3, é plausível dizer que as amostras feitas em cada sensor inercial, a uma taxa de 100Hz, conseguem descrever adequadamente os movimentos executados no intervalo de tempo de aferição. Então, os parâmetros escolhidos para a configuração da rede são pertinentes no rastreamento de movimentos dos membros superiores utilizando dois sensores inerciais, assim como fizeram (FANG et al., 2020) e (KIM; YANG; GERLA, 2011).

Os experimentos realizados mostraram que a escolha da topologia de rede e a aquisição de dados por *pooling* foram adequadas à aplicação, visto que as taxas de amostragem de todos

os NS são fixas e iguais entre si como discutido por (OLIVEIRA et al., 2017). A rede alcançou uma vazão de dados por canal igual a 30kbps, quase 4 vezes maior comparada a de (FANG et al., 2020). Por fim, o sistema opera com 40Hz a mais de taxa de amostragem se comparado ao (XSENSTECH, 2021) e 100Hz a menos se comparado ao (INTERSENSE, 2012).

6 CONCLUSÃO

O projeto apresentou um protótipo de rede para o rastreamento de movimentos do corpo humano, que comparado a sistemas tradicionais e comerciais de rastreamento de movimentos, possui vantagens e desvantagens. As vantagens preponderantes do protótipo são: relativo baixo custo de implementação da rede, portabilidade do sistema e adaptabilidade a usuários com diferentes características físicas. Por outro lado, a principal desvantagem da rede é a limitação do número de sensores em relação ao valor de latência.

Apesar das limitações do protótipo a respeito da restrição da quantidade de sensores inerciais e velocidade de envio de dados a aplicação, pode-se dizer que foi obtido sucesso no trabalho. O protótipo cumpre com o objetivo principal de rastrear movimentos sem a utilização de fios e em tempo real.

As metas secundárias de definir uma topologia de rede apropriada e protocolo de comunicação para a camada de aplicação da rede também foram alcançadas. Além disso, foi implementado o *software* de aplicação para visualização dos dados em tempo real. Os dados capturados pelos sensores inerciais puderam ser visualizados em tempo real pela aplicação sem perdas e com o conteúdo preservado.

Pôde-se a partir do modelo de *hardware* e *software* avaliar o desempenho da rede em termos de velocidade de comunicação e sincronismo entre os diversos nós, sendo que os valores temporais medidos traduziram-se em um resultado de desempenho da rede suficientemente bom.

Como trabalhos futuros, para melhoria do modelo, pretende-se aumentar o número de nós sensores, garantindo o sincronismo das informações capturadas com uma boa velocidade de troca de informações. Conseqüentemente, intenciona-se aumentar a frequência de requisição de dados entre o nó central e os nós sensores.

Também é proposto melhorar o mecanismo que garante o sincronismo inicial de aquisição de dados entre os nós sensores, que poderia ser resolvido com o uso de um *hardware* com cristal de clock mais preciso. Uma mudança no grau de certeza de sincronismo entre os NS pode significar na implementação de outra estratégia de requisição de dados sem ser o *pooling*. Essa mudança impactaria em uma maior disponibilidade do meio para o envio de dados pelos NS ao NC. Outro objetivo para posterioridade é utilizar outro modelo de rádio baseado em padrões como Zigbee e BLE, os quais possibilitam o uso de taxas de envio e frames maiores. Então será possível utilizar a rede para capturar movimentos de todo o corpo com mais detalhes, mas também expandir o uso da rede para outras aplicações além do rastreamento corporal e uso de sensores inerciais.

Os principais problemas e desafios enfrentados ao longo do projeto foram:

- Fazer a aquisição dos dados do sensor magnetômetro em uma taxa de no mínimo 100Hz.
- Desenvolver um *software* de aplicação capaz de receber e identificar dados recebidos via USB e plotá-los em tempo real
- Problemas de interrupção da alimentação (mau contato) da STM32 dos nós sensores ao realizar movimentos com os sensores inerciais posicionados no braço.
- Definir como e quais seriam os experimentos para analisar o sistema.

Referências

- BUONOCUNTO, P.; MARINONI, M. Tracking limbs motion using a wireless network of inertial measurement units. In: **Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES 2014)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 66–76. DOI: [10.1109/SIES.2014.6871188](https://doi.org/10.1109/SIES.2014.6871188).
- CASAGRANDE, R. A. et al. Redes ieee 802.15. 4 para aplicações móveis: uma arquitetura para monitoramento de grandezas fisiológicas. 2019.
- CAVALLARI, R. et al. A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 16, n. 3, p. 1635–1657, 2014. DOI: [10.1109/SURV.2014.012214.00007](https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012214.00007).
- FANG, Q. et al. A longitudinal investigation of the efficacy of supported in-home post-stroke rehabilitation. **IEEE Access**, IEEE, v. 8, p. 138690–138700, 2020. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3010674](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010674).
- GMITERKO, A.; LIPTAK, T. **Motion Capture of Human for Interaction with Service Robot**. American Journal of Mechanical Engineering, 2013. Disponível em: <http://pubs.sciepub.com/ajme/1/7/12/figure/2>.
- HAMILL, J. Bases biomecânicas do movimento humano. Editora Manole, 1999.
- IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. **IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)**, p. 1–709, 2016.
- INTERSENSE, L. InterSense, LLC / A Division of GENTEX Corporation, 2012. Disponível em: https://creact.co.jp/wp-content/uploads/2017/10/InertiaCube4_Manual_v1.0.pdf.
- INTERSENSELLC, I. **INERTIACUBE4**. 2021. Disponível em: <https://www.intersense.com/inertiacube4>.
- KIM, J.; YANG, S.; GERLA, M. Stroketrack: Wireless inertial motion tracking of human arms for stroke telerehabilitation. In: **Proceedings of the First ACM Workshop on Mobile Systems, Applications, and Services for Healthcare**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2011. (mHealthSys '11). ISBN 9781450306843. DOI: [10.1145/2064942.2064948](https://doi.org/10.1145/2064942.2064948).
- KUROSE, J. F. **Computer networking: A top-down approach featuring the internet, 3/E**. [S.l.]: Pearson Education India, 2005.
- MAGNO, W.; ANDRADE, M.; ARAUJO, A. D. Building a low cost gaussmeter. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, p. 1–6, 09 2010. DOI: [10.1590/S1806-11172010000300012](https://doi.org/10.1590/S1806-11172010000300012).
- MELZI, S.; BORSANI, L. P.; CESANA, M. The virtual trainer: Supervising movements through a wearable wireless sensor network. In: **2009 6th IEEE Annual Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–3. DOI: [10.1109/SAHCNW.2009.5172966](https://doi.org/10.1109/SAHCNW.2009.5172966).

- MENACHE, A. 1-motion capture primer. In: MENACHE, A. (Ed.). **Understanding Motion Capture for Computer Animation (Second Edition)**. Second edition. Boston: Morgan Kaufmann, 2011, (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics). p. 1–46. ISBN 978-0-12-381496-8. DOI: [10.1016/B978-0-12-381496-8.00001-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381496-8.00001-9).
- NERINO, R. et al. A bsn based service for post-surgical knee rehabilitation at home. In: **Proceedings of the 8th International Conference on Body Area Networks**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 401–407. DOI: [10.4108/icst.bodynets.2013.253679](https://doi.org/10.4108/icst.bodynets.2013.253679).
- OLIVEIRA, S. R. d. J. et al. Método de acesso ao meio baseado em prioridades para melhoria das taxas de transferência em wbans. Universidade Federal de Uberlândia, 2017. DOI: [10.14393/ufu.te.2018.16](https://doi.org/10.14393/ufu.te.2018.16).
- OPTITRACK. **Build Your Own System**. [S.l.]: Optitrack, 2020. <<https://www.optitrack.com/>>. (Accessed: 2021-08-08).
- PEI, W. et al. A motion rehabilitation self-training and evaluation system using kinect. In: **2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 353–357. DOI: [10.1109/URAI.2016.7734059](https://doi.org/10.1109/URAI.2016.7734059).
- REFAI, M. I. M. et al. Portable gait lab: Estimating over-ground 3d ground reaction forces using only a pelvis imu. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 21, p. 6363, 2020. DOI: [10.3390/s20216363](https://doi.org/10.3390/s20216363).
- RIBEIRO, P. M. S. et al. Machine learning improvements to human motion tracking with imus. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 21, p. 6383, 2020. DOI: [10.3390/s20216383](https://doi.org/10.3390/s20216383).
- SEMICONDUCTOR, N. **nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver**. [S.l.]: Nordic Semiconductor, 2007. <https://www.mouser.com/datasheet/2/297/nRF24L01_Product_Specification_v2_0-9199.pdf>. (Accessed: 2021-08-08).
- SEMICONDUCTOR, N. **nRF24LE1 Ultra-low Power Wireless System On-Chip Solution**. [S.l.]: Nordic Semiconductor, 2010. <https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF24LE1_PS_v1.6.pdf>. (Accessed: 2021-08-08).
- TORRES, H. **Sensores inerciais - parte 2**. 2020. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/sensores-inerciais-parte-2/>>.
- WOUDA, F. J. et al. Foot progression angle estimation using a single foot-worn inertial sensor. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, Springer, v. 18, n. 1, p. 1–10, 2021. DOI: [10.1186/s12984-021-00816-4](https://doi.org/10.1186/s12984-021-00816-4).
- XSENS, X. **MVN analyze**. 2021. Disponível em: <<https://www.xsens.com/products/mvn-analyze?hsCtaTracking=317368b0-35fa-4dce-b410-de40b523565c7Ce9ec2617-ba66-47d2-8dc3-c4d5de12a4cd>>.
- XSENSTECH, X. T. **MVN User Manual by Xsens**. 2021. Disponível em: <https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/usermanual/MVN_User_Manual.pdf>.