

SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MEMBROS SUPERIORES DE ATLETAS DE NATAÇÃO

ELCIO A. B. JUNIOR*, LEANDRO DOS S. COELHO*, ROBERTO Z. FREIRE*, RICARDO A. DIOGO†

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)*

† *Coordenação de Engenharia de Controle e Automação*

Escola Politécnica (EP)

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)

Rua Imaculada Conceição 1155, Prado Velho, 80215-901

Curitiba, Paraná, Brasil

*E-mails: elcio.bardeli@pucpr.br, leandro.coelho@pucpr.br,
roberto.freire@pucpr.br, r.diogo@pucpr.br*

Abstract—Swimming is one of the most challenging sport for the application of biomechanical analysis. This is because the human being interacts with an environment that is not part of his nature, and due to this factor, several physical principles of fluid mechanics should be considered in these analyzes of swimmer's movements. In this sense, equipments to measure and evaluate the performance of swimmers have been developed, being this, the context of this work, which is divided into two fronts. The first, deals with the development of a system capable of data acquisition of the angles and the pressures that the hands of the swimmer exert in the aquatic environment. In this regard, we developed a prototype considering as a requirement a low sampling period. The second part concerns the development of a specialist software in MATLAB environment, able to receive the data collected by the acquisition system and present to the user, informations that allows the coach or a specialist analyze the movement of the upper limbs of the athletes. Finally, this paper presents the tests procedure and calibration of the equipment.

Keywords—Swimming, Performance, System, Movement.

Resumo—A natação é um dos mais desafiadores esportes para aplicação da análise biomecânica. Isso porque o ser humano interage com um ambiente que não é o seu por natureza e, devido a este fator, diversos princípios físicos da mecânica dos fluidos devem ser considerados na análise dos movimentos do nadador. Neste sentido, equipamentos para mensurar e avaliar o desempenho de atletas de natação vem sendo desenvolvidos, sendo este o contexto deste trabalho, o qual está dividido em duas frentes. A primeira aborda o desenvolvimento de um sistema capaz de fazer a aquisição de dados dos ângulos e das pressões que as mãos de um nadador exercem no meio aquático. Neste sentido, foi desenvolvido um protótipo considerando como requisito um baixo período de amostragem. Já a segunda parte diz respeito ao desenvolvimento de um *software* especialista em ambiente MATLAB, capaz de receber os dados coletados pelo sistema aquisição e apresentar ao usuário informações que possibilitem ao treinador, ou especialista, analisar o movimento dos membros superiores do atleta. Por fim, este trabalho apresenta os procedimento de teste e calibração do equipamento.

Palavras-chave—Natação, Desempenho, Sistema, Movimento.

1 Introdução

O esporte, numa visão geral, está em constante evolução e com isso todas as modalidades esportivas procuram meios de aumentar o seu nível de competitividade, fazendo com que cada vez mais as diferenças entre atletas e equipes diminua. Portanto, qualquer melhoria no desempenho de um atleta, significa uma vantagem a mais para que ele possa brigar por melhores colocações ou até mesmo vencer as competições em que participa.

Na natação, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para que atletas aperfeiçoem a técnica, a força, a resistência e a velocidade. Através da análise biomecânica do movimento, é possível trabalhar em partes específicas de seus movimentos, desde a largada até a chegada, de forma que o seu desempenho seja cada vez melhor, reduzindo assim o tempo das provas.

Nos esportes aquáticos, câmeras instaladas por toda a piscina, sensores que capturam todos os movimentos do corpo e maiôs de alta tecnologia vêm

contribuindo significativamente para o aumento do desempenho de atletas de ponta e para a quebra de recordes olímpicos e mundiais. Neste contexto, (Abralde et al., 2014) utilizaram um equipamento para medir velocidade dos atletas e analisar a fadiga relacionada as pernadas durante o nado. (Cruz et al., 2014) apresentaram um equipamento similar, porém de baixo custo. Tal equipamento foi proposto com objetivo de coletar dados para criação de um modelo baseado em redes neurais artificiais (RNN), de modo a comparar o desempenho de atletas que competem um mesmo estilo de nado e distância. Este modelo foi melhorado utilizando uma metaheurística de otimização multiobjetivo em (Ayala et al., 2014). Já em (Slawson et al., 2013), a análise dos atletas de natação foi feita utilizando um bloco de partida monitorado por sensores de pressão, relacionando a força aplicada sobre o bloco com o desempenho da partida do atleta. Por fim, também utilizando sensores de pressão em uma placa específica para análise de viradas, (Cossor et al., 2014) utilizaram diversos sensores de pressão acoplados a um bloco de partida para analisar o efeito das variações de força no de-

sempenho dos atletas durante as partidas de provas que iniciam sobre o bloco.

Este artigo tem o intuito de apresentar um dispositivo que foi desenvolvido para fazer coleta de dados relativos aos movimentos dos membros superiores de atletas de natação, tomando-se como base os trabalhos apresentados por (Maglischo, 2003), (Takagi, 2002) e (Shigetada et al., 2012), que serão discutidos em detalhes ao longo deste trabalho.

As pressões que as mãos de um nadador exercem durante todas as fases de seu nado, desde o momento que entra em contato com a água até o momento em que deixa o meio aquático é o objeto de estudo abordado neste trabalho. Utilizando-se desses dados, torna-se possível verificar em quais fases da braçada o atleta está cometendo alguma falha na técnica relacionada ao estilo, auxiliando assim treinadores e especialistas em biomecânica do esporte a analisar movimentos que, em sua maioria, são executados de forma rápida, dificultando a percepção mesmo aos olhos mais experientes.

A próxima seção deste artigo apresenta estudos já realizados exclusivamente de análises biomecânicas dos membros superiores de nadadores. Na seção 3 são demonstrados os itens que foram escolhidos para a produção do *hardware* do sistema de aquisição. Já a seção 4 trata da programação, tanto da parte de aquisição de dados (*firmware*), quanto da parte de análise final do conjunto coletado (*software*). A seção 5, explica como foram realizados os testes de escala real e na seção 6 está apresentada a análise dos dados. Por fim, na seção 7 estão as considerações finais do projeto apresentado neste artigo.

2 Análise Biomecânica dos Membros Superiores de Nadadores

O modelo proposto por (Shigetada et al., 2012) representa a criação de um protótipo que faz a leitura de doze sensores dispostos nas mãos de nadadores, de modo a coletar dados das forças que o atleta exerce na água, com os seus membros superiores, de modo a mensurar a força de propulsão do atleta. Para este estudo, Shigetada imobilizou as pernas do atleta para verificar efetivamente quais as forças que são realizadas somente pelos braços (Figura 1).

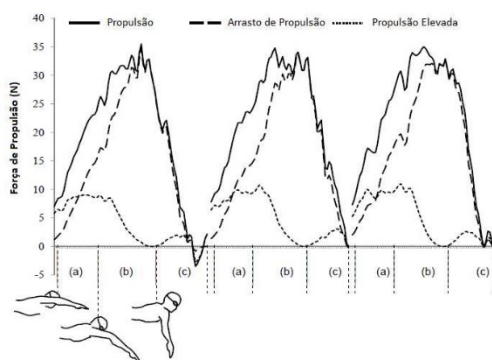


Figura 1. Metodologia de (Shigetada et al., 2012).

Já (Maglischo, 2003), demonstra quais são os ângulos ideais das mãos do atleta durante a sua braçada para conseguir exercer a melhor dinâmica de seu movimento (Figura 2).

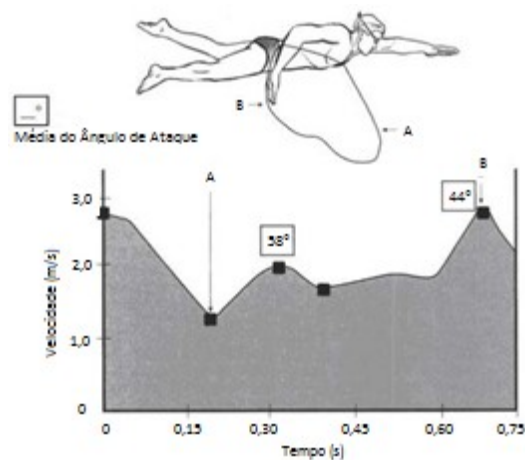


Figura 2. Angulação das mãos no nado *crawl* (Maglischo, 2003).

E a base para o desenvolvimento do protótipo, veio da metodologia proposta por (Takagi, 2002), onde foram instalados oito sensores nas mãos do nadador, para medir as forças exercidas pelo plano da mão (F_v) e as forças exercidas por toda a palma da mão (F_h), ambas em newtons (Figura 3).

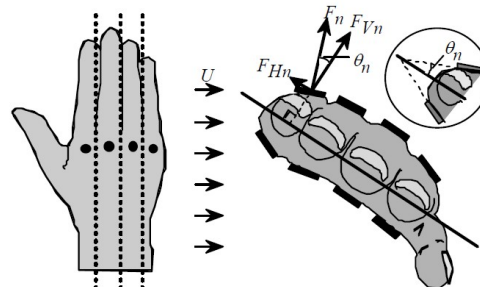


Figura 3. Metodologia de Hideki (Takagi, 2002).

$$F_v = \sum_{n=1}^8 P_n \cdot \cos \theta_n \cdot \frac{A}{8} \quad (1)$$

$$F_h = \sum_{n=1}^8 P_n \cdot \sin \theta_n \cdot \frac{A}{8} \quad (2)$$

Nas Equações 1 e 2, P_n representa o valor da pressão do sensor de número n , θ é a angulação entre o eixo central da mão e a superfície de cada sensor e A é a área da superfície da mão do atleta.

A seguir serão apresentados os pontos chave para o desenvolvimento do *hardware* e do *software* propostos neste trabalho, os testes já realizados com o sistema, os resultados obtidos e ao final as considerações a respeito do protótipo.

3 Hardware para Medição

Como todo o equipamento foi projetado para ficar somente nas mãos do atleta, buscou-se utilizar módulos de tamanho pequeno para facilitar a sua instalação para realização de aquisições e minimizar os problemas com a movimentação dos membros superiores do nadador durante o seu nado efetivamente.

Para a capturar os dados de força na palma e na dorsal das mãos do atleta, poderiam também ter sido utilizados outros tipos de sensores, como *strain gauges*, capacitivos ou resistivos. Para o protótipo proposto neste trabalho, foram pesquisados apenas sensores do tipo resistivos, pela facilidade da utilização deles em circuitos eletrônicos, pela sua grande maioria ser impermeável e pelo custo dos sensores ser reduzido.

O sensor escolhido para a aquisição destes dados de pressão foi o FSR-400 (*Interlink Electronics*), visto na figura 4(a), cujas dimensões são ideais para a colocação nas juntas metacarpofalângicas, conforme (Takagi, 2002).

Para uma medição mais precisa dos ângulos em três eixos (x, y e z) das mãos do nadador, foi utilizado um conjunto composto por um acelerômetro e um giroscópio. O acelerômetro tem como função medir a intensidade da aceleração exercida sobre o corpo em que ele está fixado e o giroscópio utiliza o princípio da conservação do momento, o qual consiste em uma roda livre para girar em qualquer direção e com a propriedade de opor-se a qualquer tentativa de mudança do movimento original. Desta maneira, através de uma fusão sensorial, com a junção dos sinais dos dois tipos de sensores, o ângulo estimado pela leitura dos sensores é mais confiável. Para o protótipo, foi selecionado o conjunto MPU-6050 (Figura 4(b)), que incorpora o giroscópio e o acelerômetro em uma mesma placa de tamanho reduzido, facilitando a utilização por parte do atleta, sem influência significativa quanto a restrição de movimentos.

Tendo em vista que os testes foram realizados em meio aquático e numa distância que deixa praticamente inviável a utilização de cabeamento, visto o efeito na dinâmica do movimento do nadador (Kane et al., 2014), optou-se por armazenar os dados em um cartão de memória, figura 4(c), este acoplado ao sistema de aquisição. Este tipo de configuração permite que os dados, após adquiridos, sejam formatados em uma extensão *.txt* e sejam abertos facilmente em outros programas computacionais para a sua devida análise e tratamento.

O *Arduino Nano*, figura 4(d), foi selecionado para gerenciar os sinais e o fluxo de dados no sistema. O dispositivo gerencia as informações provenientes dos sensores e grava estas informações no cartão de memória para posterior análise dos especialistas. O *Arduino Nano* foi adotado por possuir oito entradas analógicas, as quais serão totalmente utilizadas pelos sensores de pressão. Além disso, suas dimensões são bastante reduzidas, possibilitando o uso da placa na

mão do nadador sem influenciar significativamente na restrição de movimentos.

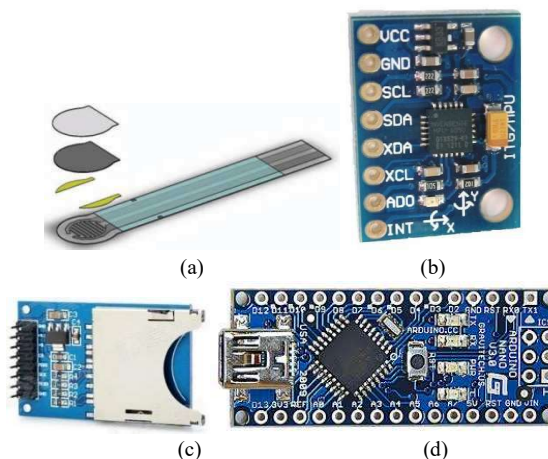


Figura 4. Hardware utilizado: (a) sensor de pressão FSR-400; (b) sensor de angulação MPU-6050; (c) módulo micro SD-Card; (d) Arduino Nano.

O peso total do sistema de aquisição, incluindo sensores, placas, e luva para uma das mãos é de 97g.

4 Desenvolvimento de Software

4.1 Firmware

O conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no *hardware* do dispositivo foi implementado utilizando a plataforma *Arduino IDE v1.5.4 BETA*, que é a plataforma *open-source* de programação para todos os modelos de *Arduino*. Conforme visto no diagrama apresentado na Figura 5, a base do código consiste na inclusão de bibliotecas para a utilização dos módulos citados no item 3 deste trabalho, e na criação e configuração de variáveis e funções.

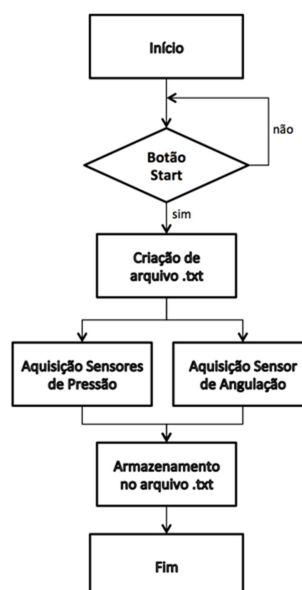


Figura 5. Fluxograma do firmware

4.2 Software para Tratamento de Dados

A plataforma escolhida para o tratamento dos dados foi o MATLAB, que é um *software* desenvolvido em linguagem C. O programa computacional desenvolvido tem a função de receber os dados gravados no módulo *SD-Card* a partir dos sensores de pressão e angulação, interpretá-los e, automaticamente, traçar gráficos para que a análise do nado possa ser feita por um especialista na área de biomecânica do esporte.

Os dados recebidos dos sensores de pressão foram convertidos para uma unidade de pressão desejada, no caso força peso (P). Já para o tratamento dos dados de angulação, foi realizada uma fusão sensorial através de filtro de *Kalman* (Madgwick, 2010; Freire et al., 2016), com o intuito de melhorar a qualidade dos dados obtidos.

5 Calibração do Sistema

Com o intuito de obter uma resolução razoável para os dados, foi feita a conversão dos dados de pressão de *bits* para a unidade de massa gramas. Primeiramente foi utilizada uma balança de precisão e o auxílio de massas aferidas para determinar a curva de resposta dos sensores de pressão, conforme demonstrado na Figura 6.

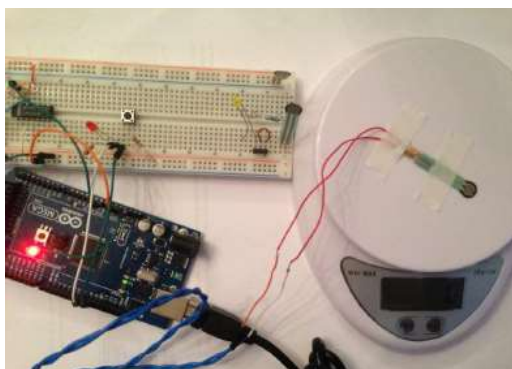


Figura 6. Procedimento de calibração dos sensores de pressão.

Conhecendo a massa aplicada e o sinal correspondente em *bits* de resposta do sensor, bastou aplicar o método computacional de *Lagrange*, que consiste em estipular um valor $f(x)$ para qualquer $x \in [x_0, x_n]$. A fórmula de interpolação pode ser derivada direto do polinômio de diferença dividida de *Newton* de grau equivalente, primeiramente escrevendo a diferença dividida na forma sintética, conforme apresentado na Equação 3.

$$f(x_n, \dots, x_0) = \sum \frac{f(x_i)}{\prod_{j=0}^n (x_i - x_j)} \quad (3)$$

Efetuada-se a conversão, encontra-se uma curva dividida em dois gráficos (figura 7 e 8) de 0 a 500 *bits* e de 500 *bits* em diante, somente para uma melhor visualização do resultado obtido.

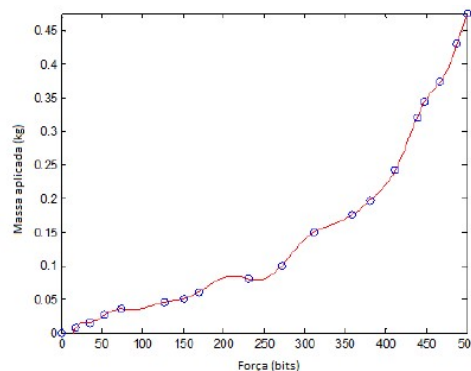


Figura 7. Calibração do sensor de pressão até 500 bits.

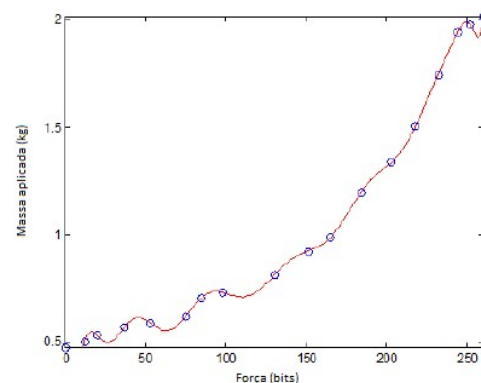


Figura 8. Calibração do sensor de pressão após 500 bits.

Com estes dados convertidos, basta multiplicar o valor encontrado pela aceleração da gravidade para encontrar a força peso.

6 Preparação para o Uso do Sistema

Para o posicionamento dos sensores, foi seguido o padrão abordado pelo estudo técnico de (Takagi, 2002), onde os oito sensores são dispostos nas juntas metacarpofalângicas, tanto na parte superior quanto na parte inferior da mão do atleta (Figura 9).

Já o sensor de angulação, que engloba acelerômetro e giroscópio, deve ser posicionado na parte superior da mão (Figura 9). Este posicionamento foi escolhido devido ao auxílio do *software SwimSmooth* que demonstra qual seria o nado ideal para todos os estilos de nado. Neste estudo de caso, foi selecionado o estilo *crawl*.

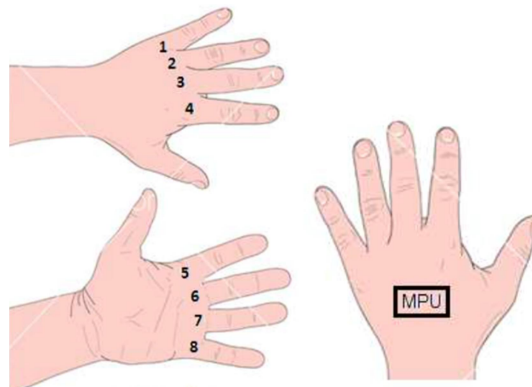


Figura 9. Posicionamento dos sensores nas mãos.

Após a fixação, os sensores devem estar dispostos na mão do atleta da forma em que se pode visualizar na Figura 10.

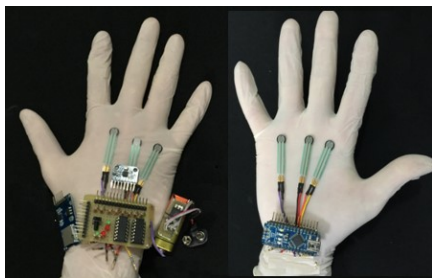


Figura 10. Fixação dos sensores

O último passo antes de dar início às aquisições é a realização do isolamento dos sensores, para que não ocorra contato algum do protótipo com a água. Para isto, foram utilizadas duas luvas cirúrgicas, sendo uma colocada diretamente na mão do nadador e outra sob todo o conjunto de sensores, formando assim o isolamento (Figura 11). De forma a vedar a região entre as luvas, foi utilizado cola de silicone ao redor das duas extremidades das luvas onde ficam os pulsos.



Figura 11. Sensores acoplados na mão.

6. Teste do Sistema

A realização dos testes com o protótipo ocorreu em uma piscina de 25 metros com um nadador de nível amador de 26 anos, 1.85 metros de altura, 88 quilogramas de peso e 0.013575 m² de área da superfície da mão. Foi construído um único protótipo e optou-se pela escolha da medição das forças e angulações exercidas pela mão direita do nadador.

O atleta partiu de dentro da água, e isto deve-se ao fato de ser o primeiro teste do protótipo, evitando assim possíveis danos que podem ser gerados ao equipamento caso este, por acidente, entre em contato com a água.

Após a gravação dos dados no cartão de memória, em arquivo texto, ao longo do teste, estes podem ser transferidos ao computador e tratados no software especialista. O programa computacional foi desenvolvido para facilitar a análise dos movimentos e forças aplicadas pelo atleta, contribuindo assim com o trabalho do treinador.

A Figura 12, demonstradas as forças geradas pelas mãos do nadador durante os testes.

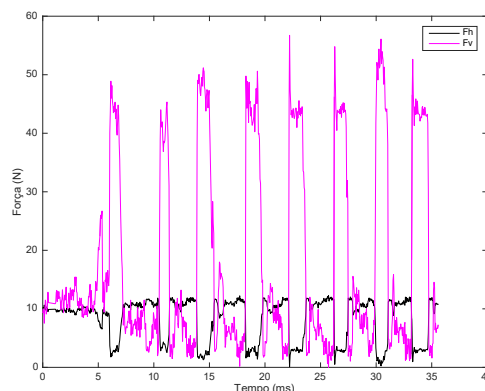


Figura 12. Forças geradas pelo nadador

Nota-se que o atleta exerce forças diferentes em cada braço e até mesmo em cada braçada. Neste caso, ao início do nado, nas três primeiras braçadas com a mão direita, o nadador exerceu pouca força, a qual foi recuperada a partir da quarta braçada atingindo quase a marca de 60N de propulsão. Já o braço esquerdo teve resultados completamente diferentes do direito, pois o atleta inicia o nado forçamento muito o membro superior esquerdo e a partir da quarta braçada começa a forçar menos.

Após analisadas as forças geradas pelas mãos do atleta, os dados provenientes do sensor MPU-6050 são convertidos de dados puros para ângulos propostos por Euler (ϕ , θ e Ψ), para melhor visualização. Desta forma, são gerados os gráficos referentes às angulações geradas pela mão do atleta, conforme visto na Figura 13.

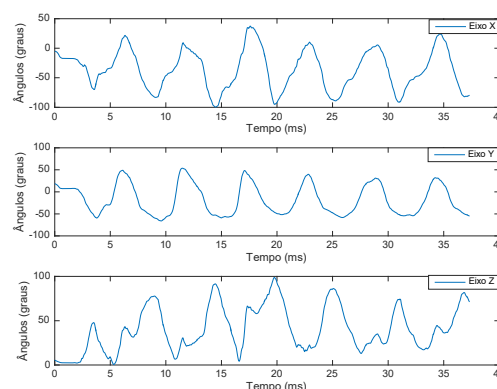


Figura 13. Ângulos gerados pela mão do nadador.

7 Conclusão

Este protótipo foi desenvolvido para auxiliar uma gama diversa de nadadores, fazendo com que o esporte se desenvolva mais rapidamente em nosso país para que nas próximas competições de peso, nossos atletas possam duelar de igual para igual com os de países de renome na natação.

Após serem realizados diversos testes com o mesmo atleta, foram detectados dois grandes problemas, sendo o primeiro com a vedação do sistema, pois em hipótese alguma o conjunto pode entrar em contato com o meio aquático, e o segundo com o posicionamento dos dispositivos na mão do atleta, para que nenhum movimento pudesse ser afetado mesmo que parcialmente, fazendo com que os testes não pudessem ser validados.

Este projeto está sendo realizado em conjunto com outro da mesma área de pesquisa, que visa medir a velocidade do atleta durante o seu nado, para que com estes dados, encontre-se um modelo ideal para auxiliar atletas de natação a aprimorar a dinâmica dos movimentos de seus membros superiores.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio financeiro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR).

Referências Bibliográficas

- Abraldes, A.; Stallman, R.K., Soares, S. and Queiroga, A.C. (2014). The velocity and fatigue index of various leg kicks in rescue towing. Anais do XIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (BMS2014), Camberra, Australia.
- Ayala, H.V.H.; Cruz, L.F., Coelho, L.S. and Freire, R.Z. (2014). Swim Velocity Profile Identification through a Dynamic Self-adaptive Multiobjective Harmonic Search and RBF Neural Networks. Anais do 22th European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (ESANN2014), Bruges, Bélgica p. 637-642.
- Barbosa, T.M.; Marinho, D. A.; Costa, M.J.; Silva, A.J. (2011) Biomechanics in Applications, Chap. 16 - Biomechanics of Competitive Swimming Strokes. INTECH - Science, Technology and Medicine open access publisher, doi:10.5772/19553.
- Cossor, J.; Slawson, S., Conway, P. and West, A. (2014) The effect of feet placement during the wall contact phase on freestyle turns. Anais do XIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (BMS2014), Camberra, Australia.
- Cruz, L.F.; Freire, R.Z., Coelho, L.S. (2014). Low-cost prototype development and swim velocity profile identification using neural network associated to generalised extremal optimization. Anais do XIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (BMS2014), Camberra, Australia.
- Freire, R.Z.; Coelho, L.S.; Santos, G.H.; Mariani, V.C. (2016) Predicting building's corners hygrothermal behavior by using a Fuzzy inference system combined with clustering and Kalman, International Communications in Heat and Mass Transfer 71 225-233
- Kaneda, K.; Hayami, R., Ohgi, Y., Inoue, D. and Tsubakimoto, S. (2014). Effect of immersion on angle positioning at elbow joint with and without pre-instruction in trained swimmers. Anais do XIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (BMS2014), Camberra, Australia.
- Madgwick, S.O.H. (2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays.. University of Bristol, United Kingdom.
- Maglischo, E.W. (2003). Swimming Fastest: The essential reference on technique, training, and program design. 2. ed. Revisada. Champaign, IL, United States of America: Human Motricity.
- Shigetada, K. (2012). Application of pressure measures to predict propulsive forces exerted by the hand during swimming. 30th Annual Conference of Biomechanics in Sports, Melbourne, Australia.
- Slawson, S.E., Conway, P. P., Cossor, J., Chakravorti, N.; West, A.A. (2013). The categorisation of swimming start performance with reference to force generation on the main block and footrst components of the Omega OSB11 start blocks. Journal of Sport Sciences, 31(5), 468-478.
- Takagi, H. (2002). Measurement of propulsion by the hand during competitive swimming. Institute of Health and Sports Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- West, A.A.; Slawson, S.E., Conway, P. P., Cossor, J. and Chakravorti, N. (2013). The categorisation of swimming start performance with reference to force generation on the main block and footrst components of the Omega OSB11 start blocks. Journal of Sport Sciences, 31(5), 468-478.