

Sensores MEMS para Análise de Movimento Humano

Itúrbide F. A. S.

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
ifas@ecomp.poli.br

R. R. Caldas

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil

Diego Rativa

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil

Resumo

Dispositivos MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), como acelerômetros, giroscópios, termômetros, são capazes de realizar diversas funções com uma alta precisão e eficiência, e estão presentes em vários sistemas como smartphones e carros. Tais Dispositivos consistem na integração de elementos mecânicos, eletrônicos e sensores em um pequeno chip. Sensores de movimento, como giroscópios e acelerômetros, vem sendo amplamente utilizados, na última década, devido à sua redução de tamanho e custo, sendo assim implantado em smartphones e pequenos chips como o MPU6050. Esta redução de escala dos sensores implicou diretamente em sua utilização como dispositivo não invasivo na avaliação de movimentos humanos, como caminhada, amplitude de movimento de diversas articulações, e até na detecção de convulsões de pacientes com epilepsia. A avaliação da mobilidade da coluna cervical proporciona informações acerca de doenças relacionadas às disfunções articulares. Atualmente, técnicas mais difundidas são de alto custo e de difícil implementação nas clínicas de pequeno e médio porte, ou quando não, apresentam resultados contrastantes, o que compromete sua confiabilidade. Neste trabalho, propomos um sistema baseado em sensores inerciais para auxiliar a avaliação física, na mensuração das amplitudes de movimento (ADM), que, como dito anteriormente, pode ser utilizado em diversas aplicações, dentro delas foi escolhido avaliar a ADM da coluna cervical. Os sistemas propostos são: (a) dois sensores inerciais conectados a um microprocessador Arduino; (b) Aplicativo android para aquisição de dados dos sensores inerciais de um smartphone. Os experimentos compreenderam medidas simultâneas do sistema e do goniômetro manual para cada movimento, os dados estão apresentados através da média \pm desvio-padrão. Após o processamento dos dados, as ADM's foram obtidas a partir do reconhecimento dos picos do sinal. Na comparação entre as medidas, enquanto os resultados para movimentos rotacionais da cervical demonstraram equivalência, os de flexão, extensão, flexão lateral esquerda e direita apresentaram grandes discrepâncias. Esse fato se justifica dado o ponto de referência utilizado pelo goniômetro na vértebra C7 para estes movimentos, evidenciando sobretudo o movimento da porção inferior da cervical. O sistema desenvolvido, por sua vez, expressou a dimensão do movimento em sua totalidade. Um artigo foi submetido e aceito no XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2014, com o título de Goniometria Baseada em Sensores Inerciais na Análise dos Movimentos da Coluna Cervical.

Abstract

Micro-Electro-Mechanical Systems such as accelerometers, gyroscopes, thermometers are able of perform various functions with high accuracy and efficiency, and are present in various systems such as smartphones and cars. Such devices consist of the integration of mechanical, electronics and sensor elements in a small chip. Motion sensors, such as gyroscopes and accelerometers, has been widely used in the last decade due to its reduced size and cost, thus implanted in smartphones and small chips as MPU6050. This downscaling of sensors directly involved in its use as a noninvasive device in the evaluation of human movements such as walking, range of motion of various joints, and even in convulsions detection on patients with epilepsy. The mobility evaluation of the neck provides information about disorders related to joint dysfunction. Current assessment techniques presente contradictory results regarding its reliability or are costly and hard to implement in small clinical centers. In this paper, we propose an inertial sensor-based system to improve the physical assessment, measuring range of motion (ROM) of the cervical spine. The proposed systems are: (a)two inertial sensors connected to an Arduino microprocessor; (b) Android application to inertial sensor data acquisition of smartphones. The experiments comprised simultaneous measurements of the system and the

manual goniometer for each movement, the data is presented by mean \pm standard deviation. After processing the data, ROM's were obtained from the recognition of signal peaks. The results for rotational movements of the neck are equivalent to the obtained by manual goniometry. However, the flexion, extension, left and right side bend movements showed large discrepancies, this fact is justified by the reference point (C7 vertebra), used in goniometry to evaluate these movements, mostly showing the movement of the lower portion of the cervical. Therefore, the developed system express the movement dimension in its totality, opening new opportunities to be explored in mobility evaluation techniques. A paper was submitted and accepted into the XXIV Brazilian Congress on Biomedical Engineering, 2014, with the title of goniometry Inertial Sensors Based on Analysis of Movements of the Cervical Spine.

1 Introdução

O giroscópio foi inventado em 1850 por Jean Bernard Léon Foucault (1819 - 1868), que utilizou para mostrar que a Terra de fato gira sobre seu próprio eixo. Trata-se de um instrumento livre para girar em qualquer direção, porém, quando em rotação, tende-se a se opor à mudanças de direção. Podemos, então, concluir que o eixo de rotação possui memória, tendo sua direção fixa. A ampla utilização de tais dispositivos em carros, smartphones, controles de vídeo games, entre outros, se dá devido ao baixo custo e sua implantação em MEMS.

Com a facilidade de acesso à tais tecnologias, vários trabalhos têm aliado os recursos disponíveis nos sensores inerciais, como giroscópios e acelerômetros, à necessidade de instrumentação na área de saúde [1][2][3]. Isso se deve à capacidade de tais sensores captarem medidas de variação de velocidade angular e aceleração linear [4][5], normalmente associados a estudos do movimento do corpo humano. Bem como, por serem considerados de baixo custo, elevada precisão e confiabilidade [6]. Assim, o uso destes sensores pode tornar tal tipo de análise mais prática.

Uma importante avaliação de movimento do corpo humano realizada é sobre a mobilidade da coluna cervical, que pode ser afetada por diversas doenças e condições clínicas, como Doenças Osteomioarticulares Relacionadas ao Trabalho (DORT), Síndrome do chicote, Cefaleia tensional e Cervicalgia de origem não específica, Disfunções na articulação temporomandibular (DTM) e musculatura mastigatória [7][8][9][10]. Na avaliação física, a mensuração desse parâmetro se dá pela quantificação da Amplitude de Movimento (ADM). Nesse contexto, a Radiografia é considerada o padrão ouro para estabelecer um critério de validade das medidas articulares [11], porém não é um método prático para rotina clínica e expõe os pacientes à indesejável radiação ionizante [12].

Outro método de avaliação dos movimentos, bastante utilizado no âmbito acadêmico, é representado pelos softwares de reconhecimento de imagens através de marcadores cutâneos. Contudo, sua aplicação é muito onerosa e de difícil implementação em consultórios de pequeno porte, devido ao grande número de câmeras e o custo do software necessário [13]. No que concerne à prática clínica, a goniometria manual configura como uma técnica bastante utilizada [14], entretanto, os estudos que verificam a confiabilidade do uso do goniômetro apresentam resultados contraditórios [14][15][16].

Neste trabalho, o sistema proposto é baseado em sensores inerciais para suporte à avaliação dos movimentos do corpo humano. O dispositivo proporciona valores das amplitudes de movimentos das articulações do corpo, como

cotovelo, cervical, joelho, tornando o exame físico mais prático, de baixo custo e alta acurácia.

2 Materiais e métodos

2.1 Sensores Inerciais

Foram utilizados dois giroscópios e dois acelerômetros MPU 6050 [17], coordenados por um microcontrolador Arduino (Figura 1), calibrados através da implementação do filtro de Kalman [18][19]. O sistema foi concebido pela integração dos sensores de forma que os eixos Z ficassem na mesma direção, porém em sentidos contrários, permitindo assim anular o efeito da perda linear de referência do eixo Z com a diferença de cada amostra dos dois sinais [20]. O eixo em questão foi imprescindível para quantificar os movimentos de rotação lateral da cervical.

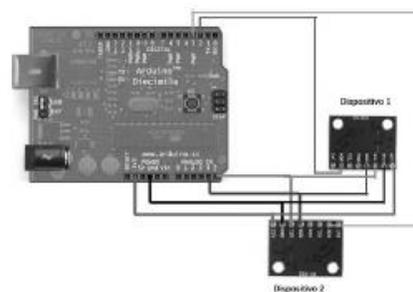


Fig. 1. Sistema proposto composto por dois MPU 6050 e um microcontrolador arduino.

2.1.2 Inter-Integrated Circuit

O MPU 6050 utiliza a comunicação Inter Integrated Circuit (I²C) com o Arduino [21][22], que consiste em um barramento serial que conecta vários periféricos ao dispositivo controlador (Figura 2). O I²C utiliza uma linha serial de comunicação SDA, Serial Data Line, e uma linha serial de sincronização (clock) SCL, Serial Clock Line. A velocidade de uma comunicação I²C é limitada a 3.4 Mbits/s no modo High Speed, e 10 kbits/s no modo Low Speed [19],[20] e o número de dispositivos é limitado pelo espaço de endereço que no MPU6050 é de apenas 1 bit, possibilitando apenas a conexão de 2 dispositivos[17].

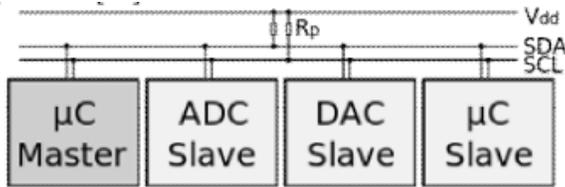


Fig. 2. Exemplo de comunicação I²C.

O uso de mais de um dispositivo foi viabilizado por TDM (Time Division Multiplexing), cuja implementação foi realizada diretamente no arduino, alternando os valores do pino ADO (Adress) de cada dispositivo. Esta forma de implementação permite a conexão de mais de dois MPU 6050 ao mesmo controlador, podendo, desta forma, ser utilizado na análise de outros movimentos do corpo humano, quando necessário.

A utilização de TDM diminui a taxa de aquisição de dados, porém a velocidade padrão de 100 kbits/s mostrou uma taxa de amostragem média de 50 amostras por segundo para cada um dos dois dispositivos utilizados, sendo essa taxa suficiente para os fins do presente trabalho.

2.2 Smartphone

Com a integração de giroscópios, acelerômetros e Smartphones, foi possível implementar um aplicativo capaz de gravar as informações dos sensores inerciais do aparelho (Figura 3). Isto possibilitará, em trabalhos futuros, a comparação dos dados obtidos pelo sistema de MPU6050 e arduino com os dados do smartphone.



Fig. 3. Aplicativo Android para obtenção dos dados dos sensores inerciais do smartphone

2.3 Experimentos

A presente pesquisa obteve aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade de Pernambuco (Parecer nº 019384/2014).

Para o procedimento de medição das ADM's da cervical, o voluntário permaneceu sentado em uma cadeira regulável com os pés sobre o chão, a coluna ereta e bem apoiada no encosto.

O sistema foi posicionado na parte frontal da cabeça (Figura 4), considerando que a velocidade angular independe do raio de observação. Quanto aos movimentos, o voluntário foi orientado a realizar, em velocidade moderada, quarenta repetições, divididas em blocos de 4 movimentos, de cada movimento (i.e. Flexão, Extensão, Flexão Lateral esquerda e direita, Rotação esquerda e direita). Sendo geradas trinta medidas de ADM, das quais foram extraídos média e desvio padrão. Os valores médios do ângulo adquiridos pelo sistema aqui proposto foram obtidos e analisados de maneira instantânea e comparados a posteriori a dados de goniometria manual (tempo da análise de acordo com o processamento de imagens) [23].

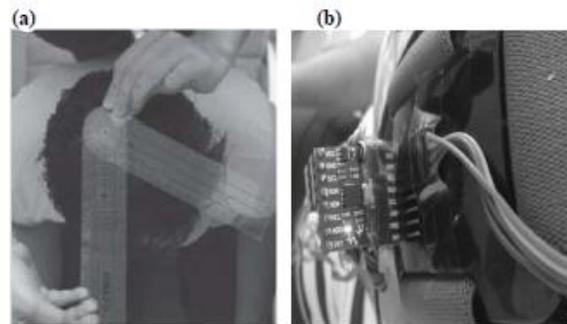


Fig. 4. (a) Posicionamento do goniômetro, alinhado com a sutura sagital do crânio, e (b) do sensor inercial para avaliação dos movimentos de rotação esquerda e direita.

2.4 Processamento do Sinal

As informações captadas pelos sensores foram processadas pelo MATLAB a fim de obter os valores de amplitude de movimento da coluna cervical. Para isso, foi necessário o reconhecimento dos máximos e mínimos dos sinais obtidos pelo giroscópio. Esses dados, por sua vez, caracterizam o começo e o fim de cada movimento.

Dado a presença de um ruído de baixa intensidade e alta frequência no sinal obtido. O seguinte algoritmo foi implementado para reconhecimento independente do ruído:

1. Calcular a média do sinal;

2. Subtrair todo o sinal pela média, centralizando o sinal em zero;
3. Identificar todos os zeros;
4. Procurar o maior ou menor valor entre cada dois zeros identificados.

A partir do reconhecimento dos picos do sinal, foi realizado o cálculo da diferença entre os valores absolutos de cada máximo do sinal com o mínimo posterior a ele (Figura 5). Dessa forma, permitindo a aquisição da amplitude total de cada movimento.

3 Resultados e Discussões

Após a assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, o voluntário foi avaliado de acordo com os critérios de inclusão e exclusão descritos no projeto do comitê de ética. Foi realizada uma explicação sobre a conduta adotada para esta pesquisa e um teste preliminar, a fim de verificar o entendimento do participante. A partir dos dados obtidos, gerou-se gráficos para cada tipo de movimento da coluna cervical, como representado na figura a seguir.

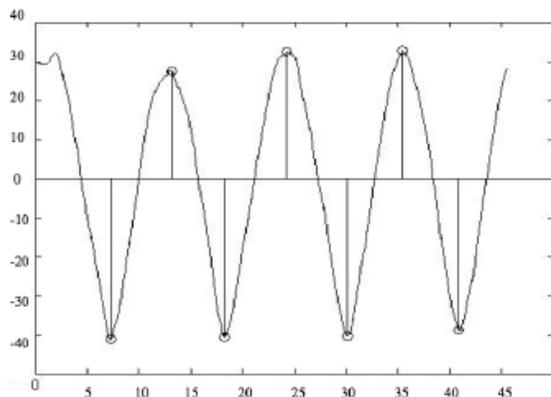


Fig. 5. Sinal com os picos, em graus (eixo y), em determinado período, em segundos (eixo x), reconhecidos após a aplicação do algoritmo.

Os resultados adquiridos nas coletas estão dispostos na Tabela 1 e correspondem às medidas realizadas simultaneamente para cada movimento.

Tabela 1. Medidas das amplitudes de movimento (em graus) da cervical.

Movimento	Goniômetro	Giroscópio
Flexão	66.53±1.48°	73.49±2.88°
Extensão	63.6±2.70°	71.54±4.59°
Flexão Lateral Esquerda	44.30±2.82°	49.66±2.17°
Flexão Lateral Direita	38.43±3.63°	49.23±3.47°
Rotação Esquerda	63.93±2.37°	66.13±2.18°
Rotação Direita	61.5±3.14°	58.16±2.50°

Para os movimentos de flexão, extensão, flexão lateral esquerda e direita, é possível perceber uma diferença considerável entre os valores obtidos pelos dispositivos de avaliação. Atribui-se a isso, o fato de que a referência utilizada para o goniômetro manual ser a vértebra C7, a qual compõe a coluna cervical baixa [24]. Como verificado na Figura 7(a), para o caso da flexão, a goniometria manual mensura unicamente o ângulo (θ) compreendido entre a coluna cervical baixa e média, tendo como eixo a vértebra C7.

Por sua vez, o sistema com sensor inercial, Figura 6(c), encontra-se localizado na cabeça, proporcionando uma magnitude de movimento mais expressiva, haja vista a participação das porções média e alta da cervical [25]. Sendo assim, o sistema é capaz de perceber a resultante do movimento da coluna cervical como um todo (i.e. $\theta+\alpha$). Inclusive o movimento angular que ocorre entre a vértebra C1 e a parte occipital do crânio (α), diferentemente das informações fornecidas pelo goniômetro manual.

Ao considerar os movimentos rotacionais, os quais ocorrem em torno do eixo longitudinal e no plano transversal, não seria esperada diferença entre as medidas realizadas, Figura 6(b) e 6(d). Isso é corroborado pelos resultados dessa pesquisa, os quais são similares para ambos os lados.

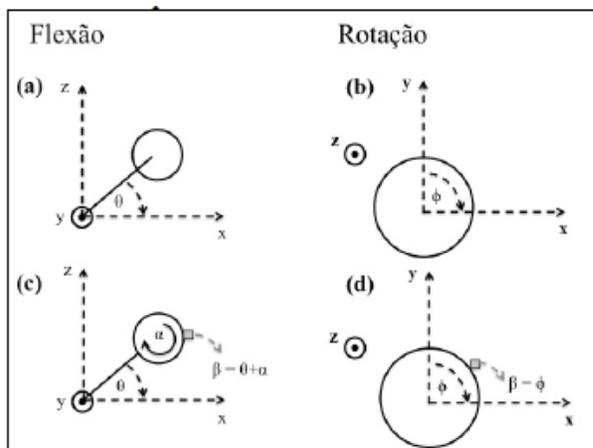


Fig. 6. Representação esquemática da análise da goniometria manual para os movimentos de flexão (a) e de rotação lateral (b); e da análise da goniometria baseada em sensores inerciais para os movimentos de flexão (c) e rotação lateral (d).

4 Conclusão

O sistema baseado em sensores inerciais permite adquirir as amplitudes angulares dos movimentos da coluna cervical. Entretanto, os valores obtidos diferem dos dados da goniometria manual, em consequência de a referência da avaliação convencional ser diferente para os movimentos no plano frontal e no mediano. Diante desses encorajadores resultados preliminares, se faz necessária a realização de exaustivas pesquisas com tais dispositivos, a fim de elucidar todas as possibilidades de informações que podem ser adquiridas pelos sensores em questão. Isso além de avaliar eventuais variações individuais que possam interferir nas medições.

Devido à capacidade dos sensores inerciais de medir tanto ângulo, como aceleração angular, é possível adicionalmente explorar essa ferramenta para inferir sobre a qualidade com que os deslocamentos são executados. Essa informação promoveria um avanço para a prática da avaliação, já que é uma informação relevante e, hoje, pouco observada pelos profissionais, talvez pela falta de ferramentas apropriadas. Porém difícil de se mensurar de forma quantitativa, graças a sua subjetividade, o que dificulta a comparação após o tratamento.

A elaboração do hardware para realização deste experimento possibilita também a medição de amplitude de movimentos em outras diversas articulações. Sendo ele um dispositivo não invasivo, de alta precisão e baixo custo, um estudo em aumento de robustez e confiabilidade pode conduzir à substituição dos métodos tradicionais pelo sistema proposto em alguns casos. A realização desta iniciação científica resultou na publicação de um artigo no XXIV

Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2014, com o seguinte título: Goniometria Baseada em Sensores Inerciais na Análise dos Movimentos da Coluna Cervical[26].

Referências

- [1] Duc C, Salvia P, Lubansu A, Feipel V, Aminian K. A wearable inertial system to assess the cervical spine mobility: Comparison with an optoelectronic-based motion capture evaluation. *Medical Engineering & Physics*. 2014; 36(1):49-56.
- [2] Howcroft J, Kofman J, Lemaire ED. Review of fall risk assessment in geriatric populations using inertial sensors. *Journal of Neuroengineering and rehabilitation*. 2013; 91(10):1-21.
- [3] Chung PYM, Ng GYF. Comparison between an accelerometer and a three-dimensional motion analysis system for the detection of movement. *Physiotherapy*. 2012; 98(3):256-9
- [4] Bonnet V, Mazzà C, McCamley J, Cappozzo A. Use of weighted Fourier linear combiner filters to estimate lower trunk 3D orientation from gyroscope sensors data. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2013; 10(29):1-7.
- [5] Ueno DT, Sebastião E, Corrazza DI, Gobbi S. Methods for assessing physical activity: a systematic review focused on older adults. *Brazilian Journal of Kinesiology and Human Performance*. 2013; 15(2):256-65.
- [6] Mohd-Yasin F, Zaiyadi N, Nagel DJ, Ong DS, Korman CE, Faidz AR. Noise and reliability measurement of a three-axis micro-accelerometer. *Microelectronic Engineering*. 2009; 86(4):991-5.
- [7] Strimpakos N. The assessment of cervical spine. Part 1: Range of motion and proprioception. *Journal of Bodywork & Movement Therapies*. 2011; 15(1):114- 124.
- [8] Gross A, Miller J, D'Sylva J, Burnie SJ, Goldsmith CH, Graham N, Haines T, Brønfort G, Hoving JL. Manipulation or mobilisation for neck pain: Systematic review. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2010; (1):315-33.
- [9] Biondi DM. Physical treatments for headache: A structured review. *Headache*; 2005; 45(6):738-46.

- [10] Olivo AS, Magee DJ, Parfitt M, Major P, Tie NM. The association between the cervical spine, the stomatognathic system, and craniofacial pain: a critical review. *Journal of Orofacial Pain*. 2006; 20(4):271-87.
- [11] Lavernia C, D'Apuzzo M, Ross MD, Lee D. Accuracy of knee range of motion assessment after total knee arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*. 2008; 23(6):85-91.
- [12] Florencio LL, Pereira A, Silva ERT, Pegoretti KAS, Gonçalves MAC, Bevilaqua-Grosse D. Concordância e confiabilidade de dois métodos não-invasivos para a avaliação da amplitude de movimento cervical em adultos jovens. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 2010; 14(2):175-81.
- [13] Pohl MB, Patel C, Wiley JP, Ferber R. Gait biomechanics and hip muscular strength in patients with patellofemoral osteoarthritis. *Gait & Posture*. 2013; 37(3):440-4.
- [14] Cleffken B, Breukelen GV, Mameren HV, Brink P, Damink SO. Test-retest reproducibility of elbow goniometric measurements in a rigid double-blinded protocol: Intervals for distinguishing between measurement error and clinical change. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2007; 16(6):788-94.
- [15] Wibault J, Vaillant J, Vuillerme N, Dederig A, Peolsson A. Using the cervical range of motion (CROM) device to assess head repositioning accuracy in individuals with cervical radiculopathy in comparison to neck- healthy individuals. *Manual Therapy*. 2013; 18(5): 403-9.
- [16] Austin MS, Ghanem S, Joshi A, Trappler R, Parvisi J, Hozack WJ. The assessment of intraoperative prosthetic knee range of motion using two methods. *The Journal of Arthroplasty*. 2008; 23(4):515-21.
- [17] InvenSense inc. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.2, 2011.
- [18] Djurić-Joviić MD, Jovicic NS, Popović DB, Djordjević AR. Nonlinear optimization for drift removal in estimation of gait kinematics based on accelerometers. *Journal of Biomechanics*. 2012; 45(16):2849-54.
- [19] Jurman D, Jankovec M, Kamnik R, Topič M. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007; 138 (2): 411-20.
- [20] Roeteberg D, Luinge HJ, Baten CTM, Veltink PH. Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2005; 13 (3): 395-405.
- [21] UM10204 - I²C-bus specification and user manual NXP Semiconductors. 2014; Revision 6:1-64.
- [22] Eisenreich D, DeMuth B. *Designing Embedded Internet Devices*, A volume in *Embedded Technology*. 2002.
- [23] Norkin CC, White DJ. *Measurement of joint motion: a guide to goniometry*. 4^a ed. Philadelphia: F. A. Davis; 2009.
- [24] Chaves TC, Nagamine HM, Belli JFC, de Hannai MCT, Bevilaqua-Grossi D, de Oliveira AS. Reliability of fleximetry and goniometry for assessing neck range of motion among children. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 2008; 12(4):283-9.
- [25] Swartz EE, Floyd RT, Cendoma M. Cervical spine functional anatomy and the biomechanics of injury due to compressive loading. *Journal of Athletic Training*. 2005; 40(3):155-61.
- [26] R.R. Caldas, Itúrbide F.A.S., F. Buarque L.N., Diogo Rativa. *Goniometria Baseada em Sensores Inerciais na nálise dos Movimentos Da Coluna Cervical*. Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2014.