

Dispositivo para a Medição de Intensidade e Acúmulo de Impactos para a Prática Esportiva

Device for Measuring Intensity and Accumulation of Impacts for Sports Practice

Dispositivo para Medir la Intensidad y Acumulación de Impactos para la Práctica Deportiva

Resumo

Atividades esportivas praticadas por atletas amadores ou profissionais estão sempre sujeitas aos impactos e podem, com o tempo ou com a intensidade, ocasionar lesões. Existem modalidades esportivas mais suscetíveis a impactos, principalmente nos membros inferiores. Movimentos repetitivos, de qualquer natureza, propiciam o surgimento de lesões ocasionadas por impacto que podem afastar atletas de suas atividades por longos períodos, prejudicando muito seu rendimento e condicionamento físico. Este artigo tem como objetivo apresentar um dispositivo portátil microcontrolado de baixo custo e baixo consumo de energia, capaz de medir e armazenar parâmetros ambientais e dados de impacto, referente às forças de reação do solo com os membros inferiores de atletas durante as práticas esportivas. A pesquisa evidencia a importância de que obter informação de impacto durante a prática esportiva pode prevenir que as lesões ou que as mesmas sejam agravadas. A coleta de parâmetros é importante para determinar as condições ideais de treinamento e estratégias de execução nas atividades esportivas. Por fim, tem-se a análise prévia do comportamento do dispositivo e o planejamento das novas etapas da pesquisa.

Palavras-chave: impacto; sensores; controle; microcontroladores; engenharia de sistemas & requisitos.

Abstract

Sports activities practiced by amateur or professional athletes are always subject to impacts and may, over time, or with intensity, cause injuries. Some sports are more susceptible to impacts, especially in lower limbs. Repetitive movements, of any nature, favor the appearance of injuries caused by impact that can keep athletes away from their activities for long periods, greatly impairing their performance and physical conditioning. This article aims to present a micro-controlled portable device of low cost and low energy consumption, capable of measuring and storing environmental parameters and impact data, referring to reaction forces of ground with the lower limbs of athletes during sports practices. The research highlights the importance that obtaining impact information during sports practice can prevent injuries or their worsening. Collection parameters is relevant to determine the ideal training condition, and execution strategies in sports activities. Finally, there is the prior analysis of the device's behavior and the planning of new research stages.

Keywords: impact; sensors; control; microcontrollers; systems engineering & requirements.

Resumen

Actividades deportivas practicadas por deportistas aficionados o profesionales están siempre sujetas a impactos y pueden, con el tiempo o con la intensidad, provocar lesiones. Existen modalidades deportivas más susceptibles a impactos, especialmente en los miembros inferiores. Movimientos repetitivos, de cualquier naturaleza, favorecen la aparición de lesiones provocadas por el impacto que pueden mantener a los deportistas alejados de sus actividades durante largos periodos, perjudicando enormemente su rendimiento y acondicionamiento físico. Este artículo tiene como objetivo presentar un dispositivo portátil

Filipe Wiltgen 
Universidade Taubaté
(Unitau)
LFWBarbosa@gmail.com

Francisco Chagas 
Universidade Taubaté
(Unitau)
chagas.jwmendes@gmail.com
e_eduardofontes@ufpi.edu.br

microcontrolado de bajo costo y bajo consumo energético, capaz de medir y almacenar parámetros ambientales y datos de impacto, referente a las fuerzas de reacción del suelo con los miembros inferiores de los deportistas durante las prácticas deportivas. La investigación enfoca la importancia de que la obtención de información de impacto durante la práctica deportiva puede prevenir lesiones o evitar empeorarlas. La recogida de parámetros es importante para determinar las condiciones ideales de entrenamiento y las estrategias de ejecución en las actividades deportivas. Finalmente, se tiene el análisis previo del comportamiento del dispositivo y la planificación de nuevas fases de investigación.

Palabras clave: *impacto; sensores; control; microcontroladores; ingeniería de sistemas y requisitos.*

1 Introdução

Desde muito tempo faz parte da cultura humana a prática de atividades físicas, ou esportivas. Isso inclui atletas amadores e profissionais preocupados com o condicionamento físico, sua saúde e qualidade de vida.

Na atualidade, é grande o número de modalidades esportivas praticadas por atletas amadores e profissionais as quais muitas possuem impacto dos membros inferiores com o solo. Modalidades esportivas profissionais exigem muito dos atletas, quase sempre exigindo movimentos repetitivos e com alto índice de impacto com o solo. A reação do solo gera um impacto de desaceleração que pode ocasionar lesões na estrutura musculoesquelético de um atleta com o passar do tempo ou quando o esforço é muito grande.

Lesões devido a impactos podem afastar os atletas profissionais de suas atividades esportivas ocasionando prejuízos financeiros, físicos e técnicos tanto aos atletas quanto às instituições envolvidas diretamente com a preparação dos atletas. Prevenir, ou mesmo minimizar o índice de lesões, permite aproveitar melhor os atletas nas atividades esportivas como treinos e competições.

Para uma estratégia adequada de treinos e competições, é importante saber de condições climáticas e principalmente das forças de impacto com o solo durante a prática esportiva. Os parâmetros medidos em ambientes controlados em laboratórios desenvolvem a reação com solo dos membros inferiores de atletas, principalmente em saltos verticais. Servindo como referências para as tomadas de decisões estratégicas de equipes esportivas, porém, as condições em ambientes controlados não representam a realidade das atividades praticadas em campo, em treinos reais e competições reais.

Assim, a proposta deste artigo é apresentar um dispositivo pequeno, portátil e individual que possa acompanhar em campo as atividades reais dos atletas, sem interferir no desempenho. O dispositivo eletrônico é baseado em sensores capazes de medir, monitorar e armazenar, além dos dados de esforço do atleta, parâmetros ambientais ocorridos durante as práticas esportivas. O dispositivo pode ser usado por atletas amadores e profissionais de qualquer idade.

O dispositivo possui sensores inerciais para realizar as medidas de inclinação do solo e das forças de impacto com o solo, contabilizando o acúmulo de impactos realizados durante a prática esportiva. O sistema microcontrolado do dispositivo realiza o armazenamento de dados via cartão de memória *Micro SD (Micro Secure Digital)* ou transmitindo de dados sem fio via *bluetooth*. Esse dispositivo possui também, um sensor para medida de pressão arterial, medida de temperatura, percentual de umidade relativa e pressão atmosférica local, além de uma bússola digital para orientação geográfica, um coletor de posicionamento global (GPS).

O dispositivo protótipo, e aqui apresentado, pode monitorar, armazenar e transmitir parâmetros de treinos e competições. Os dados podem ser transmitidos para um aparelho celular com um aplicativo específico que irá analisar, calcular e informar de maneira simples os parâmetros ambientais e as forças de impacto sobre os membros inferiores do atleta.

No decorrer do artigo, será apresentado o protótipo construído para testes em ambiente controlado de laboratório (*DT&E – Developmental Test and Evaluation*); compreendendo o entendimento e a explicação como algo importante para medir os impactos repetitivos com o solo em atletas, apresentar o circuito eletrônico do dispositivo proposto e os tipos de sensores, sistema de controle e sistema de comunicação utilizado no dispositivo, além da análise dos resultados dos testes realizados, e por fim, gerar discussão sobre a pesquisa e os próximos passos no desenvolvimento desse dispositivo.

1.1 Objetivo, Justificativa e Propósito

O objetivo desse artigo é substanciar a necessidade de utilizar algum equipamento que seja capaz de monitorar e quantificar a intensidade de impacto com o solo que um atleta realiza ao praticar algum esporte; e com isso apresentar uma proposta de equipamento que possa realizar a coleta de dados do atleta em seu ambiente real de treinos e de competições, de tal forma que seja um dispositivo capaz de orientar o esforço realizado pelo atleta, ajudando, assim, a evitar lesões. A justificativa e o propósito desse artigo é fornecer uma maneira eficiente e portátil de contabilizar o esforço físico de atletas amadores e profissionais durante a realização da prática esportiva através de um dispositivo leve, de baixo custo e baixo consumo de energia, permitindo aos atletas monitorar a quantidade de impactos realizados com o solo e suas respectivas intensidades, e, assim, definir estratégias para treinos e competições.

2 O Efeito do Impacto Repetitivo com o Solo em Práticas Esportivas

Em diversas modalidades esportivas, existem saltos, corridas e contato físico indesejado, os quais podem levar um atleta a lesões. O equipamento proposto neste artigo tem a finalidade de contabilizar a quantidade e a intensidade de impactos ocorridos durante um evento, ou diversos eventos realizados pelo atleta que utilizar o aparelho.

Quase sempre as lesões em atletas, principalmente profissionais, ocorre pelo esforço e repetição de movimentos que acumulam impactos em determinadas regiões musculoesqueléticas. Cada prática esportiva terá características diferentes de lesão por impacto com o solo, dado a intensidade dos exercícios e repetições do movimento necessárias para um bom desempenho esportivo.

Em atletas praticantes de basquetebol e voleibol, ao realizar os treinos e partidas de competição, estão sempre sujeitos a lesões devido a biomecânica dos saltos para os arremessos e as defesas; que na verdade são uma sequência de movimentos repetitivos e recorrentes que levam ao acometimento de lesões; principalmente nos movimentos de saltos durante aterrissagem que podem ocasionar lesões nos joelhos e tornozelos, regiões que sofrem mais com os impactos (PIUCCO *et al.*, 2007; SANTOS *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2007).

Nas modalidades esportivas praticadas de maneira coletiva, muitas apresentam um elevado índice de lesões quando comparadas às atividades esportivas individuais. Competitividade e habilidades distintas apresentadas pelos atletas profissionais acarretam choques corporais entre os participantes e levam ao contato físico indesejado, fatores importantes e causadores de lesões (ALMERON *et al.*, 2009), assim como ocorre no futebol, atividade responsável por representar de 50% a 60% de todas as lesões ocasionadas no esporte com afastamento das atividades por um longo período de tempo (FONSECA *et al.*, 2007).

A falta de orientação adequada aos atletas amadores e praticantes de corrida de rua, associado ao impacto das forças de reação com o solo durante treinos e competições, podem ocasionar lesões. Pesquisas apontam que, aproximadamente, 50% de uma amostragem de atletas corredores de rua, sem distinção de gênero, em algum momento foram afastados de suas atividades esportivas por terem sofrido algum tipo de lesão nos membros inferiores, principalmente nos joelhos (OLIVEIRA *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2014; HASE *et al.*, 2002). O esforço e a distância percorrida associada aos movimentos repetitivos são os mecanismos que frequentemente levam a lesões. O aumento da distância percorrida sugere uma maior intensidade, maior frequência das passadas e maior velocidade, tornando maior o acúmulo dos impactos e elevando o índice de lesões nas articulações dos joelhos (ISHIDA *et al.*, 2013).

É importante ressaltar a necessidade da realização de estudos quanto a magnitude e intensidade das forças de impacto suportadas pelo corpo humano durante as práticas esportivas, quantificar e apresentar resultados condizentes aos impactos característicos e inerentes a cada modalidade esportiva, trará benefícios a prática esportiva prolongada (MANN *et al.*, 2010; HIRAI *et al.*, 1998; HODGINS, 1996). O crescente interesse das pessoas por uma melhor qualidade de vida, é relevante e significativo, o que torna tão importante uma forma de monitorar o esforço físico para prevenir lesões durante a realização de esportes (SANTOS *et al.*, 2007).

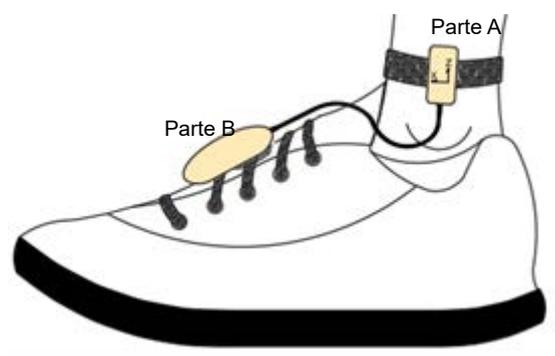
3 Dispositivo de Medição de Impacto e seus Principais Componentes

O dispositivo aqui proposto utiliza componentes de fácil aquisição e de baixo custo. Entretanto, sua integração em um único aparelho é capaz de contabilizar o impacto com o solo, assim como a coleta dados de batimento cardíaco, temperatura e oximetria do atleta, é claro, também a posição GPS ao longo do trajeto, temperatura, umidade e pressão atmosférica do equipamento em uso.

O sistema de controle empregado na integração e coleta de dados dos sensores, e, também, nos sistemas de gravação e transmissão de dados utiliza um microcontrolador da plataforma Arduino, mas poderia ser qualquer tipo de microcontrolador. O principal requisito deste microcontrolador são os números de portas de entrada/saída (I/O), consumo de energia, tamanho e peso. Nesse dispositivo foi adotado o menor microcontrolador da plataforma Arduino, o *Atto* (~10,5mm de comprimento por ~11,5mm de largura). Entretanto, nos testes desse protótipo optou-se por utilizar o *Arduino Pro Mini ATmega328P* (~33mm de comprimento por ~18mm de largura).

Seu invólucro foi projetado e construído em plástico (PLA) via manufatura aditiva (impressão 3D), composto por duas partes, uma parte composta pelos sensores principais que ficam em contato direto com a perna do atleta (Parte A), e outro com a bateria, sistemas de comunicação e gravação, sensores ambientais, GPS, relógio e o sistema de controle que é fixado no calçado do atleta junto aos cadarços (Parte B), como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração do dispositivo de impacto (cor bege). Fixado ao atleta (Parte A), no calçado (Parte B)

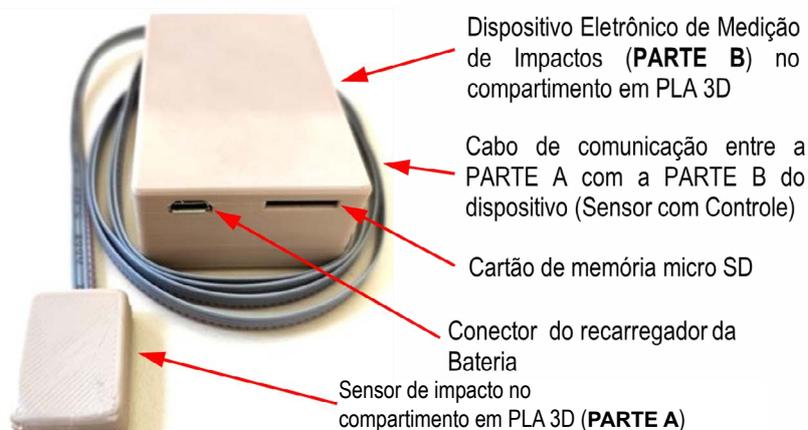


Fonte: Autoria própria

As partes A e B da Figura 1 foram construídas via manufatura aditiva (WILTGEN, 2019) com a finalidade de proporcionar uma estrutura rígida e personalizada para as necessidades de desenvolvimento desse protótipo.

Na Figura 2 é possível ver em uma foto as duas partes do protótipo que foram construídas em impressão 3D para abrigar os circuitos eletrônicos de controle, comunicação e sensores, possibilitando, assim, a realização dos testes em ambiente controlado de laboratório (*DT&E – Developmental Test and Evaluation*) com a finalidade de avaliar se o dispositivo é capaz de operar conforme os requisitos do projeto (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2022A; WILTGEN, 2022B; LOUCOPOULOS; KARAKOSTAS, 1995; KOTONYA; SOMMERVILLE, 1998).

Figura 2 – Protótipo funcional construído para realização dos testes com o dispositivo de medição de impacto.



Fonte: Autoria própria

Existem várias maneiras para medir a velocidade de um corpo em movimento, tendo a cinemática como responsável pela área de estudos, pois a velocidade de um corpo é sua variação em relação ao tempo, que se pode medir a grandeza de aceleração instantânea. A concepção construtiva de um acelerômetro pode ser simples ou complexa, como os mecânicos e os eletrônicos, pelas quais têm-se aplicações específicas e podem ser usados na biomecânica, sistema de navegação inercial, robótica, jogos eletrônicos em plataformas ou aplicativos de telefones móveis (ROCHA; MARRANGHELLO, 2013; FERREIRA, 2013).

Na década de 1950 foram realizadas as primeiras pesquisas do movimento humano utilizando acelerômetros, mas somente em meados da década de 70 que houve o aprimoramento dos acelerômetros. Os modernos acelerômetros construídos com componentes de sistemas microeletromecânicos (*MEMS – Micro Electro-Mechanical Systems*), termo cunhado pela DARPA que surgiu em meados da década de 80, têm como principais características o baixo consumo de energia elétrica por ter baixa potência, peso e tamanho reduzidos, alta confiabilidade e baixo custo (EL-SHEIMY YOUSSEF, 2020; FUJITA, 1997; YANG; HSU, 2010).

Dentre os sensores mais importantes desse dispositivo, tem-se a unidade inercial (EL-SHEIMY YOUSSEF, 2020; DAMIANOS; GIRARDIN, 2020) composta por um acelerômetro com um giroscópio integrado que permite obter a intensidade de um impacto, além de saber a posição e velocidade do impacto. Um acelerômetro é um dispositivo eletromecânico que mede deslocamento, usando a medição de aceleração indireta quando uma força é aplicada a um de seus eixos (DADAFSHAR, 2014; ROCHA; MARRANGHELLO, 2013). Pode ser utilizado para identificar a inclinação espacial de um objeto, medir vibrações em uma máquina e como equipamento de medição tridimensional, aplicado em jogos eletrônicos e em outros sistemas. O giroscópio é um dispositivo utilizado para medir velocidade angular de um corpo, ou a posição angular de um objeto que gira em torno do seu próprio eixo de rotação para obter os ângulos de orientação via os eixos do sistema de coordenadas (X, Y e Z). Esses sensores giroscópicos são empregados na orientação espacial de veículos espaciais, navais, aeronáuticos, entre outros.

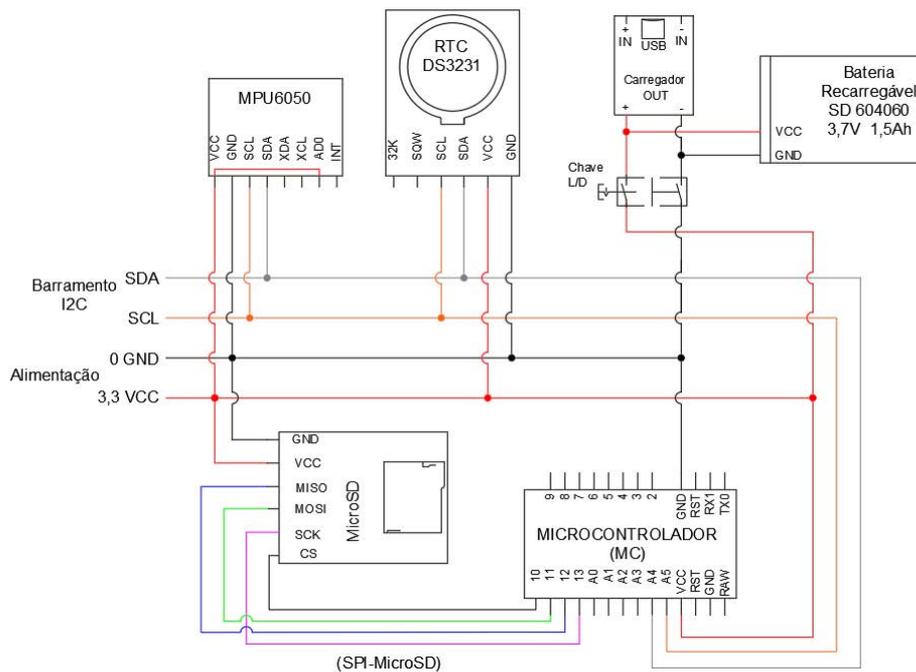
Na robótica móvel e na área militar aplicação desse dispositivo é de vital importância na detecção de movimentos de rolagem e arfagem para obter equilíbrio dinâmico, e em sistemas de estabilidade horizontal ou vertical de plataformas inerciais civis e militares em simuladores de voo e torretas de tiro em veículos (OLIVEIRA, *et al.*, 2005; FERREIRA, 2013; USUBAMATOV, 2016; TRIPATHI; GUPTA, 2019; FAISAL *et al.*, 2019).

Dessa forma uma unidade inercial de medição (*IMU – Inertial Measurement Units*) geralmente é composta por um sensor acelerômetro e um sensor giroscópio, podendo em alguns casos integrar também um sensor magnetômetro (o qual não se aplica nesse caso). A unidade inercial utilizada nesse desenvolvimento em vez de ter um magnetômetro possui um termômetro (sensor de temperatura) integrado ao conjunto (TRIPATHI; GUPTA, 2019).

Uma característica interessante desses sensores é que na detecção de inclinação os acelerômetros reagem lentamente e apresentam melhores resultados em longos períodos de tempo de medição. Entretanto, os giroscópios reagem rapidamente em curtos períodos de tempo de medição (FAISAL *et al.*, 2019), exigindo que o sistema de coleta de dados seja capaz de aproveitar os dados de cada sensor em seus distintos períodos de medição e características funcionais.

Para o sensor de impacto, foi utilizada a unidade inercial de medição *MPU-6050* da marca *Invensense*, constituída por um sensor acelerômetro de três eixos (*AcX*, *AcY* e *AcZ*), um giroscópio de três eixos (*GyX*, *GyY*, *GyZ*) e um sensor de temperatura integrado. Na montagem do dispositivo protótipo, a *MPU-6050* foi conectada ao barramento I²C (Circuito Interintegrado) para evitar conflito com o relógio de tempo real (*RTC DS3231*). Isso pode ser observado no detalhe do esquema de ligação do circuito do dispositivo de medição de impacto apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema de ligação dos componentes eletrônicos do dispositivo protótipo de medição de impacto



Fonte: Autoria própria

Na Figura 3 é possível observar que este circuito apresentado é um circuito de teste e não o circuito completo do dispositivo. Com a intenção de prosseguir conforme as diretrizes de Engenharia de Sistemas & Requisitos (WALDEN *et al.*, 2015; NASA, 2018; SYSTEM [...], 2001DoD, 2001), as partes do dispositivo são integradas conforme os resultados dos testes. O objetivo desses testes é avançar na coleta de dados e na caracterização dos sinais coletados do impacto com o solo, permitindo, assim, alcançar as etapas de maturidade tecnológica do dispositivo (*TRL - Technology Readiness Level*) conforme os testes de integração vão obtendo sucesso no funcionamento baseado nos requisitos de projeto (MANKINS, 2009; SAUSER *et al.*, 2010).

No circuito proposto na Figura 3 é possível perceber a disposição de dois barramentos, um destinado à comunicação (I²C) e outro de alimentação de energia elétrica em 3,3 Vcc. Nota-se também a inclusão da unidade de medição de impacto (*MPU6050*), do microcontrolador da plataforma Arduino (*Pro Mini ATmega328P*), o relógio de precisão em tempo real (*RTC DS3231*), a unidade de memória para gravação de dados (*Micro SD*), além da bateria de alimentação do circuito (*SD604060 – 3,7Vcc e 1,5Ah*) e o conector USB de recarga da bateria.

O sistema de controle possui um microcontrolador Arduino *Pro Mini* com 8MHz, 14 entradas/saídas (I/O) digitais, 6 entradas analógicas e os barramentos de comunicação I²C e SPI incorporados. Para o funcionamento do dispositivo foi adotado o tempo de ciclo de ~65 milissegundos, esse é o mesmo tempo adotado para a base de leitura e aquisição de sinais. O tempo de leitura e aquisição foi determinado levando em consideração o recorde mundial dos 100 metros rasos atual que é 9,58 segundos com 45 passos; sendo que a grande maioria dos corredores profissionais de 100 metros rasos, para a mesma distância, executa o trajeto utilizando 52 passos. Dessa forma, o tempo de cada passada por perna é de ~370 milissegundos, e o processamento do dispositivo realiza a aquisição de dados em ~65 milissegundos, adequada para a medição.

O relógio de precisão em tempo real (*RTC DS3231*) é o responsável por compatibilizar o tempo das atividades físicas executadas em data e hora. Ele registra e controla o tempo em hora, minuto, segundos, dia, mês e ano. Possui uma bateria de *backup* portátil *CR2032* que mantém a informação de tempo mesmo com o dispositivo desligado. Utiliza comunicação com barramento I²C que permite a conexão direta com microcontrolador operando na forma mestre e escrava e, mesmo com outros dispositivos conectados no mesmo barramento, permite ajuste e tem tensão de alimentação de 3,3Vcc até 5Vcc compatível com a bateria utilizada no dispositivo.

O leitor e gravador de cartão de memória (*Micro SD*) é o responsável por armazenar os dados coletados via o sistema de controle através dos sinais dos sensores do dispositivo durante a execução das atividades esportivas, possui comunicação de interface periférica serial (*SPI – Serial Peripheral Interface*) que é um barramento de comunicação serial síncrona, permitindo que os dispositivos via o microcontrolador possam utilizar a unidade como leitor ou gravador de dados através de cartão de memória *Micro SD*. A unidade de memória *Micro SD* opera conectada em *MISO (Master Input Slave Output)*, *MOSI (Master Output Slave Input)*, *SCLK (Serial Clock)* e *SS (Slave Select)* com taxa de transferência de dados de até 2Mbps.

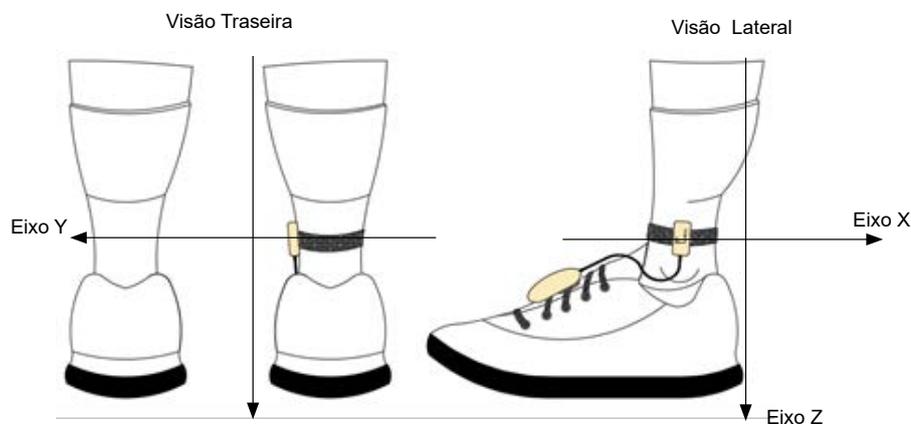
A bateria de polímero de Lítio recarregável adotada nesse protótipo foi da marca chinesa *Shenzhen* o modelo *SD604060* (3,7Vcc e 1,5Ah), que possui o tamanho de 60mm de comprimento, 40mm de largura e 6mm de espessura; no qual seu peso, de apenas ~100g, permite ser utilizado pelo atleta sem afetar significativamente seu esforço, garantindo uma longa autonomia de uso do dispositivo.

4 Resultados e Análises dos Testes do Dispositivo em Ambiente Controlado (*DT&E*)

Os testes realizados com esse protótipo estão centrados no funcionamento do sensor de impacto com o solo, e conduzidos conforme o procedimento de ensaios baseado nas técnicas e orientações de Engenharia de Sistemas & Requisitos, contemplando apenas a primeira etapa do plano de ensaios completo de Pesquisa, Desenvolvimento, Teste e Avaliação (*RDT&E – Research, Development, Test & Evaluation*), que são os testes em ambiente controlado de laboratório (*DT&E – Developmental Test and Evaluation*) (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2022A; WILTGEN, 2022B).

Esses testes têm como objetivo coletar e armazenar dados relativo aos três eixos do sensor acelerômetro *AcX*, *AcY* e *AcZ* e dos três eixos do sensor giroscópio *GyX*, *GyY* e *GyZ*, associados aos eixos do corpo humano, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Direção dos eixos de medição para proceder a coleta de dados com o dispositivo em prática esportiva.



Fonte: Autoria própria

O dispositivo em teste foi desenvolvido para ser fixado ao tornozelo de uma das pernas do atleta, chamado de Parte A do dispositivo, serve para coletar os sinais de impacto com solo. A outra Parte B do equipamento foi montado com o microcontrolador, relógio de precisão, unidade de memória e bateria de alimentação.

Para proteger e acomodar o sistema de controle de umidade, até mesmo o suor do atleta, os componentes foram acomodados no compartimento lacrado do dispositivo (Parte A). Assim, a unidade de medição inercial *MPU-6050* foi acomodada em um compartimento específico (Parte A) de pequenas dimensões (26x20x9mm), com peso de 7g, evitando uma possível interferência no desempenho do atleta.

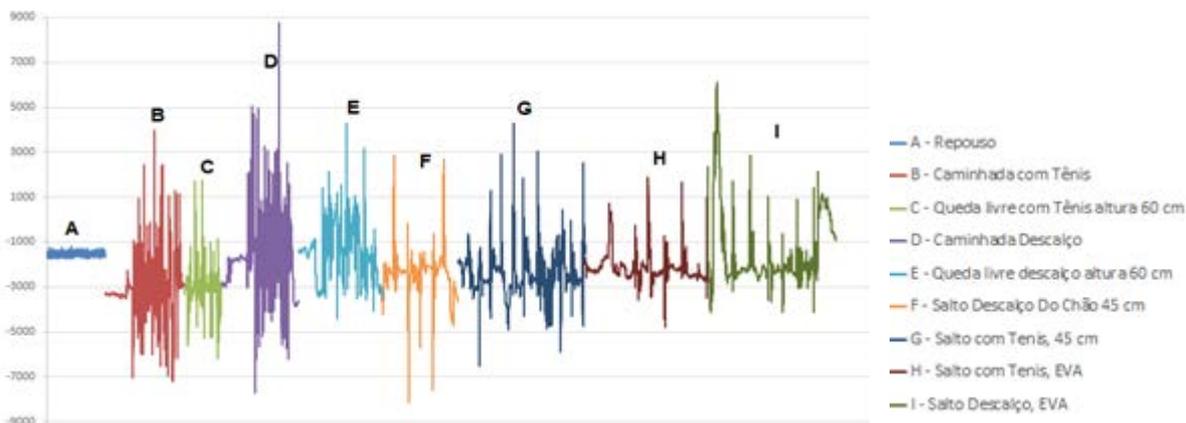
A ligação física do sistema de controle (Parte B) e os sensores da unidade inercial de medição foi realizada através de *flat cable* para maior comodidade do atleta, permitindo fixar o dispositivo (Parte A) de forma mais fácil na perna do atleta através de uma fita elástica adesiva. Na Parte B, ou compartimento do sistema de controle, há dimensões de 67mm de comprimento, 45mm de largura e 25mm de altura, e pesa 71g.

A fixação dos sensores inerciais deve ser feita acima do tornozelo em uma das pernas do atleta, região que recebe os maiores impactos na realização de saltos verticais.

Para realizar os testes o sensor de impactos, o sensor foi fixado ligeiramente acima do tornozelo da perna direita do atleta, ponto que sofre maior carga de impacto. Nesses testes o sensor foi preso com uma fita adesiva para melhor fixação e firmeza, além de ser coberto por uma meia elástica confortável.

Durante a execução dos testes com o dispositivo, todos os resultados dos testes foram coletados e armazenados no cartão de memória do tipo *Micro SD*. Todos os dados coletados podem ser vistos na Figura 5, os quais correspondem aos parâmetros de posição estática, caminhadas, e diversos tipos de saltos verticais, com e sem calçado.

Figura 5 – Dados brutos (sem tratamento de sinal) coletados dos oito testes realizados.



Fonte: Autoria própria

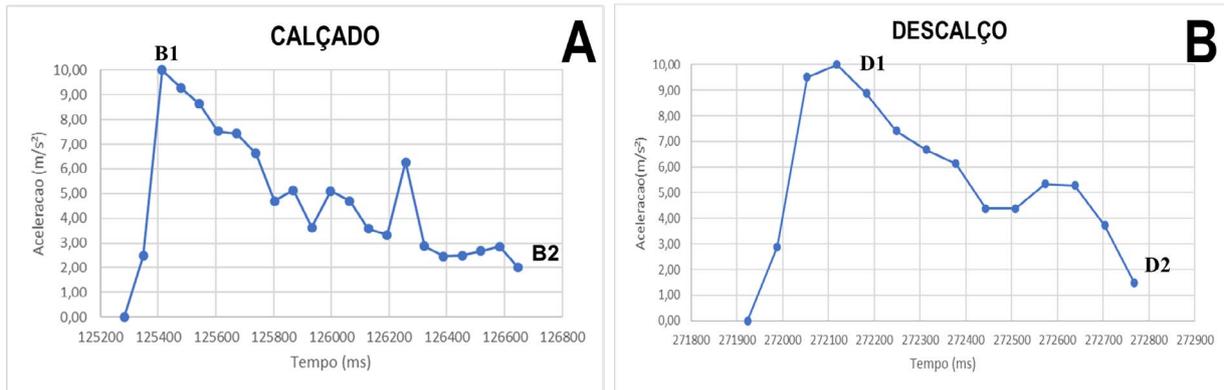
A maior intensidade de impacto com o solo nesses testes foi observada nos saltos verticais e até mesmo nos movimentos mais simples – como de uma caminhada –, na direção e sentido do eixo vertical “Z” (Eixo Z na Figura 4) de referência do corpo humano; observando que no dispositivo esse é o eixo que requer maior atenção quanto a análise e estudos das forças de reação com solo nas práticas esportivas por possuir alto índice de impacto, e, portanto, podendo provocar lesões.

Com a coleta dos parâmetros foram obtidos os sinais correspondentes aos movimentos realizados pelo atleta em teste. Nas próximas figuras é possível perceber que o sinal foi tratado e filtrado, além disso foram escolhidos os sinais mais representativos de impacto, bem como foram extraídos os trechos correspondentes apenas às ações de interesse para a análise do impacto nas atividades praticadas; principalmente referente a caminhada e saltos verticais, praticados com e sem calçado.

O primeiro conjunto de sinais referentes a impactos medidos com o dispositivo protótipo pode ser visto na Figura 6 A e B. Observa-se que nesses sinais houve a aplicação de um filtro de Kalman para atenuar e/ou eliminar os sinais espúrios considerados como ruídos do ambiente.

Estes sinais foram obtidos com um teste em caminhada com velocidade constante e moderada de ~7 km/h percorrendo distância de ~120m com ~136 passos, mantendo a mesma velocidade média (calçado ou descalço). Foi realizado com o atleta calçado (A) com um par de tênis e, posteriormente, com ele descalço (B), ou seja, o atleta sem tênis, realizando-se novo teste com a mesma distância e velocidade. Nota-se, nos sinais, que o máximo impacto foi da ordem de 10m/s^2 tanto com calçado quanto descalço. Na caminhada, calçado (A) é possível ver que, em determinado momento, houve um pico $\sim 6,5\text{m/s}^2$ desproporcional na variação de impactos causados pelos passos executados e medidos na perna direita do atleta. Apesar da média dos impactos com o atleta calçado ser menor que a do atleta descalço, é possível perceber maior variação dos impactos com o solo.

Figura 6 – Dados coletados em caminhada com o atleta utilizando calçado (A) e descalço (B)

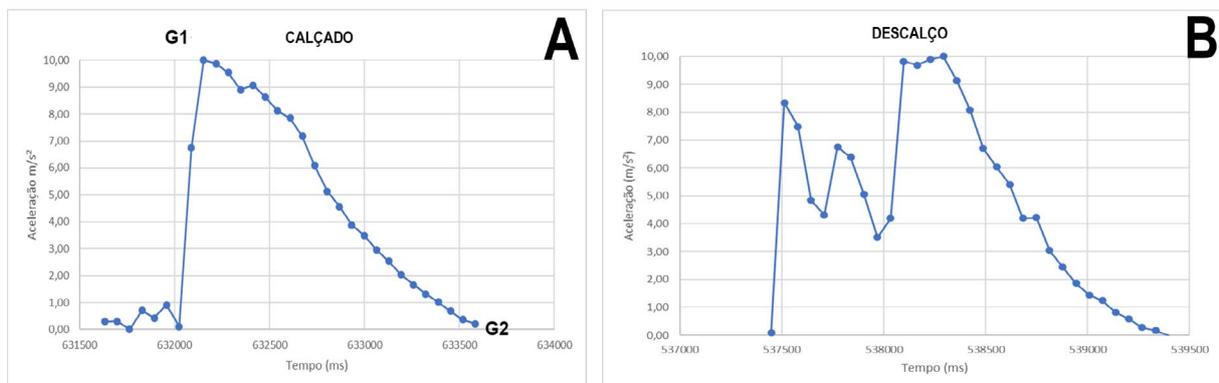


Fonte: Autoria própria

O principal movimento que causa lesões vem da dinâmica da biomecânica dos saltos verticais com impulsão durante a aterrissagem. Esses testes são importantes para determinar os máximos impactos resultantes das forças de reação com solo. Os testes foram conduzidos com calçado e sem calçado. Cada salto impulsado partiu do chão até uma altura de ~450mm na vertical. O salto vertical calçado pode ser visto na Figura 7 A: nesse salto foi registrado um único impacto de ~10m/s² e uma leve variação ocasionada pelo amortecimento do calçado em ~9m/s².

Na Figura 7 B tem-se o salto do atleta sem calçado: nesse sinal é possível perceber que o amortecimento sofreu uma grande oscilação devido a múltiplos impactos (~8,5m/s², ~7m/s² e 10m/s²) durante a aterrissagem do salto dado que não havia um componente importante para amortecer o impacto do salto.

Figura 7 – Dados coletados em saltos verticais de 450mm com o atleta utilizando calçado (A) e descalço (B)



Fonte: Autoria própria

Os sinais coletados com o dispositivo durante estes testes preliminares mostram-se promissores, bem como os resultados animadores.

Os sinais medidos com os sensores inerciais nesses testes foram armazenados na unidade de memória *Micro SD* com a extensão de arquivo de dados do tipo “.txt”, registrando a data, hora e todos os parâmetros dos sensores inerciais. Esses sinais são lidos e apresentados em um programa de planilha gráfica que permite a análise detalhada das curvas obtidas nos testes com dispositivo protótipo.

Esses testes preliminares permitem evoluir na pesquisa e no desenvolvimento do dispositivo, prosseguindo no plano de testes (*RDT&E*) com a integração do sistema completo e novos testes em ambiente controlado para verificar o comportamento do dispositivo.

5 Discussão e Conclusão

Durante os testes iniciais de desenvolvimento, foi possível observar que sem muito esforço do atleta, ou seja, sem que o período de prática esportiva similar a um treino real, foram registrados impactos de ~10m/s², ou

seja, da ordem de uma gravidade (Força G – constante gravitacional) em uma simples caminhada que ele faz calçado. O que mostra que o acúmulo de impactos na condição de um treino real pode ser muito significativo.

As lesões esportivas são um fato, e quase sempre ocorrem durante a prática da atividade esportiva. Entretanto, isso parece ser causado pela constância de movimentos repetitivos e pelo acúmulo de impactos ocorridos dentro de um intervalo de tempo. Com equipamentos capazes de estabelecer a quantidade e intensidade de impactos nas práticas esportivas, a comunidade formada por treinadores, fisioterapeutas e médicos poderá se apoiar em dados e investigar melhor os efeitos dos impactos nas lesões dos atletas.

Entender e construir um panorama amplo da quantificação do esforço que não se traduz em uma lesão e o que propicia a lesão não é uma tarefa simples, dado que cada organismo reage diferentemente aos esforços físicos, quer seja por sua constituição, quer seja pela idade, peso, massa muscular, preparação, dentre outros inúmeros fatores necessários para formar grupos de controle e de teste.

Nessa pesquisa o objetivo é dispor de um dispositivo portátil, que seja leve, robusto e de baixo custo para propiciar uma forma de obter dados reais de acúmulo e intensidade de impactos com o solo, e, assim, ajudar no condicionamento de treinos e competições para atletas amadores e profissionais.

O dispositivo encontra-se na fase de plano de testes de integração, necessitando realizar testes em ambiente controlado, monitorando os sinais de impacto em conjunto com localização geográfica (GPS), comunicação *bluetooth*, coleta de temperatura corpórea e ambiente, frequência cardíaca e oximetria, e dados ambientais referentes à unidade meteorológica embarcada.

Os próximos testes *DT&E* com o dispositivo completamente integrado com todos os outros componentes devem apresentar sinais mais claros da intensidade dos impactos, e, também, contabilizar o acúmulo dentro de um intervalo de tempo, a fim de observar a fadiga do atleta em testes mais longos. Corresponder os dados dos impactos, com a temperatura corpórea, frequência cardíaca e oximetria, além de possibilitar a análise do ambiente no momento da prática esportiva. Desse modo, isso ajudará no desenvolvimento de um aplicativo para telefones celulares no qual ficará explícito ao atleta o esforço realizado em cada atividade esportiva.

Compreende-se, então, que a prática de atividade esportiva é muito importante para a saúde humana física e mental e que desenvolver um dispositivo que possa ser amplamente difundido para ajudar a evitar lesões pode ser um fator diferencial para muitos atletas no futuro próximo.

Referências

- ALMERON, M. M.; PACHECO, A. M.; PACHECO, I. Relação entre Fatores de Risco Intrínsecos e Extrínsecos e a Prevalência de Lesões em Membros Inferiores em Atletas de Basquetebol e Voleibol. **Revista Ciência & Saúde**, [s. l.], v.2, n.2, p.58-65, 2009.
- DADAFSHAR, M. Accelerometer and Gyroscopes Sensors: operation, sensing and application. **Maxim Integrated**, [s. l.], Application Note 5830, p.1-11, Mar. 2014.
- DAMIANOS, D.; GIRARDIN, G. High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace and Industrial Applications 2020. **Yole Développement Market & Technology Report**, [s. l.], Aug. 2020.
- EL-SHEIMY, N.; YOUSSEF, A. Inertial Sensors Technologies for Navigation Applications: State of The Art and Future Trends. **Satellit Navigation**, [s. l.], v.1, n.2, p.1-21, 2020.
- FAISAL, I.A.; PURBOYO, T. W.; ANSORI, A. A Review of Accelerometer Sensor and Gyroscope Sensor in IMU Sensors on Motion Capture. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, [s. l.], v.15, n.3, p.826-829, 2019.
- FERREIRA, Anderson Henrique Rodrigues. **Análise Eletromecânica do Giroscópio MEMS**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2013.
- FONSECA, Sérgio Teixeira da *et al.* Caracterização da Performance Muscular em Atletas Profissionais de Futebol. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, [s. l.], v.13, n.3, p.143-147, 2007.
- FUJITA, H. A Decade of Mems and its Future. *In: IEEE - THE TENTH ANNUAL INTERNATIONAL WORKSHOP ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, INVESTIGATION OF MICRO*

- STRUCTURES, SENSORS, ACTUATORS, MACHINES AND ROBOTS, 1997, Nagoya. **Proceedings** [...]. Nagoya : IEE, 26-28 Jan 1997. p.1-8, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1997>
- HASE, K.; ANDREWS B.J.; ZAVATSKY, A.B.; HALLIDAY, S.E. Biomechanics of Rowing (I. A Model Analysis of Musculo-Skeletal Loads in Rowing for Fitness). **JSME International Journal**.[s. l.], v.45, n.4, p.1073-1081, 2002.
- HIRAI, K.; HIROSE, M.; HAIKAWA, Y.; TAKENAKA, T. The Development of Honda Humanoid Robot. *In*: IEEE - INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (Cat. No.98CH36146), 1998, Leuven, Belgium. **Proceedings** [...]. Leuven, Belgium: IEEE, May 1998. p. 1321-1326, v.2, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1998.677288>
- HODGINS, J. K. Tree-Dimensional Human Running. *In*: IEEE - INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. 1996, Minneapolis, Minnesota. **Proceedings** [...]. Minneapolis, Minnesota: IEEE, Apr. 1996. p. 3271-3276. v.4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1996.509211>
- INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CHEMICAL CHANGES DURING FOOD PROCESSING, 2., 1984, Valencia. **Proceedings** [...]. Valencia: Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, 1984.
- ISHIDA, J.C; TURI, B.C.; PEREIRA-DA-SILVA, M.; AMARAL, S.L. Presença de Fatores de Risco de Doenças Cardiovasculares e de Lesões em Praticantes de Corrida de Rua. **Revista Brasileira de Educação Física e Esporte**, [s. l.], v.27, n.1, p.55-65, 2013.
- KOTONYA, G.; SOMMERVILLE, I., **Requirements Engineering: Process and Techniques**. John Wiley and Sons, 1998.
- LOUCOPOULOS, P.; KARAKOSTAS, V. **System Requirements Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1995.
- MANKINS, J. C. Technology Readiness Assessments: A Retrospective. **Acta Astronautica**, Amsterdam, v.65, n.9-10, p.1216-1223, 2009.
- MANN, L.; KLEINPAUL, J.F; TEIXEIRA, C.S.; MOTA, C.B. Modalidades Esportivas: Impacto, Lesões e a Força de Reação do Solo. **Revista da Educação Física de Maringá**, [s. l.], v.21, n.3, p.553-562, 2010.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **NASA Systems Engineering Handbook**: NASA/SP-2016-6105 Rev2. Houston: NASA, 2018. 298p. ISBN: 9781680920895.
- OLIVEIRA, E. J. L. de; SILVA, F. R. da; BARBOSA, L. F. W. Dispositivo Inercial Baseado em Giroscópio para Aplicação em Robótica. *In*: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO NA UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA, 8., 2008, São José dos Campos – SP. **Anais** [...]. São José dos Campos – SP: UNIVAP, 2008. p.1-4.
- OLIVEIRA, L. G. *et al.* Plataforma de Força Desenvolvida para Coleta de Dados no Remo Ergômetro. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMECÂNICA, 8., 2005, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: UFRGS, 2005. p.397-400.
- PIUCCO, T.; SANTOS, S.G; PACHECO, A.G; SOUZA, P.D; REIS, D.C. **Magnitude dos Impactos Durante as Aterrissagens no Basquete Associado com Lesões nos Membros Inferiores**. Universidade de Santa Catarina, p.1-7, 2007.
- ROCHA, F.S; MARRANGHELLO, G.F. Propriedades de um Acelerômetro Eletrônico e Possibilidades de uso no Ensino de Mecânica. **Latin-American Journal of Physics Education**, [s. l.], v.7, n.1, p.37-46, 2013.
- SANTOS, S.G.; DETANICO, D.; REIS, D.C. Magnitudes de Impacto e Cinemática dos Membros Inferiores no Arremesso em Suspensão no Handebol. **Revista Brasileira Cineantropometria e Desempenho Humano**, [s. l.], v.11, n.3, p.326-333, 2009.
- SANTOS, S.G.; PIUCCO, T.; REIS, D.C. Fatores que Interferem nas Lesões de Atletas Amadores de

Voleibol. **Revista Brasileira de Cineantropometria Desempenho Humano**, [s. l.], v.9, n.2, p.189-195, 2007.

SAUSER, B.J.; GOVE, R.; FORBES, E.; RAMIREZ-MARQUEZ, J.E. Integration Maturity Metrics: Development of an Integration Readiness Level. **Information Knowledge Systems Management**, Amsterdam, v.9, n.1, p.17-46, 2010.

SILVA, A.S.M., **Wearable Sensors Systems for Human Motion Analysis Sports and Rehabilitation**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Porto, Lisboa, 2014.

SYSTEM Engineering Fundamentals (Department of Defense – DoD 22060-5565). Virginia: Defense Acquisition University Press Fort Belvoir, 2001. 223p.

TRIPATHI, V.; GUPTA, R. Self-Stabilizing Platform Using MPU 6050 – a Boon for The Society To Reduce Accidental Death. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, [s. l.], v.8, n.4, p.254-257, 2019.

USUBAMATOV, P. A Mathematical Model for Motions of Gyroscope. **Cogent Engineering**, [s. l.], v.3, p.1-15, 2016.

WALDEN, D. D. (ed.). **Systems Engineering Handbook: a guide for system life cycle processes and activities**. (INCOSE-TP-2003-002-04). Version 4.0. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2015. ISBN: 9781118999400.

WILTGEN, F. Projetos Baseados em Requisitos. **Revista Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], p.1-17, 2022a.

WILTGEN, F. Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 10., 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: 5-7 agosto, 2019.

WILTGEN, F. Prototypes are Important. **e-Transformation**, aguardando publicação, p.1-9, 2022b.

WILTGEN, F., Técnica de Ensaio de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, [s. l.], v.4, n.1, p.51-60, 2020.

YANG, C. C.; HSU, Y. L. A Review of Accelerometry-Based Wearable Motion Detectors for Physical Activity Monitoring Sensors. **National Library of Medicine**, [s. l.] v.10, n.8, p.7772-7788, 2010.

Sobre os autores

Filipe Wiltgen (L. F. W. Barbosa)

Doutor em Dispositivos Eletrônicos e Computação na área de Fusão Termonuclear Controlada utilizando inteligência artificial para controle do plasma de Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 2003, Mestre em Dispositivos Eletrônicos e Computação na área de Fusão Termonuclear Controlada utilizando controle de campos magnéticos para confinamento e produção de plasma em Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 1998 e Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica de Potência pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 1994. Atualmente, professor do Programa de Mestrado em Engenharia, além de coordenador e professor no curso de pós-graduação especialização em Energia Solar Fotovoltaica na Universidade de Taubaté (UNITAU). Publicou em 2018 o livro *Sistema Inteligente para Controle do Plasma em Máquinas tipo TOKAMAK – Aplicação de Sistemas de Controle com Inteligência Artificial* (ISBN-10: 6139632250).

Francisco Chagas

Formado em pedagogia pela Faculdade Associada Brasil (FAB) em 2018, e em Mecânica e Automação pelo Centro Universitário de Santo André (UNI-A) em 2006. Pós-Graduado em Educação pelo Centro Universitário de Santo André (UNI-A) em 2006. Graduado em Tecnologia Mecânica com ênfase em Tecnologia de Soldagem pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP) em 2002. Atualmente é estudante de Mestrado em Engenharia Mecânica na Universidade de Taubaté (UNITAU), professor na escola técnica estadual Jorge Street e coordenador de projeto e desenvolvimento de produtos na empresa Equilam.

Avaliado em: 09.09.2022

Aceito em: 18.09.2023