

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CAMPUS  
FLORIANÓPOLIS**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO *LATU-SENSU*  
ESPECIALIZAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE  
PRODUTOS ELETRÔNICOS**

**DANIEL DEZAN DE BONA**

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA RELATIVA  
PARA APLICAÇÃO EM ESPORTE – UMA PROPOSTA  
DE BAIXO CUSTO**

**FLORIANÓPOLIS  
2011**

**DANIEL DEZAN DE BONA**

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA RELATIVA  
PARA APLICAÇÃO EM ESPORTE – UMA PROPOSTA  
DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Conclusão do Curso de Pós Graduação *Latu-Sensu* em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Orientador – Golberi de Salvador Ferreira, Dr. Eng.

**FLORIANÓPOLIS**

**2011**

# **SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA RELATIVA PARA APLICAÇÃO EM ESPORTE – UMA PROPOSTA DE BAIXO CUSTO**

**DANIEL DEZAN DE BONA**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Certificado de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Pós Graduação Latu Sensu em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica de Santa Catarina.

Banca Examinadora:

---

Golberi de Salvador Ferreira, Dr. Eng., Orientador  
Presidente da Banca

---

Fernando Pacheco, Dr. Eng.

---

Leandro Schwarz, Msc. Eng.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por estar sempre a minha frente.

À meus pais, Geraldo e Maria Albertina, por terem me dado a oportunidade de estudar e por serem exemplo de vida e de dedicação profissional. Amo-os!

À meu irmão Eduardo por ser um porto seguro e pela parceria. E a minha irmã Fernanda (*in memoriam*) pelos sorrisos e por ter sido tão amável.

À minha companheira Cynthia por ter me dado suporte durante mais esta etapa.

À “*Filhinho*” e Marilda, exemplos de sabedoria.

Ao meu orientador pela parceria no projeto e pela dedicação marcante.

Aos amigos que sempre estiveram ao meu lado e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado!

## RESUMO

Atualmente, a profissionalização de muitos esportes e o aumento no número de praticantes de atividades físicas tem demandado uma atenção especial ao treinamento. Unir tecnologia e esporte tem sido um desafio a ser superado e cada vez mais se tem buscado novos meios de se avaliar o desempenho durante a prática da atividade física. O presente trabalho aborda uma parte desta problemática com a pesquisa e desenvolvimento de uma plataforma para sensoriamento da força relativa exercida durante a prática do desporto. Além do desenvolvimento em si, é sugerida uma abordagem que possibilite a redução do custo do projeto visando atender um maior número de modalidades. Iniciando com uma pesquisa sobre os tipos de sensores passíveis de serem utilizados nesta aplicação, o trabalho segue com o desenvolvimento dos módulos de *hardware* e o *firmware* embarcado e, com auxílio do MATLAB, são gerados gráficos em 2D para visualização dos pontos de força exercida e validação do sistema. Ao final é realizado um comparativo de preço com as aplicações disponíveis no mercado além das conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Palavras Chaves: Sensoriamento piezoelétrico; Plataforma de sensores; Força relativa em esportes.

## **ABSTRACT**

Currently the professionalization of many sports and the increase in the number of practitioners of physical activities has required special attention to training systems. Joining technology and sport has been a challenge to overcome, especially with the increasing of the search of new ways to evaluate performance during physical activities. This paper addresses part of this problem with the research and development of a platform for sensing the relative strength exerted during the practice of the sport. Besides the development itself, an approach that enables the reduction of project cost to meet a greater number of modalities is also suggested. It starts with a research on the types of sensors that can be used in this application, then continues with the development of hardware modules and embedded firmware and, with the aid of MATLAB, 2D graphics are generated for viewing the points of force exerted and to validate the system. At the end the price of the commercial products are compared and finally the conclusion and suggestion of future works.

Keywords: Piezoelectric Sensors, sensor platforms; Relative strength in sports.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Interconexão de dispositivos num microcontrolador.....	16
FIGURA 2 – Transdução de grandezas físicas em elétrica.....	17
FIGURA 3 – Etapas de um transdutor.....	17
FIGURA 4 – Variação de sensores capacitivos. a) distância; b) área; c) permissividade.....	19
FIGURA 5 – Ponte de Wheatstone.....	21
FIGURA 6 – Camadas do sensor piezoelétrico.....	22
FIGURA 7 – Exemplo de circuito condicionador de sinal.....	23
FIGURA 8 – Conversão AD.....	24
FIGURA 9 – Forma de onda em uma conversão A/D. a) analógico; b) discreto em amplitude.....	25
FIGURA 10 – Mapa de distribuição de pressão do sistema <i>Body Mapping</i> .....	28
FIGURA 11 – Sistema <i>Lamination Press</i> em uso.....	28
FIGURA 12 – Diversas geometrias disponíveis do sensor <i>Tactile Sensor</i> .....	29
FIGURA 13 – Sistema <i>Automotive Door Mounting Pressure</i> .....	30
FIGURA 14 – Sistema <i>Pressure Mapping for Automotive Seat Testing &amp; Design</i> .....	30
FIGURA 15 – Sistema <i>Pressure Imaging for Mattress Design</i> .....	31
FIGURA 16 – Kit de desenvolvimento Mbed.....	34
FIGURA 17 – Placa da Central Microcontrolada.....	34
FIGURA 18 – Ambiente de desenvolvimento.....	35
FIGURA 19 – Fluxograma da função principal.....	36
FIGURA 20 – Fluxograma de inicialização.....	37
FIGURA 21 – Fluxograma de calibração.....	38
FIGURA 22 – Fluxograma de leitura.....	39
FIGURA 23 – Condicionamento de sinal do sensor 7.....	40
FIGURA 24 – Tensão de entrada <i>versus</i> tensão saída.....	40
FIGURA 25 – Condicionamento de sinal.....	41
FIGURA 26 – Circuito condicionador de sinal. a) condicionamento; b) multiplexação.....	42
FIGURA 27 – Plataforma matricial de sensores.....	42
FIGURA 28 – Resposta em pressão sonora do buzzer PKM17EPPH4001-B0.....	43
FIGURA 29 – Curva adquirida de teste em bancada. Sinal de resposta do transdutor a uma força aplicada.....	46
FIGURA 30 – Variação de amplitude para a mesma frequência.....	46
FIGURA 31 – Resultado da variação da frequência mantém formato do sinal.....	47
FIGURA 32 – Arranjo de sensores e vias de sinal e referência.....	48
FIGURA 33 – Teste em bancada – plataforma sujeita a ação de força em diferentes pontos.....	49
FIGURA 34 – Realização dos testes do protótipo final.....	50
FIGURA 35 – Gráfico 2D com distribuição de pressão sobre a plataforma de sensores com intensidade de força entre 0 e 35%.....	51
FIGURA 36 – Gráfico 2D com distribuição de pressão sobre a plataforma de sensores com intensidade de força entre 0 e 60%.....	52
FIGURA 37 – Gráfico 2D com distribuição de pressão sobre a plataforma de sensores com intensidade de força entre 0 e 100%.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COI	- Comitê Olímpico Internacional
DAELN	- Departamento Acadêmico de Eletrônica
SRAM	- Static Random Access Memory
ADC	- Analog to Digital Converter
USB	- Universal Serial Bus
SPI	- Serial Peripheral Interface
I2C	- Inter-Integrated Circuit
UART	- Universal Asynchronous Receiver Transmitter
PWM	- Pulse Width Modulation
RTC	- Real Time Clock
kHz	- Kilohertz
MHz	- Megahertz
kbytes	- Kilobytes
AD/DA	- Analógico Digital Analógico
PVDF	- Fluoreto de Polivinilideno
V	- Volts



## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.2 Justificativa.....	11
1.3 Definição do problema .....	12
<b>2 OBJETIVO</b> .....	<b>13</b>
2.1 Objetivo geral .....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
3.1 Microcontroladores.....	14
3.2 Transdutores .....	16
3.3 Sensores .....	17
3.3.1 Sensores Capacitivos .....	19
3.3.2 Extensômetros .....	20
3.3.3 Sensores Piezoelétricos.....	21
3.4 Condicionamento de sinal .....	23
3.5 Conversão Analógico-Digital .....	24
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>26</b>
<b>5 PESQUISA DE MERCADO</b> .....	<b>27</b>
5.1 Tactilus Sensor .....	27
5.2 MatScan Sensor .....	29
<b>6 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>32</b>
6.1 Central Microcontrolada.....	32
6.2 <i>Firmware</i> embarcado.....	35
6.3 Condicionamento de sinal .....	39
6.4 Plataforma de Sensores.....	42
6.5 <i>Software</i> para visualização .....	44
<b>7 RESULTADOS ALCANÇADOS</b> .....	<b>45</b>

7.1 Testes dos sensores.....	45
7.2 Testes do protótipo .....	50
7.3 Comparativo com mercado.....	53
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O esporte tido como atividade de bem-estar e saúde é relativamente recente se compararmos com o início dos chamados Jogos Olímpicos, que datam de 776 a.C, e têm origem na Grécia Antiga, com seus primeiros registros.

Já no século XIX, após quase 300 anos dos primeiros registros, iniciaram-se as primeiras tentativas de trazer de volta o espírito olímpico que havia sido destruído, com a criação de comitês e associações visando à criação dos jogos da era moderna. Em 1896, Atenas recebeu os primeiros jogos sob tutela do COI (Comitê Olímpico Internacional) que, após passar por algumas alterações, são realizados até os dias atuais (SWADDLING, 1980) e (THE OLYMPIC MOVEMENT, 2011).

Com a profissionalização de muitos esportes e o crescimento no número de praticantes, muitos recordes e tabus vem sendo superados, e cada vez mais se busca o treinamento ideal para aumento do desempenho do atleta. Roupas especiais, câmeras com altíssima resolução e velocidade, dispositivos eletrônicos dos mais diversos tipos vem sendo empregados para se atingir o ápice nos resultados.

Até recentemente, pouco se estudava e se desenvolvia neste sentido. O custo muito elevado de equipamentos e matéria prima inviabilizava tal prática (SILVA *et AL* 2011). Atualmente, a difusão da tecnologia, o aumento na escala de produção e o domínio tecnológico permitem a exploração de um campo ainda em desenvolvimento, de métodos de treinamento para atletas, diminuindo a lacuna existente entre a percepção do atleta e a do treinador.

Neste projeto, é proposto o desenvolvimento de uma plataforma de sensores capaz de monitorar, durante a realização da atividade física, a força aplicada em certos pontos do sensoriamento, bem como a visualização desta grandeza através de gráficos gerados. Foi proposto ainda que este sistema tenha um custo menor que as soluções de mercado, visando alcançar a maior gama possível de esportes e atletas.

## 1.2 Justificativa

O treinamento de atletas para prática de esportes consiste na adaptação corporal para determinados tipos de atividades físicas. Pode o atleta alcançar aumento considerável de desempenho com o aprimoramento dos exercícios e dos métodos de treinamento (SILVA *et al*, 2011).

A evolução do desempenho de atletas e treinadores tem dependido basicamente da avaliação visual e de obtenção de dados biomecânicos (OHGI, 2006). Atualmente, com a miniaturização dos dispositivos e da tecnologia, é possível reduzir os custos de fabricação e aumentar a eficiência de sensores, possibilitando os mais diversos usos, inclusive no caso dos esportes.

A profissionalização dos esportes e a constante busca por melhores resultados e desempenho em competições têm criado a necessidade de aprimoramento nas técnicas aplicadas durante treinamentos e o desenvolvimento de novos dispositivos capazes de suprir essa necessidade.

Este trabalho busca unir tecnologia e esporte, criando novas possibilidades de métodos para treinamento e acompanhamento de atletas, através do monitoramento de variáveis físicas durante a prática do esporte. De posse destas informações, profissionais da área poderão melhor avaliar o desempenho destes atletas em um treinamento, por exemplo, aprimorando as técnicas utilizadas.

Desse modo, julgou-se importante o estudo e desenvolvimento desta pesquisa, a fim de demonstrar os resultados para os objetivos propostos.

### **1.3 Definição do problema**

Alguns sistemas de sensoriamento através de plataformas já são comercializados e utilizados por algumas modalidades esportivas como o golf (Sensor Products Inc. 2009), por exemplo. Porém, o custo elevado do sistema é um limitador para a difusão deste tipo de tecnologia.

Para aquisição da força relativa através do uso de sensores, é necessária a criação de uma rede de transdutores a fim de ampliar os pontos de medição e aumentar a resolução da medida. Para que se tenha precisão e eficiência nos resultados, o valor da força aplicada em cada um dos transdutores deve ser amostrado e visualizado em períodos de tempo de acordo com a modalidade. A definição do período depende basicamente da frequência de contato do atleta com a plataforma de sensores.

Analisando este aspecto, algumas possibilidades surgiram para o desenvolvimento do sistema e a redução dos custos. Para o presente trabalho, será abordado o desenvolvimento de um sistema de aquisição da força relativa da planta do pé para aplicação em esportes como: surfe; skate; ginástica olímpica, por exemplo, configurando-se numa proposta de baixo custo.

## 2 OBJETIVO

Para o desenvolvimento do projeto é necessária a determinação de objetivos a serem alcançados. Optou-se por dividi-los em objetivo geral e objetivos específicos como segue.

### 2.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de sensoriamento, de baixo custo, para aquisição de dados da força relativa de partes do corpo humano aplicada sobre uma plataforma de sensores.

### 2.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral são necessários alguns passos intermediários, os quais foram divididos em objetivos específicos e que caracterizam cada etapa do projeto, a saber:

- a) estudo de sensores de pressão e microcontroladores compatíveis com esta aplicação;
- b) definir a forma da plataforma de sensoriamento com número de sensores, posição e resolução.
- c) desenvolver um dispositivo eletrônico capaz de monitorar variação nos sensores de força com o uso de microcontroladores;
- d) desenvolver uma solução de *hardware* que permita conexão com um computador pessoal para transmissão de dados e visualização dos resultados;
- e) organizar os dados adquiridos com o sistema e demonstrá-los através da geração de gráficos.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

*Ciência é conhecimento organizado. Sabedoria é vida organizada.  
(Immanuel Kant)*

Para a melhor compreensão do funcionamento de sensores, transdutores, componentes eletrônicos, entre outras especificidades do projeto, faz-se necessária uma revisão de literatura que contemple as áreas de conhecimento aplicadas.

#### 3.1 Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos semelhantes aos microprocessadores, porém possuem em um único circuito integrado periféricos como memórias, central de processamento, periféricos de entrada e saída, entre outros. Inicialmente desenvolvidos para processamento em menor escala, os microcontroladores acabaram por superar a barreira de velocidade de processamento dos microprocessadores e atualmente são utilizados em inúmeras aplicações (PEREIRA, 2007).

Diferentes tecnologias estão disponíveis no mercado, de diversos fabricantes e inúmeros modelos. A Tabela 1 mostra um comparativo entre três microcontroladores de famílias e fabricantes distintos. São comparados velocidade de processamento, memórias, periféricos e custo.

Todos os dispositivos analisados neste comparativo possuem integrados os seguintes periféricos: USB; SPI; I2C; UART; IOS; ADC; PWM e Timers. Os dispositivos específicos em cada modelo são apontados na tabela.

Tabela 01 – Comparativo de microcontroladores

Fabricante e modelo	Frequência máxima do processador (MHz)	Memória Flash embarcada (Kbytes)	SRAM embarcada (Kbytes)	Dispositivos Integrados	Resolução Conversor ADC (bits)	Custo <sup>1</sup> (R\$)
Atmel AT32UC3 A0512	66	512	64	Ethernet; RTC;	10	68,94
Microchip PIC32MX3 60F512L	80	512	32		10	42,78
NXP LPC1768F BD100	100	512	64	Ethernet; RTC;	12	33,76

Por possuir em um único circuito integrado diversas funcionalidades, os microcontroladores podem ser empregados em praticamente qualquer dispositivo eletrônico. Basicamente, um microcontrolador é um dispositivo capaz de executar tarefas pré-configuradas em memória a partir de programas. Estes programas são conhecidos como *firmware*.

O dispositivo possui um núcleo que é responsável por gerenciar todo o processamento que ocorre durante a execução de um programa e, a partir deste, todos os periféricos são controlados (Figura 1). Os periféricos são dispositivos incorporados ao circuito integrado e que possuem funcionalidades distintas como: comunicação serial; pinos de entrada e saída; conversor analógico digital analógico (AD/DA), por exemplo.

<sup>1</sup> Valores de custo do site <http://www.farnell.com.br>



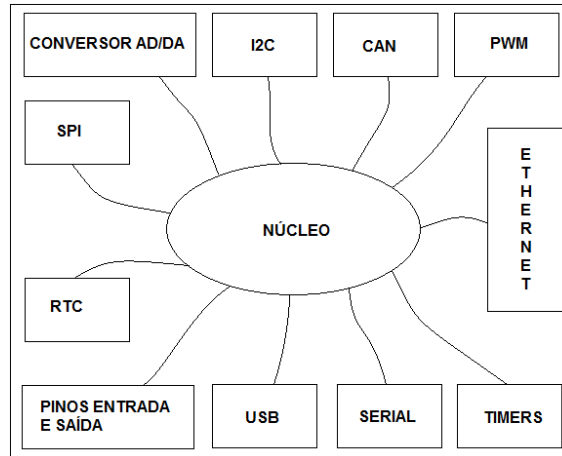


FIGURA 1 – Interconexão de dispositivos num microcontrolador

Diferente dos microprocessadores, a maioria dos microcontroladores possui conversor AD/DA, o que facilita o processo de aquisição de sinais e o tratamento de dados. Os conversores AD/DA integrados são configurados diretamente durante a programação do *firmware*, o que facilita o processo de desenvolvimento. Estes periféricos, em sua maioria, possuem resolução de 8 a 10 bits, podendo alcançar até 12 bits, e taxas de amostragem elevadas<sup>2</sup> e são utilizados para conversão de sinais elétricos de tensão para controle e supervisão, entre outros.

### 3.2 Transdutores

Os transdutores são dispositivos utilizados para converter uma forma de energia conhecida em outra, permitindo a medição dessa grandeza através de uma relação conhecida. Um transdutor é desenvolvido a partir da necessidade de se medir uma grandeza física – pressão, força, deslocamento, deformação, etc. em um determinado sistema. Esse elemento transdutor transforma esta grandeza física em tensão ou corrente elétrica e, por possuir uma relação conhecida, possibilita a leitura desse valor de tensão ou corrente através de sistemas eletroeletrônicos (Figura 2).

<sup>2</sup> Até 200 KHz no microcontrolador LPC1768 da NXP Philips

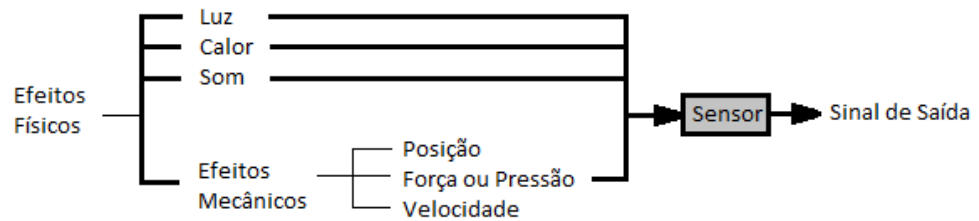


FIGURA 2 – Transdução de grandezas físicas em elétrica

Fonte: Pazos 2002

Acoplados aos transdutores existem um ou mais elementos sensíveis chamados sensores. Os sensores num transdutor podem vir acompanhados de um circuito eletrônico para geração de um sinal elétrico (PAZOS 2002).

Para converter o sinal de um sensor em um sinal elétrico passível de ser medido, há uma etapa de condicionamento de sinal nos transdutores que, através de uma relação conhecida, ajusta o nível do sinal à leitura do conversor analógico/digital (Figura 3).

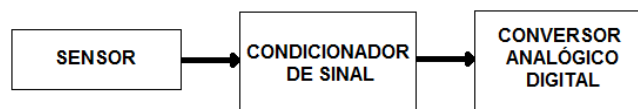


FIGURA 3 – Etapas de um transdutor

### 3.3 Sensores

Para poder determinar o tipo de sensor apropriado para a aplicação proposta é importante que se conheça os dispositivos disponíveis no mercado e suas características. Como a variável a ser medida neste trabalho é a força aplicada durante a prática de esportes, os sensores analisados são elementos capazes de fornecer uma tensão proporcional a esta força, possibilitando a medição através de conversores analógicos digitais.

Os sensores possuem algumas características que os diferenciam entre si e informam como deve ser seu funcionamento em determinadas faixas de operação (PAZOS 2002).

- i) Faixa: limites de operação do sensor para determinada grandeza física. A faixa de operação determina quais valores, máximos e mínimos, da grandeza a ser medida o sensor é capaz de mensurar com exatidão.
- ii) Resolução: é definida como o menor incremento da grandeza a ser medida que provoca variação no sinal de saída do sensor.
- iii) Sensibilidade: é a relação entre o sinal de saída do sensor e a grandeza física medida.
- iv) Linearidade: também possui relação entre saída e entrada do sensor, porém indica em que faixas de medida o sensor possui variações iguais entre a grandeza medida e o sinal entregue na saída do sensor.
- v) Histerese: conhecido também como laço de histerese é a diferença de resposta do sensor a estímulos de mesma grandeza, porém em sentidos contrários.
- vi) Exatidão ou Erro: diferença absoluta entre o sinal medido no sensor e o valor que deveria ser fornecido para o determinado valor de grandeza física medida.
- vii) Resposta em frequência: é a faixa de frequências em que o sensor consegue operar sem alterar o valor do sinal de saída. Se um determinado sensor possui uma faixa de frequências menor do que a frequência de operação do sistema a ser medido, o sinal de saída do sensor será distorcido, podendo causar erros na medida.

Segundo Marques (2007), existem duas classes de sensores: os ativos e os passivos. Os sensores ativos são dispositivos que não necessitam de alimentação externa para funcionarem, pois são capazes de gerar uma tensão a partir de um estímulo. Ao contrário, os sensores passivos alteram suas propriedades quando submetidos a uma força e esta alteração só pode ser medida através do uso de uma fonte de alimentação externa.

Partindo dos resultados e das sugestões para trabalhos futuros de Bona (2009), optou-se por comparar três tipos de sensores, sendo um modelo ativo e dois passivos. Os sensores pesquisados foram: capacitivos, resistivos e piezoelétricos.

### 3.3.1 Sensores Capacitivos

Os sensores capacitivos são elementos que possuem o mesmo princípio de funcionamento de um capacitor, ou seja, baseiam seu funcionamento no fluxo de campo elétrico produzido no dielétrico entre seus terminais (MARQUES, 2007).

É possível controlar o fluxo de campo entre os eletrodos e conseqüentemente o sinal medido neste tipo de sensor, variando a distância (Figura 4a), área dos eletrodos (Figura 4b) ou a permissividade do dielétrico (Figura 4c).

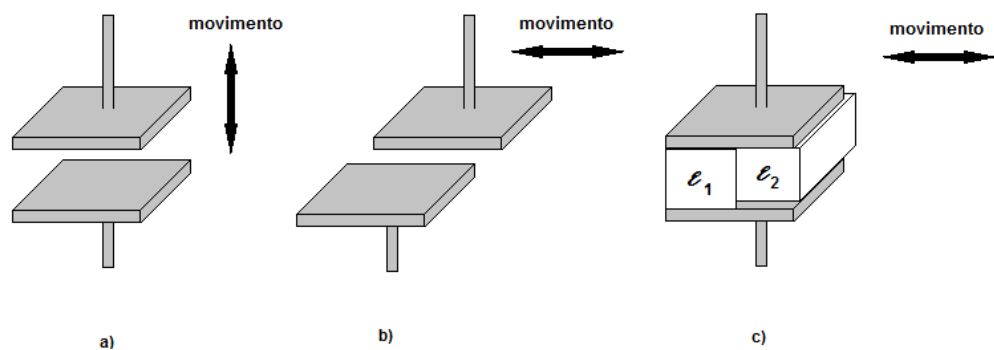


FIGURA 4 – Variação de sensores capacitivos. a) distância; b) área; c) permissividade.

Fonte: Marques (2007)

Os sensores capacitivos apresentam grande desvantagem devido à suscetibilidade à variação da temperatura, fazendo com que seja necessária a utilização de técnicas para compensação do efeito térmico.

Além da desvantagem do efeito térmico para aplicação proposta, os sensores de efeito capacitivo são passivos, necessitando de fonte externa de alimentação para seu funcionamento, fazendo com que haja um consumo de energia extra no sistema.

### 3.3.2 Extensômetros

Os sensores resistivos, do tipo extensômetros, são caracterizados por apresentarem boa sensibilidade a pequenas variações. São comumente utilizados na indústria para medição da tensão mecânica nos mais diversos materiais como: metais, plásticos e resinas, por exemplo.

A partir da descoberta feita por Charles Wheatstone, na qual se constatou o efeito da mudança de resistência de um condutor metálico quando submetido a uma deformação mecânica – alongamento, foi possível aplicar esse tipo de sensor para medição de tensão mecânica, uma vez que acoplado ao corpo de prova o sensor apresenta o mesmo comportamento quando sujeito a deformação (BONA, 2009).

A Figura 5 demonstra a aplicação da Ponte de Wheatstone a um circuito com quatro elementos resistivos variáveis – extensômetros, onde se inserindo tensão elétrica nos pontos 1 e 4, é possível medir a variação das resistências submetidas a deformação nos pontos 2 e 3.

Segundo Bona (2009), a resistência elétrica do extensômetro varia linearmente se forem respeitados os limites elásticos do material, sendo possível a medição linear da deformação de um dado material a partir da variação da resistência do sensor. A forma mais comum de deformação medida é unidimensional, ou seja, quando o material é sujeito a tensão mecânica em um único sentido. Porém é possível medir a deformação de forma tridimensional com os sensores do tipo “roseta”, fabricados com três eixos de medição defasados em 120 graus.

Semelhante aos sensores capacitivos, os extensômetros sofrem ação da temperatura, alterando a resistência e gerando erros de medida. Para compensação desse efeito, são aplicadas técnicas apropriadas.

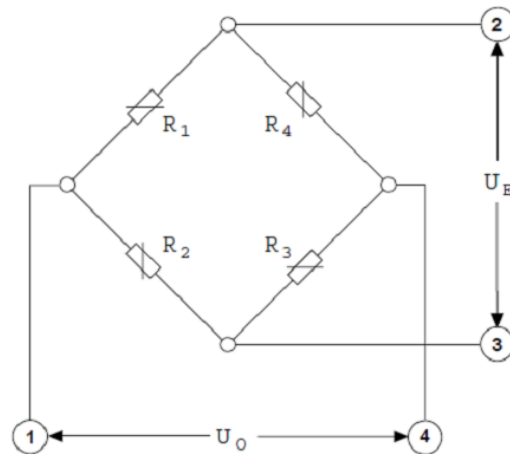


FIGURA 5 – Ponte de Wheatstone

Fonte: Bona, 2009

Apesar de apresentarem boa sensibilidade a pequenas variações, os extensômetros não são a melhor opção para o problema proposto por apresentarem problemas com o efeito térmico e, novamente, a necessidade de alimentação externa.

### 3.3.3 Sensores Piezoelétricos

Muito utilizados na indústria para fabricação de transdutores de pressão, os sensores piezoelétricos são dispositivos dotados de cristais de quartzo, e têm por característica a geração de tensão proporcional à força aplicada sobre estes dispositivos. Este princípio é conhecido como fenômeno piezoelétrico (PAZOS, 2002).

Por ser um material bruto, em muitos casos os cristais de quartzo são substituídos por um material sintético chamado PVDF – fluoreto de polivinilideno que é um polímero plástico que possui a mesma característica do cristal, mas que possibilita a fabricação de sensores com grandes superfícies. A lâmina piezoelétrica é depositada entre dois eletrodos conectados a dois terminais e, quando pressionada, gera uma tensão nesses terminais (Figura 6).



FIGURA 6 – Camadas do sensor piezoelétrico

Os sensores piezoelétricos são caracterizados como sensores ativos, por não necessitarem de fonte externa de energia para indicarem uma medida. Basicamente, este tipo de sensor converte a energia mecânica aplicada sobre seus eletrodos em energia elétrica e o efeito inverso também é válido. Segundo Marques (2007), os sensores piezoelétricos apresentam desvantagem por não manterem a carga gerada em seus eletrodos acumulada. Devido as suas características físicas, há uma corrente de fuga que tende a degradar o sinal gerado em seus terminais, além da variação da temperatura a que o cristal está sujeito.

O mesmo autor faz uma comparação de sensores de força quanto a sua sensibilidade (Tabela 2). É possível observar a grande diferença de sensibilidade apresentada pelos sensores piezoelétricos.

Tabela 2 – Comparativo entre sensores pesquisados. A designação  $\mu S$  significa microdeformação, i.e.,  $10^{-6}$  m/m.

Fonte: Adaptado de Marques (2007)

Princípio de Funcionamento	Sensibilidade a deformação ( $V/\mu S$ )
Piezoelétrico	5
Capacitivo	0,005
Resistivo	0,000005

Os sensores piezoelétricos mostraram-se a melhor opção para o projeto proposto por serem ativos – não necessitam de alimentação externa para funcionar, e apresentam excelente sensibilidade a deformação.

### 3.4 Condicionamento de sinal

Os circuitos condicionadores de sinal são dispositivos eletrônicos, em sua maioria, que tem como funcionalidade adequar o nível de tensão ou corrente do sinal entregue pelos sensores para ser lido por microcontroladores ou outros dispositivos de controle (PAZOS 2002). Um exemplo simples de um circuito condicionador de sinal pode ser observado na Figura 7.

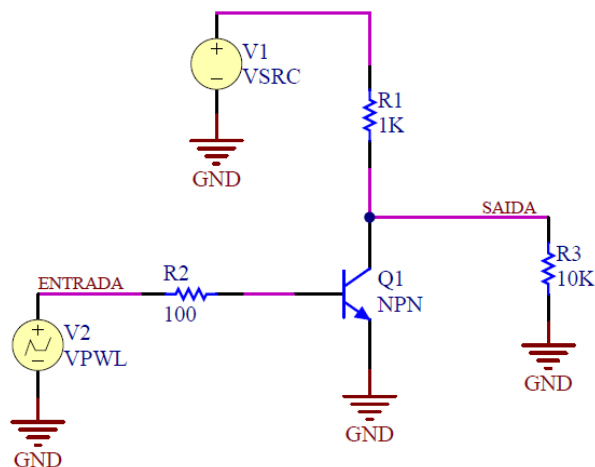


FIGURA 7 – Exemplo de circuito condicionador de sinal

Este circuito condiciona o nível de tensão do sinal ENTRADA – fonte de sinal V2 (VPWL). O sinal ENTRADA injetado no circuito através da fonte de sinal V2 polariza o transistor NPN Q1 quando atinge a tensão de polarização – aproximadamente 0,66V, fazendo com que o sinal SAIDA altere seu valor.

Além de circuitos com transistores, como o da Figura 7, podem ser utilizados diversos circuitos para condicionamento de sinal como: divisores de tensão puramente resistivos; grampeadores de sinal; e diodos Zener, por exemplo.



### 3.5 Conversão Analógico-Digital

Para possibilitar a interpretação de sinais como os de sensores piezoelétricos, por exemplo, por microcontroladores ou microprocessadores, faz-se necessária a conversão desse sinal analógico para digital.

Após o condicionamento do sinal a níveis de tensão/frequência adequados, este pode ser digitalizado com o uso de um conversor analógico para digital – conhecido como conversor AD. Estes conversores AD são responsáveis por transformar os sinais até então analógicos em digitais, possibilitando a interpretação, armazenamento e processamento por dispositivos de controle (PAZOS, 2002).

Segundo Idoeta e Capuano (1990), grandeza analógica é uma variação contínua de uma grandeza qualquer, como velocidade, pressão, temperatura, entre outras. Esta variação pode assumir todos os valores dentro de uma faixa, por outro lado, a grandeza digital possui valores limitados e finitos, variando de maneira discreta. A conversão AD transforma essas entradas analógicas dos sensores em dados passíveis de interpretação por dispositivos controladores que funcionam com lógica digital (Figura 8).

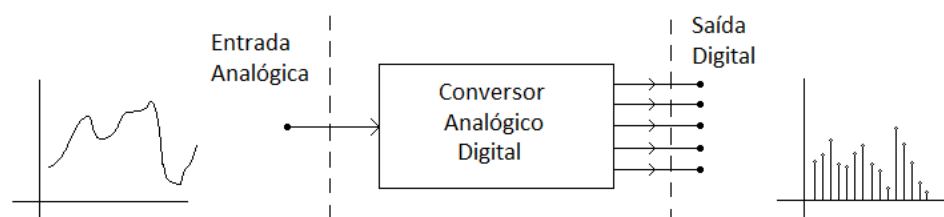


FIGURA 8 – Conversão AD

Fonte: Idoeta e Capuano 1990

O sinal contínuo (Figura 9a) é caracterizado por assumir infinitos valores de tensão – 0 a 4,5V – dentro de um período de tempo – 0 a 4 segundos, já o sinal amostrado (Figura 9b) por um conversor AD tem características bem definidas, com pulsos de tensão a

cada amostragem, de acordo com o valor de tensão do sinal de referência. Cada valor amostrado mantém seu nível de tensão até que seja realizada uma nova amostragem do sinal na entrada do conversor; este procedimento é conhecido como *Sample and Hold*.

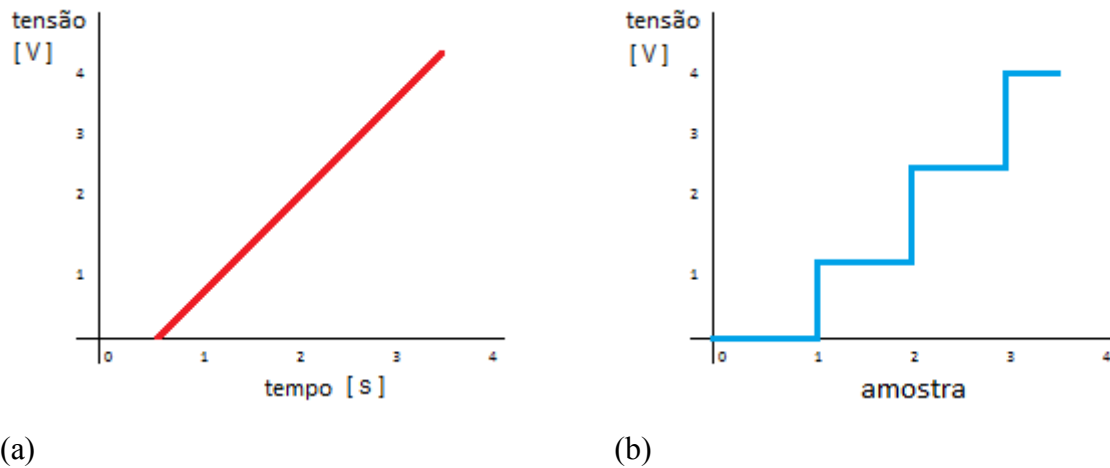


FIGURA 9 – Forma de onda em uma conversão A/D. a) analógico; b) discreto em amplitude.

Muitos dispositivos microcontrolados possuem conversores AD integrados a sua estrutura. São conversores de 8, 10, 12 bits de resolução e, em alguns casos, ultrapassando dispositivos discretos com até 16 bits. Podem possuir mais de uma entrada de conversão analógica para digital. Alguns microcontroladores contam com mais de 10 entradas AD e acabam sendo utilizados em grande escala, tanto pela facilidade no uso, quanto pela redução de custo que proporcionam.

Com registradores dedicados a este fim, os microcontroladores são programados de forma a atenderem aos requisitos de projeto como: velocidade de conversão, número de entradas ativas, interrupção, entre outras possibilidades.

## 4 METODOLOGIA

A partir da análise dos resultados alcançados por Bona (2009), iniciou-se uma pesquisa para definição de que sensores poderiam ser utilizados para determinação de força e, conseqüentemente, pressão sob os pés de atletas. Segundo o autor, é necessário que esse tipo de aplicação possua sensibilidade suficiente para ter confiabilidade na aquisição dos dados.

Iniciou-se com um estudo dos sensores de pressão disponíveis no mercado, compatíveis com a aplicação proposta, de baixo custo e com características físicas que possibilite o uso em uma plataforma.

Para certificação do funcionamento dos transdutores selecionados, faz-se necessária a criação de módulos de *hardware* que serão utilizados para condicionamento, aquisição e transmissão de dados referentes ao sinal dos sensores.

Fez-se necessário o desenvolvimento de um programa em MATLAB que permitisse a tradução dos valores de força medidos pelos transdutores em gráficos planares 2D, no qual é possível analisar visualmente em que pontos e qual a intensidade da força exercida sobre a plataforma.

Após a montagem da plataforma de sensores e a verificação do funcionamento, foi acoplada à Central Microcontrolada (CMC), e os dados foram transferidos a um microcomputador, para verificação do funcionamento do sistema integrado.

Durante a execução do projeto, foram realizadas etapas de documentação, revisão de literatura e relatório dos testes. Um cronograma de etapas foi definido, a fim de auxiliar na realização do trabalho.

## 5 PESQUISA DE MERCADO

A pesquisa teve início com um levantamento de informações acerca das aplicações semelhantes disponíveis no mercado. Essa etapa fez-se necessária para melhor compreensão dos materiais e métodos que são utilizados pela indústria quanto à aplicação de sensores de força.

Foram pesquisadas três aplicações para diferentes fins em dois fabricantes distintos, possibilitando a familiarização com as alternativas adotadas pelo mercado na solução de problemas envolvendo pressão mecânica, como segue.

### 5.1 Tactilus Sensor

Fabricado pela Sensor Products INC. (SPI), o Tactilus Sensor é composto por elementos sensíveis que são fabricados com filmes extremamente finos e que possibilitam revelar pontos de pressão sobre superfícies. Esses produtos são utilizados em manufatura e processos de desenvolvimento.

Com mais de cinquenta aplicações descritas em seu glossário de aplicações a SPI utiliza a tecnologia de sensoriamento de força e pressão para a solução de diversos problemas. Aqui, citamos três: *Body Mapping*; *Lamination Press*; *Tactile Sensor*.

*Body Mapping* é um sistema desenvolvido para aplicações que necessitam adquirir dados sobre a distribuição de pressão de um corpo humano sobre uma plataforma de sensores, criando um mapa de pressão (Figura 10). Este sistema é fabricado com filme fino de menos de 1 mm de espessura e possibilita medidas que variam de 0.1 PSI a 100 PSI.

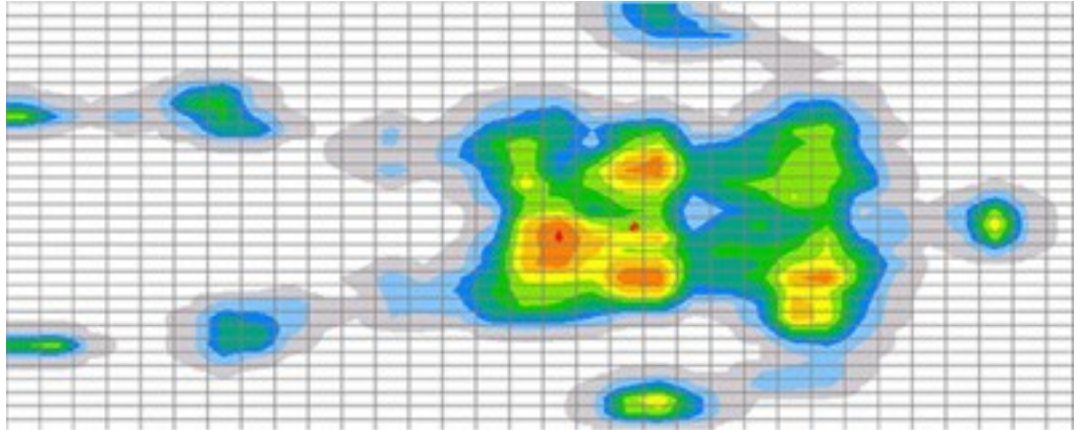


FIGURA 10 – Mapa de distribuição de pressão do sistema *Body Mapping*

Fonte: <http://www.sensorprod.com/glossary/body-mapping/body-mapping.php>

(Acesso em: 14/04/2011)

*Lamination Press* é um sistema utilizado em prensas hidráulicas a fim de determinar a homogeneidade da pressão exercida sobre os objetos prensados. No caso de um sistema laminado, onde duas ou mais camadas são prensadas para se obter um único material, por exemplo, o sistema *Lamination Press* é capaz de determinar as diferenças de pressão entre o corpo das lâminas, auxiliando no diagnóstico de possíveis falhas (Figura 11).

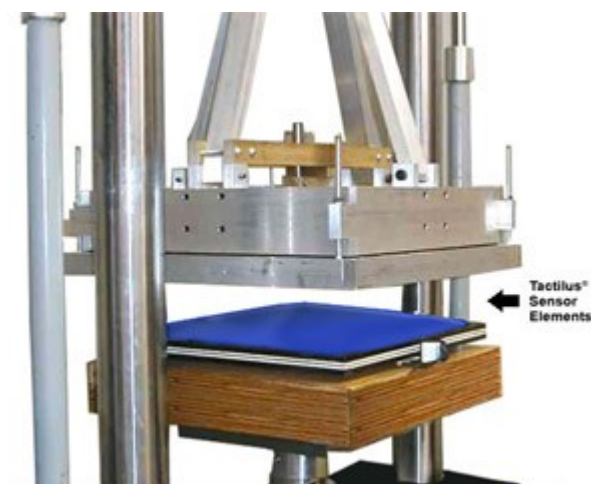


FIGURA 11 – Sistema *Lamination Press* em uso

Fonte: <http://www.sensorprod.com/glossary/lamination-press/lamination-press.php> (Acesso em: 14/04/2011)

Por fim, o último elemento fabricado pela SPI pesquisado é o *Tactile Sensor*. Esse dispositivo é sensível ao toque ou pressão e utilizado na indústria em inúmeras aplicações que necessitem de interação entre o ambiente e superfícies de contato para medição e registro. Muito utilizados na robótica em aplicações que demandam alto desempenho em tarefas delicadas, possui funcionalidade equivalente ao toque humano (Figura 12).

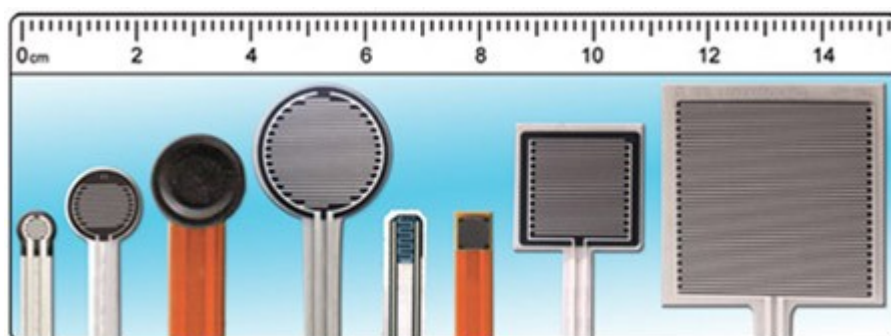


FIGURA 12 – Diversas geometrias disponíveis do sensor *Tactile Sensor*

Fonte: <http://www.sensorprod.com/glossary/tactile-sensor/tactile-sensor.php>  
(Acesso em: 14/04/2011)

## 5.2 MatScan Sensor

O *MatScan Sensor* é fabricado pela TekScan, empresa norte americana que desenvolve filmes para aquisição de pressão e força de toque. Os sensores fabricados pela TekScan consistem em duas finas camadas flexíveis de poliéster que possuem eletrodos condutores de eletricidade que formam uma matriz de elementos sensíveis.

Alguns exemplos de aplicações podem ser visualizados no site do fabricante como: *Automotive Door Mounting Pressure; Pressure Mapping for Automotive Seat Testing & Design; Pressure Imaging for Mattress Design.*

O *Automotive Door Mounting Pressure* (Figura 13) consiste num sistema para análise da pressão do contato entre a porta do automóvel e a borracha de vedação. O sistema é

capaz de identificar problemas como: espaços na vedação, vedação pouco eficiente, e regiões de pressão não homogêneas. Os dados adquiridos e analisados auxiliam na redução de ruído nas portas e janelas e vazamento de água, por exemplo.



FIGURA 13 – Sistema *Automotive Door Mounting Pressure*

Fonte: <http://www.tekscan.com/automotive-door-mounting-pressure>

(Acesso em: 14/04/2011)

Para medida do conforto e a entrada e saída de pessoas em bancos de automóveis o dispositivo *Pressure Mapping for Automotive Seat Testing & Design* cria um mapa de pressão dos pontos analisados sobre o assento e encosto de veículos. Com essa aplicação é possível identificar novas maneiras de otimização da rigidez das espumas de bancos e novos materiais, além de identificar a posição mais ergonômica ao motorista, dentre outros benefícios (Figura 14).



FIGURA 14 – Sistema *Pressure Mapping for Automotive Seat Testing & Design*

Fonte: <http://www.tekscan.com/automotive-seat-pressure-mapping>

(Acesso em: 14/04/2011)

*Pressure Imaging for Mattress Design* é um sistema desenvolvido pela TekScan que permite obter-se um mapa de pressão do corpo para aplicações em desenvolvimento de colchões. Com o resultado das medições realizadas é possível comparar diferentes materiais aplicados a colchões como as molas, a espuma, a borracha e o efeito do ar (Figura 15).

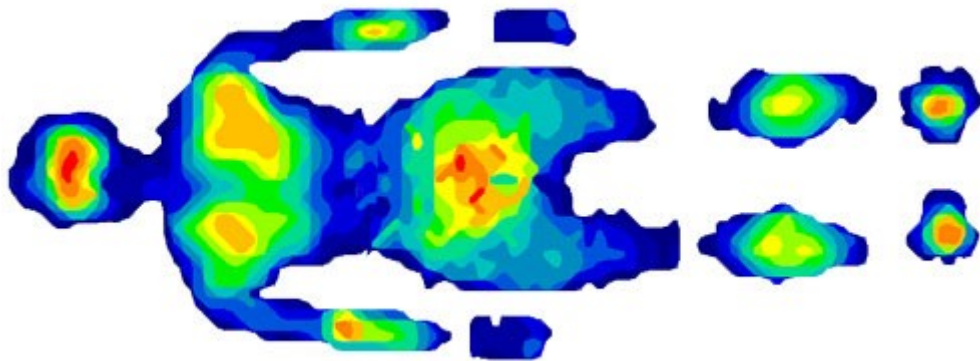


FIGURA 15 – Sistema *Pressure Imaging for Mattress Design*

Fonte: <http://www.tekscan.com/mattress-design-pressure-imaging>

(Acesso em: 14/04/2011)



## 6 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo constam as etapas de desenvolvimento, com descrição detalhada da pesquisa de mercado, da prototipagem e dos testes do sistema.

Não se pode afirmar que o mercado é desprovido de sistemas de sensoriamento plantar. Existem diversas soluções disponíveis e com diferentes tecnologias empregadas para obtenção de mapa da planta do pé. Porém, o custo elevado destes sistemas torna-se impeditivo a muitas aplicações desportivas. Na pesquisa de mercado são mostradas algumas soluções comerciais para diferentes aplicações.

O sistema proposto é formado por uma plataforma de sensores como elemento principal, onde as forças são aplicadas e adquiridas; a topologia de *hardware* adotada é composta por um dispositivo microcontrolado, família ARM-Cortex M3, e uma interface de condicionamento de sinal, composta por amplificadores, que neste trabalho é denominada Central Microcontrolada (CMC). O *firmware* foi desenvolvido em linguagem C e C++.

Os dados relativos aos sinais dos sensores são gerados no microcontrolador e enviados, via interface USB, para um microcomputador.

### 6.1 Central Microcontrolada

Segundo Pereira (2007), a tecnologia ARM (*Advanced RISC Machine*) criou um marco na indústria de semicondutores por ter sido amplamente difundida e maciçamente fabricada. Esse tipo de dispositivo utiliza a arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) em seu conceito e é característico por possuir CPUs (*Central Processor Units*) de 32 bits, diferente da maioria dos microcontroladores disponíveis no mercado.

Os principais atrativos da arquitetura ARM são a simplicidade, baixo custo, pequeno consumo e modularidade. Atualmente a empresa ARM Limited, detentora da

propriedade intelectual, não fabrica circuitos integrados, apenas vende a licença de uso das CPUs para os mais diversos fabricantes.

Por ser um dispositivo de 32 bits, os microcontroladores ARM tem como um dos grandes atrativos a velocidade de processamento se comparado com tecnologias de 8 ou 16 bits. A baixa complexidade de implementação da CPU possibilita a utilização de processos de fabricação mais baratos, auxiliando na redução do custo, concorrendo diretamente com dispositivos já consolidados no mercado em relação ao preço. Outro ponto a ser observado quanto à utilização da tecnologia ARM é a capacidade de memória disponível que, se comparados aos microcontroladores de 8 ou 16 bits, são superiores em muitos casos.

De acordo com a análise da Tabela 1, foi selecionado para esta aplicação o microcontrolador ARM-Cortex-M3 LPC1768 por possuir maior velocidade de operação – até 100 MHz, maior resolução do conversor AD (12 bits) e baixo custo.

Com objetivo de reduzir o tempo de desenvolvimento e possibilitar o uso da tecnologia ARM-Cortex-M3, utilizou-se um kit de desenvolvimento do fabricante PHILIPS, chamado MBED (Figura 16). Este dispositivo é composto por um microcontrolador LPC1768 da NXP Philips, conexão USB e pinos de conexão externos para possibilitar o desenvolvimento de inúmeras aplicações.

O kit MBED possui canais de conversão analógico para digital e digital para analógico, pinos de entrada e saída configuráveis, pinos para conexão ethernet, barramentos de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter Integrated Circuit* (I2C), alimentação através da interface USB, entre outras funcionalidades.

Para o projeto proposto, o dispositivo atende os requisitos de velocidade de processamento – 96 MHz, velocidade de conversão AD de até 200 kHz e conexão USB.

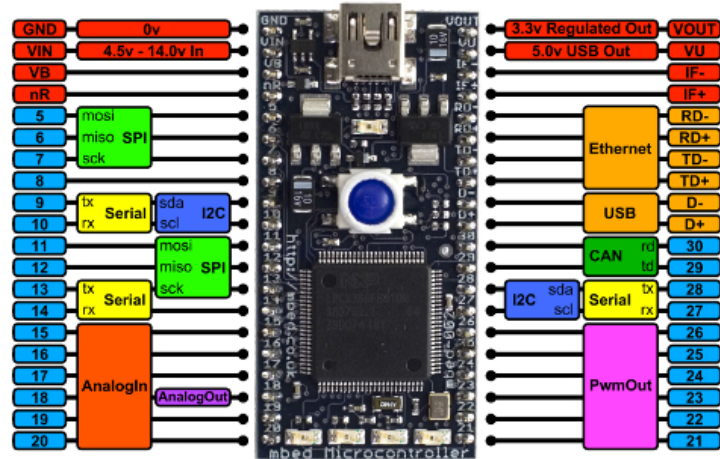


FIGURA 16 – Kit de desenvolvimento Mbed

Fonte: <http://mbed.org/handbook/Tour>

Para possibilitar a utilização do kit Mbed foi desenvolvida uma placa de circuito impresso para interface com o circuito de condicionamento de sinal (Figura 17). Esta placa dispõe de conexão para alimentação através de bateria externa (3.6V) e pinos de interface que podem ser configurados para atender aos requisitos de projeto como aumento do número de sensores e conexão USB extra.

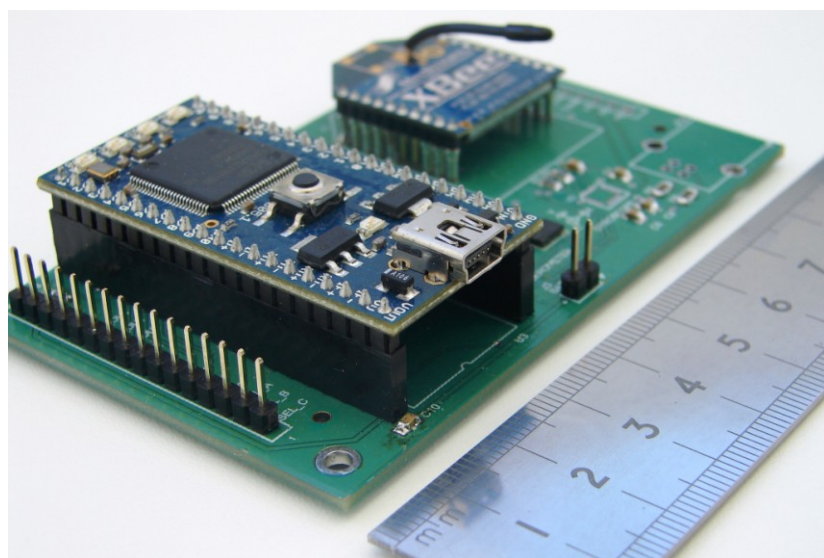


FIGURA 17 – Placa da Central Microcontrolada

## 6.2 Firmware embarcado

A programação do dispositivo Mbed pode ser realizada através de um compilador *online* (internet), em linguagem C/C++, disponibilizado pela própria NXP Philips, o qual possui inúmeras bibliotecas para uso de periféricos, além de aplicações mais específicas de usuários do kit que as disponibilizam através de um fórum no *cookbook* do site<sup>3</sup>.

Há ainda possibilidade de programação e compilação do *firmware* com ferramentas comumente utilizadas, porém, novamente com o objetivo de reduzir o tempo de desenvolvimento, optou-se pelo uso do compilador *online*. O compilador (Figura 18) é composto por uma área de trabalho de programa (em vermelho) onde estão os programas desenvolvidos, área de programação (em verde) na qual toda a programação do *firmware* é realizada, e por fim o quadro de resultado da compilação (em azul) que indica problemas encontrados e estados da compilação.

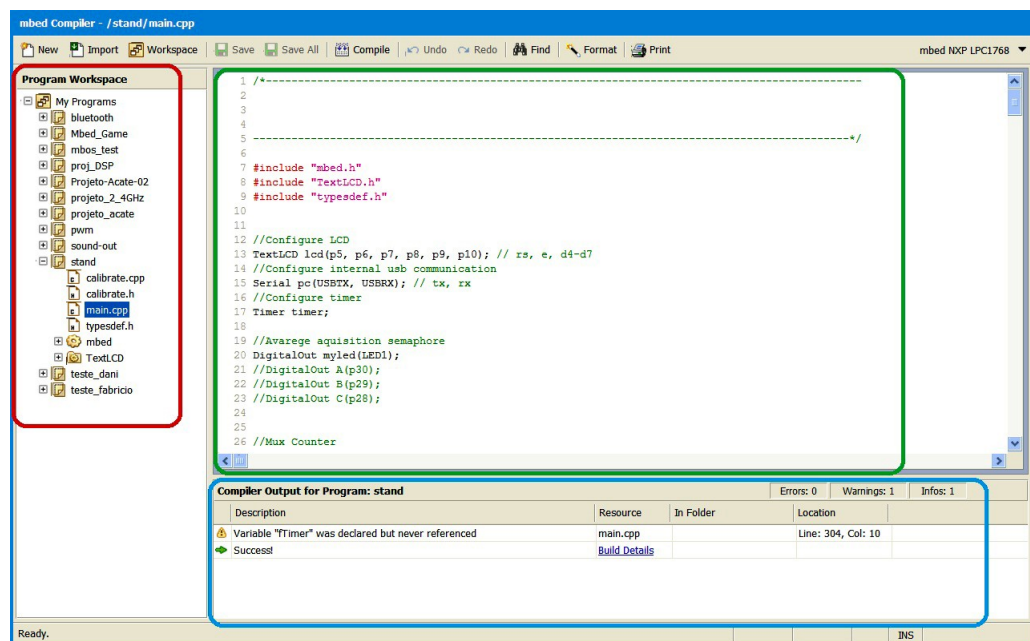


FIGURA 18 – Ambiente de desenvolvimento

Fonte: <https://mbed.org/compiler/>

<sup>3</sup> Site de desenvolvimento do kit Mbed: <http://mbed.org/cookbook>

Para o presente projeto, foi desenvolvido um *firmware* composto por quatro funções básicas, são elas: principal, inicialização, calibração e leitura dos sensores.

A função principal é responsável por chamar outras funções durante a execução do programa. O fluxograma (Figura 19) mostra o fluxo que a função principal segue no programa.

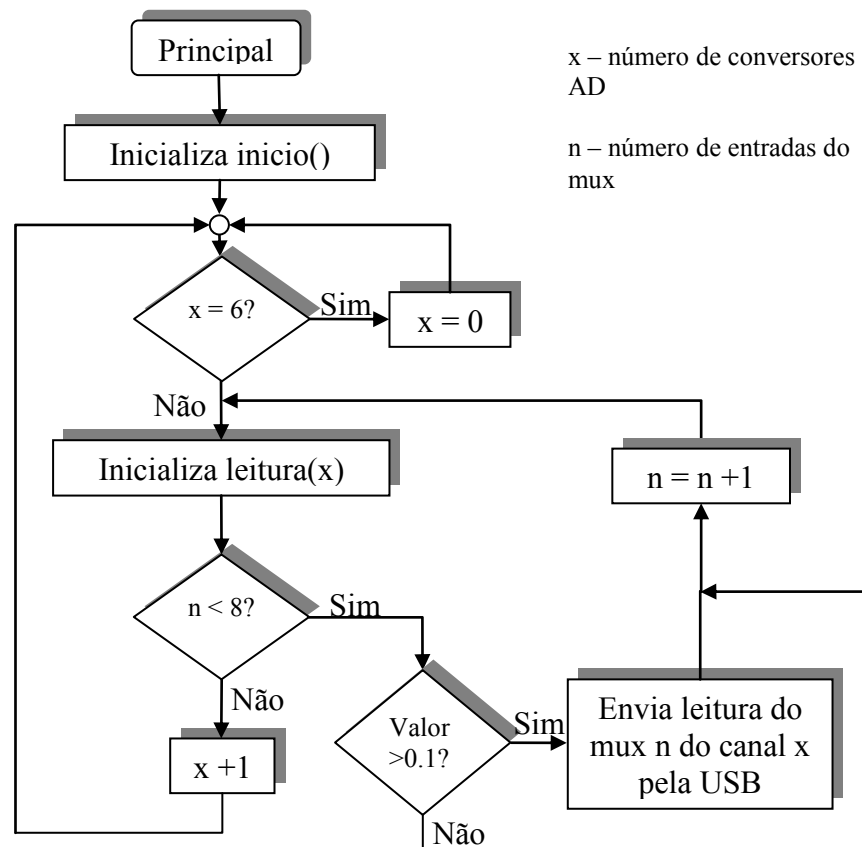


FIGURA 19 – Fluxograma da função principal

A primeira função chamada pelo programa principal é a inicialização do sistema, na qual é calibrada a plataforma dos sensores. O envio do sinal lido, através da USB, somente é executado se o valor for maior que 0,1 – em uma faixa de 0 a 1 – para evitar que pequenas oscilações sejam detectadas.

O fluxo da função de inicialização, chamado pela rotina principal, pode ser visualizado na Figura 20.

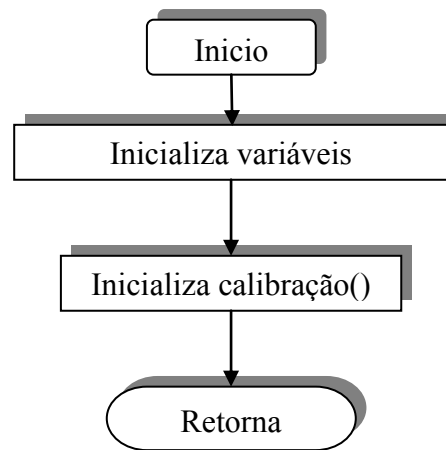


FIGURA 20 – Fluxograma de inicialização

Devido à diferença de valores de tensão nos sensores quando em repouso, fez-se necessária o desenvolvimento de uma rotina de calibração. Esta subrotina tem por finalidade identificar e armazenar, para uso posterior, o valor médio em repouso de cada um dos sensores, criando assim uma referência unitária para todos os sensores. Este valor armazenado deverá ser utilizado em outra rotina e será descrito posteriormente.

A rotina de calibração, representada no fluxograma da Figura 21, inicia com a seleção do canal AD respectivo, executa uma varredura do sinal do multiplexador que está ligado a esse canal, armazenando o resultado como um *offset* – valor de referência, de cada um dos oito sensores ligados a este dispositivo. Com a varredura de seis canais AD, ligados em multiplexadores de oito entradas é possível a leitura de até 48 sensores.

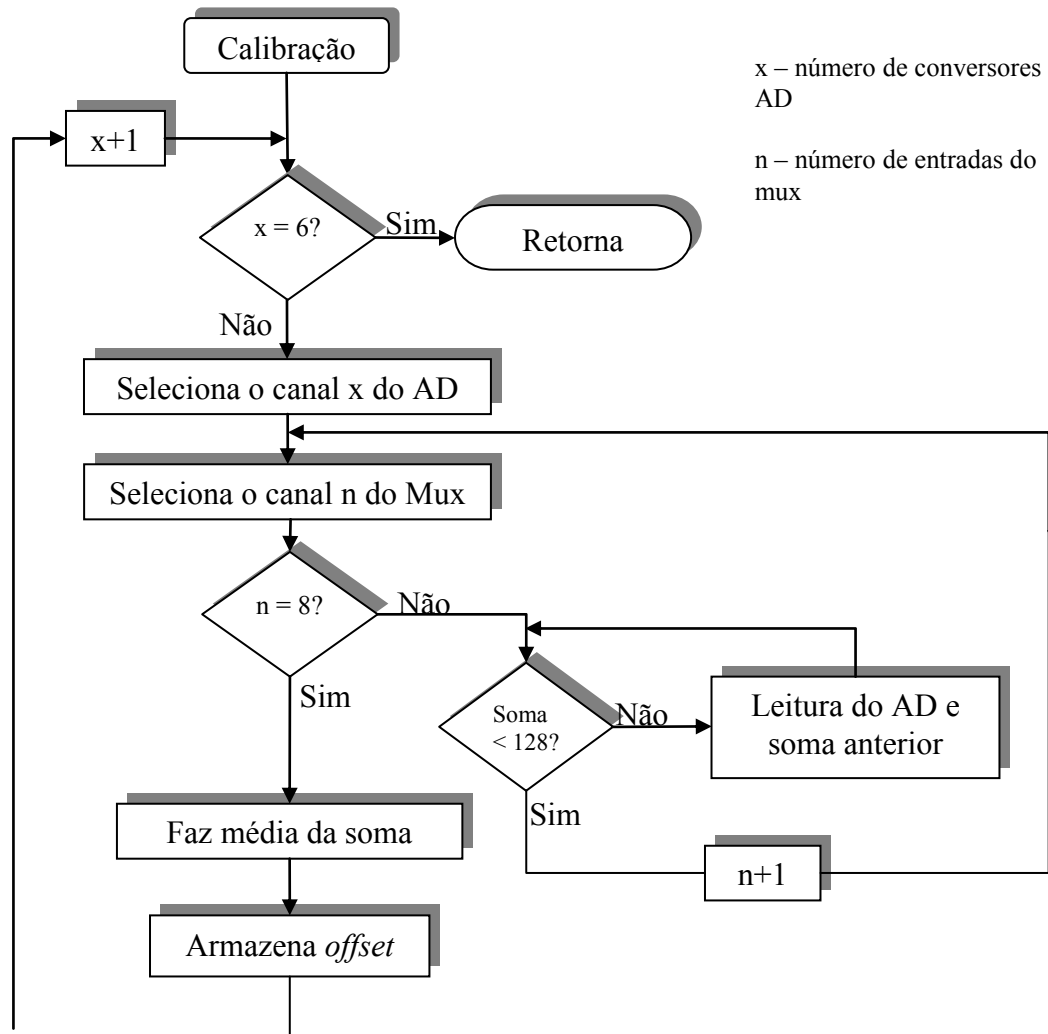


FIGURA 21 – Fluxograma de calibração

Por fim, tem-se a rotina de leitura do sinal dos sensores da plataforma. Esta função executa a varredura do sinal dos sensores e utiliza o valor de *offset* armazenado de cada elemento para subtrair do valor de média lido em cada instante. Desta forma, tem-se variação em todos os elementos a partir da mesma referência. O fluxograma apresentado na Figura 22 mostra as subrotinas da função de leitura, que após a execução da leitura de todos os sensores retorna para a função principal.

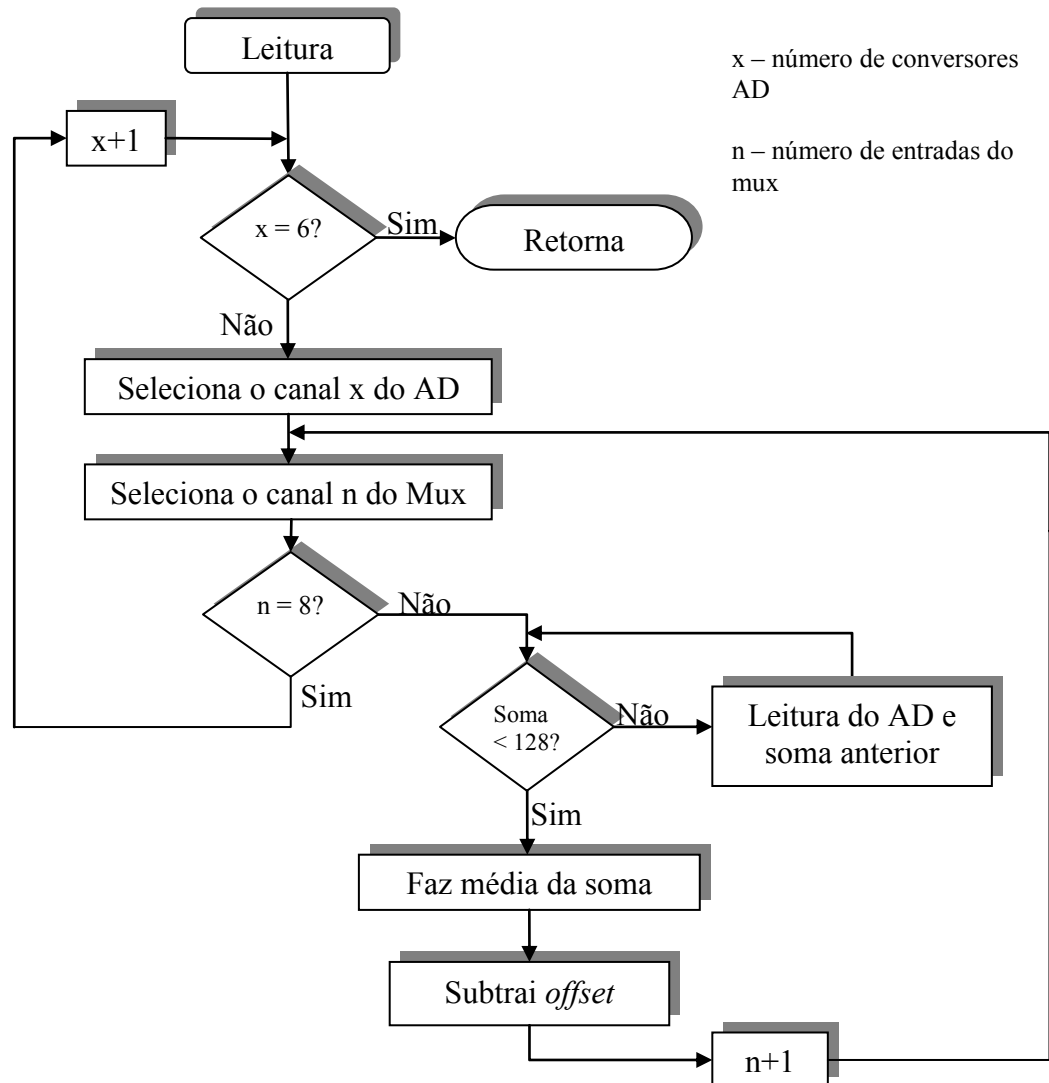


FIGURA 22 – Fluxograma de leitura

### 6.3 Condicionamento de sinal

Para possibilitar a leitura do sinal dos sensores, fez-se necessário o desenvolvimento de um circuito condicionador de sinal. Este circuito é composto por um transistor de sinal e dispositivos passivos.

Devido à característica de resposta do sensor, cujo valor de tensão varia tanto para valores positivos quanto negativos e com picos de tensão maiores que o recomendado pelo



fabricante do microcontrolador, este circuito limita o sinal de tensão do sensor em 3,3V e elimina valores negativos de tensão (Figura 23).

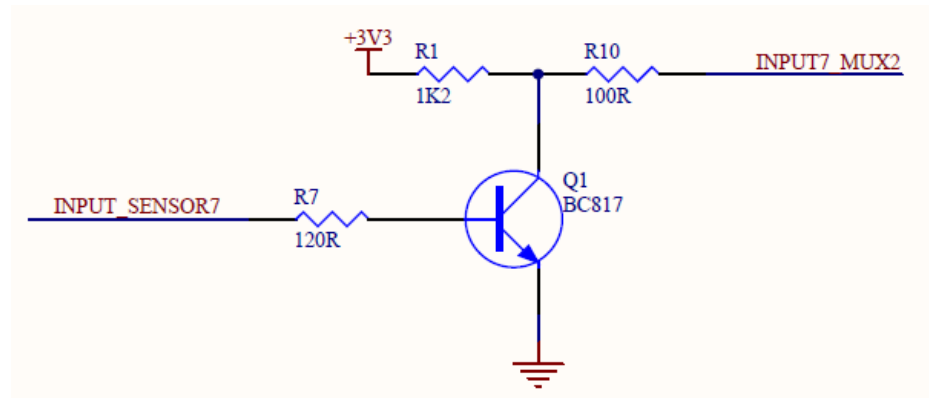


FIGURA 23 – Condicionamento de sinal do sensor 7

Valendo-se do princípio de funcionamento do transistor bipolar de conduzir entre coletor e emissor uma corrente proporcional à corrente de base, este circuito é acionado quando a tensão aplicada pelo sensor no resistor R7 é maior que 0,6 V – tensão de polarização de Q1. Após o acionamento do circuito, a corrente entre os terminais de coletor e emissor de Q1 será proporcional à corrente de base, e conseqüentemente, a tensão na saída em R10 será variável de acordo com a tensão aplicada na entrada em R7.

A forma de onda da Figura 24 mostra a tensão de entrada do circuito e a tensão de saída proporcional e limitada em 3,3V.

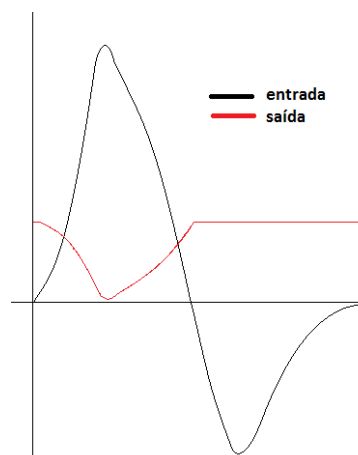


FIGURA 24 – Tensão de entrada *versus* tensão saída

A placa de condicionamento de sinal foi desenvolvida com auxílio do *software* Altium Designer DXP foram utilizados componentes SMT (*Surface Mount Technology*) visando à redução da área ocupada e a otimização do consumo de energia (Figura 25).

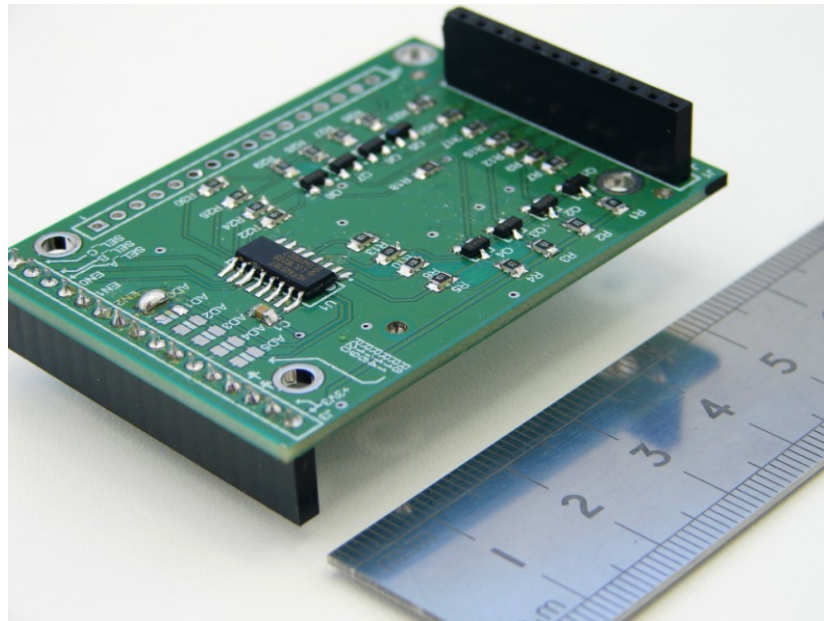


FIGURA 25 – Condicionamento de sinal

O circuito é composto por oito entradas de sensores e um circuito multiplexador. Esta configuração foi proposta para possibilitar o aumento do número de sensores acoplados à CMC. Desta forma, é possível ler até 48 sensores da plataforma, empilhando até seis placas de condicionamento. A Figura 26 mostra as etapas do circuito de condicionamento de sinal e multiplexação.

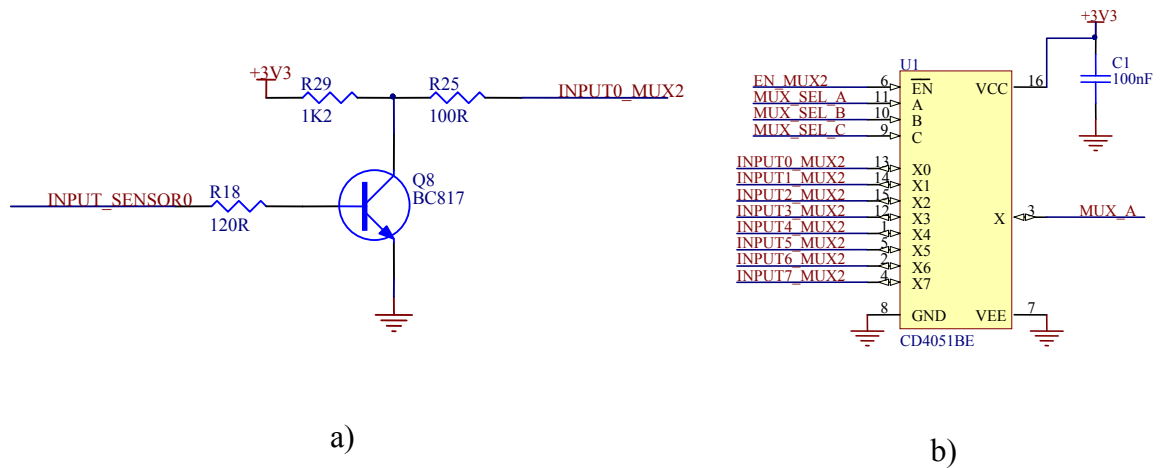


FIGURA 26 – Circuito condicionador de sinal. a) condicionamento; b) multiplexação

#### 6.4 Plataforma de Sensores

A plataforma de sensores é formada por um conjunto de elementos sensíveis à pressão mecânica, ligados em forma de matriz (Figura 27), possibilitando a aquisição de diferentes pontos de força sob a planta do pé. De posse dos dados adquiridos, é possível visualizar graficamente quais pontos da plataforma sofreram as maiores variações de pressão em determinado instante de tempo.

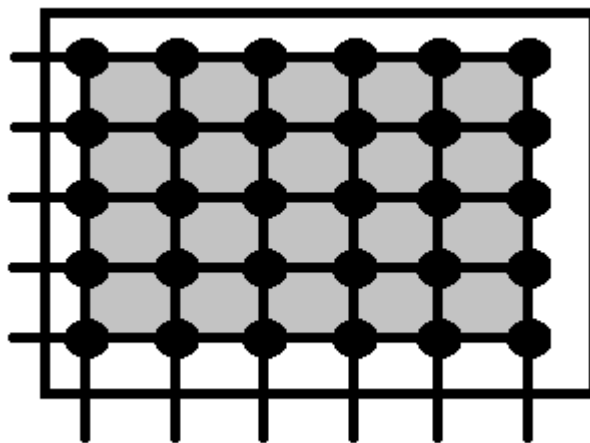


FIGURA 27 – Plataforma matricial de sensores

Com a proposta de desenvolvimento do projeto com baixo custo, optou-se por utilizar transdutores de fácil comercialização. Os elementos selecionados são *buzzers* piezoelétricos, comumente utilizados na indústria de brinquedos e utensílios domésticos para geração de sinais de áudio.

Estes elementos, por possuírem característica piezoelétrica, são utilizados para a conversão de tensão elétrica – associada a uma frequência – em pressão sonora (Figura 28).

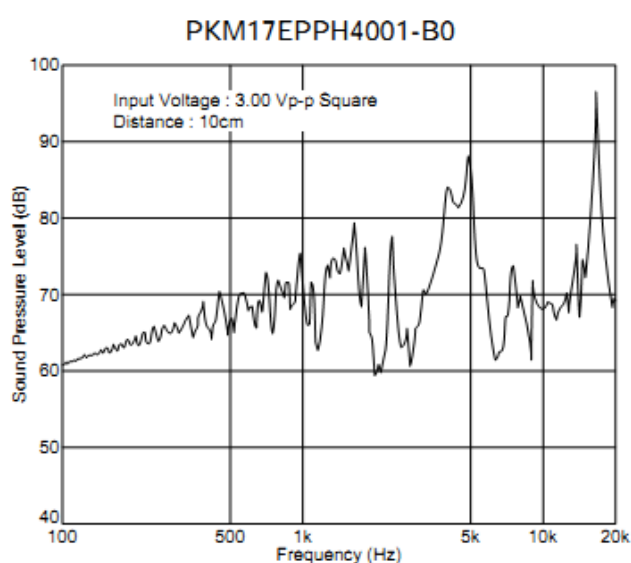


FIGURA 28 – Resposta em pressão sonora do buzzer PKM17EPPH4001-B0

Fonte: Ficha técnica do fabricante

Como descrito no Capítulo 3, os elementos piezoelétricos são dispositivos ativos – não necessitam de alimentação externa para funcionarem – e podem converter sinais mecânicos em elétricos ou vice-versa. Partindo desse princípio, utilizou-se do transdutor *buzzer* para conversão de pressão mecânica em tensão elétrica. A tensão elétrica gerada proporcionalmente à pressão mecânica aplicada é disponibilizada ao circuito de condicionamento de sinal através da rede de sensores.

Por ser um elemento utilizado para obtenção de pressão sonora a partir de uma tensão elétrica, não há caracterização para o funcionamento inverso – ou seja, conversão da pressão mecânica em tensão elétrica. Para se obter a curva característica desses transdutores,

faz-se necessária a utilização de um dinamômetro digital. Deste modo, não foi possível acesso ao equipamento, o que impossibilitou a caracterização do *buzzer* para o funcionamento inverso.

### **6.5 *Software* para visualização**

Para possibilitar a visualização dos dados gerados através da plataforma, de forma gráfica e em tempo real, fez-se necessário o desenvolvimento de um programa em MATLAB capaz de receber os dados enviados pelo microcontrolador – através da USB – e convertê-los em um gráfico 2D.

O programa para o *software* MATLAB foi desenvolvido, basicamente, abrindo-se um canal de comunicação serial, recebendo e armazenando os dados em uma matriz e gerando o gráfico. Como o sistema é continuamente atualizado, os dados também são atualizados, assim como o gráfico, o que possibilita uma visualização em tempo rel do sistema em funcionamento.

Para possibilitar a visualização da resposta através do gráfico em 2D, fez-se necessária a utilização de uma função de interpolação da matriz principal – dados dos sensores – gerando uma matriz secundária, de maior ordem, e com maior resolução. Esta técnica foi utilizada devido ao reduzido número de sensores utilizados nesta etapa do projeto – oito sensores.

## **7 RESULTADOS ALCANÇADOS**

Visando alcançar o objetivo proposto para essa pesquisa, o sistema de sensoriamento foi submetido a testes com os quais se faz a análise dos resultados.

A premissa de se desenvolver um sistema com baixo custo fez-se necessária para concorrer com produtos já consolidados no mercado. Partindo dessa prerrogativa, são discriminados equipamentos semelhantes e comparados com a tecnologia desenvolvida neste projeto.

### **7.1 Testes dos sensores**

Os testes basearam-se na aplicação de força relativa em cada um dos sensores primeiramente, e por fim na plataforma, variando a intensidade enquanto os dados são enviados via USB a um computador e interpretados pelo programa MATLAB.

Em testes de bancada, no qual uma variação de força foi aplicada ao sensor, foi possível determinar o formato do sinal quando submetido a uma pressão mecânica qualquer (Figura 29). Observou-se que o sinal elétrico possui uma excursão de valores positivos e negativos até retornar ao regime.

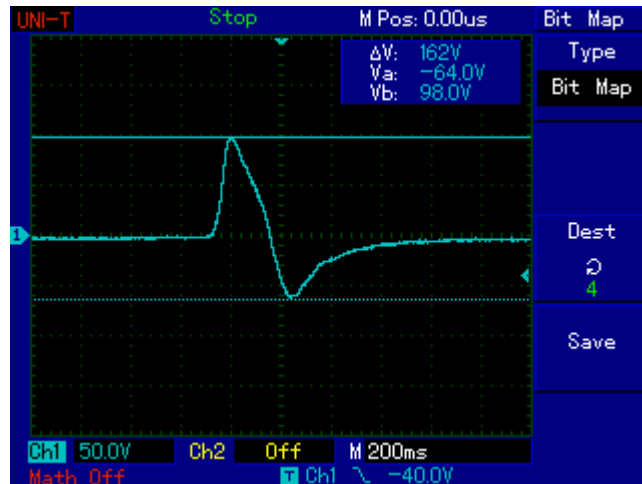


FIGURA 29 – Curva adquirida de teste em bancada. Sinal de resposta do transdutor a uma força aplicada.

Para o dispositivo proposto por este projeto, somente a parte positiva do sinal do sensor é necessária, fornecendo uma relação entre a força aplicada sobre esse sensor e a tensão medida nos pinos do mesmo.

Foi possível verificar ainda que para uma mesma frequência, com intensidade de pressão mecânica aplicada diferente, o comportamento do sensor é proporcional (Figura 30), ou seja, quanto maior a força aplicada, maior será a amplitude do sinal.

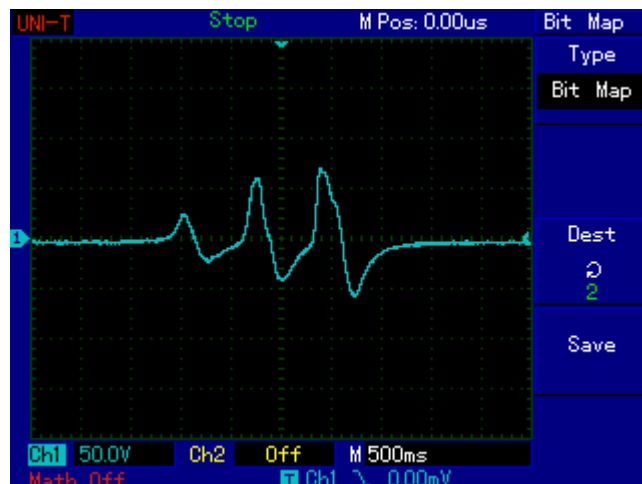


FIGURA 30 – Variação de amplitude para a mesma frequência.

Observou-se também que o formato deste sinal não sofreu alteração quando a frequência foi alterada (Figura 31).

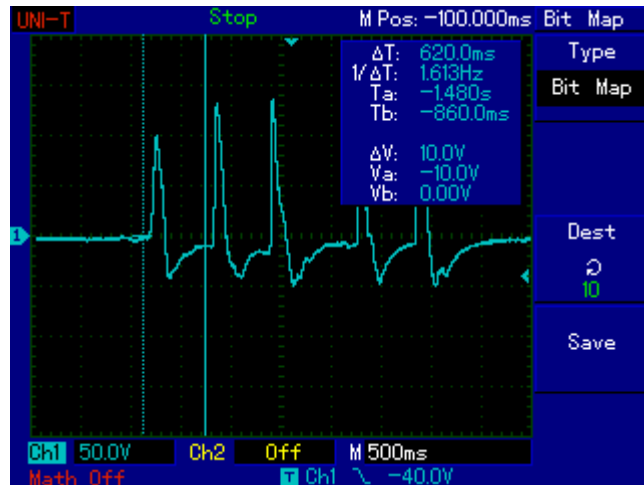


FIGURA 31 – Resultado da variação da frequência mantém formato do sinal.

Para possibilitar a formação de uma rede de sensores capaz de adquirir o valor em vários pontos de uma plataforma, fez-se necessária a confecção de um arranjo que viabilizasse essas medidas. Os sensores foram conectados entre si e as vias de sinal ficaram disponíveis para leitura pelos conversores analógico/digital do microcontrolador (Figura 32). A ilustração mostra nove transdutores, porém foram avaliados oito unidades devido ao circuito de condicionamento possuir implementado um circuito multiplexador de oito entradas. O sinal referência é conectado ao pino de referência do circuito de condicionamento de sinal e cada um dos sinais dos sensores é conectado a respectiva entrada do condicionamento de sinal.



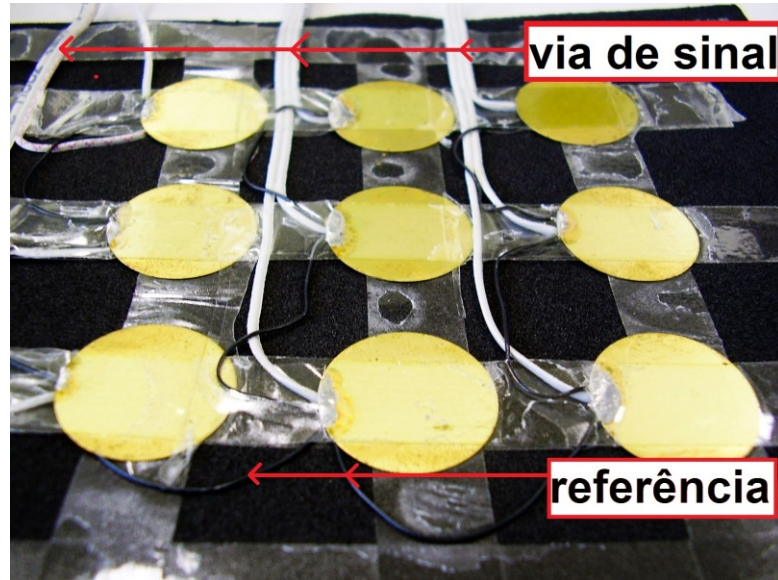


FIGURA 32 – Arranjo de sensores e vias de sinal e referência

Inicialmente, com um arranjo de oito sensores foi possível avaliar o método proposto. A plataforma foi sujeita a ação de uma força em pontos distintos, validando o princípio de funcionamento do projeto. Para cada ponto, verificou-se a resposta do sensor à aplicação de uma força. Como nesta etapa do projeto não foi possível realizar a caracterização dos transdutores, não há como definir o valor absoluto da pressão mecânica exercida na plataforma. Deste modo, o gráfico mostrado na Figura 33 indica, proporcionalmente, quais transdutores estiveram submetidos a maior ou menor intensidade de pressão.

## Plataforma

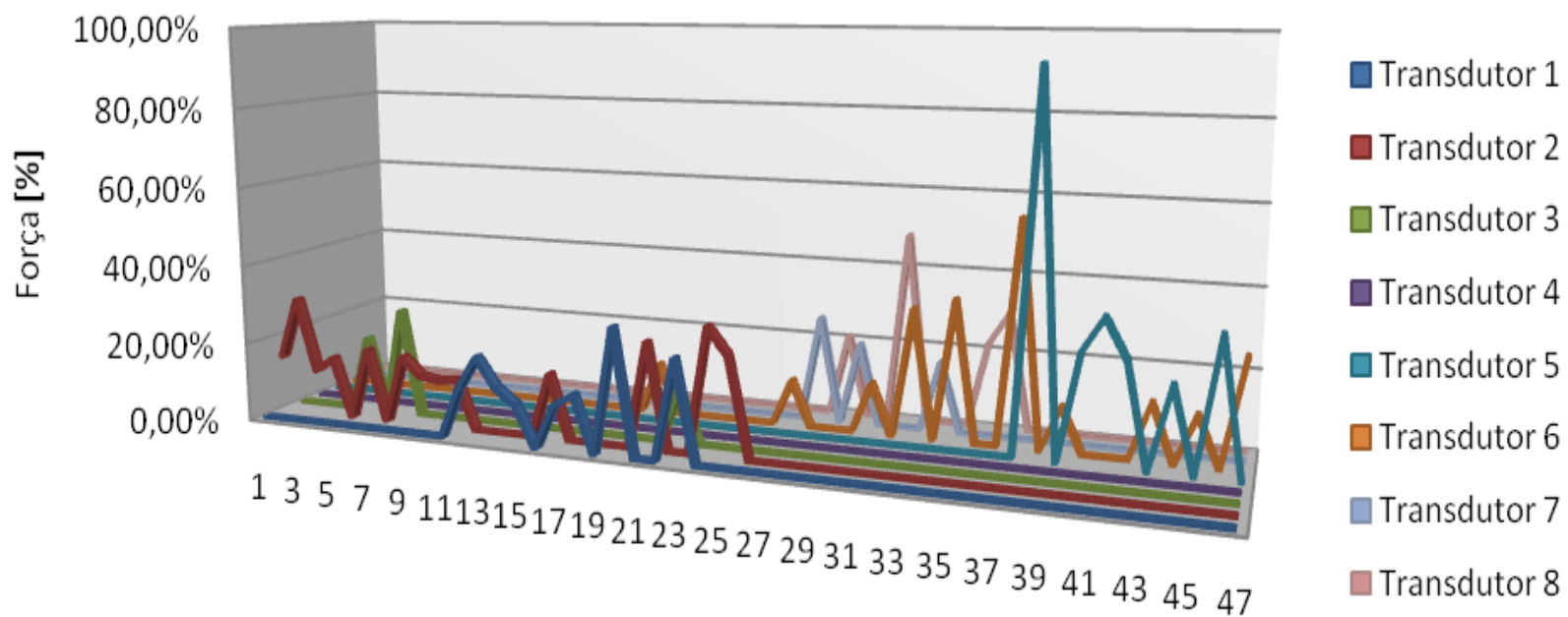


FIGURA 33 – Teste em bancada – plataforma sujeita a ação de força em diferentes pontos.

## 7.2 Testes do protótipo

Para validar o funcionamento, o sistema foi submetido a testes de bancada simulando uma aplicação real onde a pressão é exercida por uma pessoa sobre a plataforma. Os testes consistem na aplicação de uma força relativa a partir da pressão exercida pela mão ou pela planta do pé do utilizador.

Como não é conhecida a relação entre a força aplicada e a medida realizada pela plataforma, assume-se a variação da força em porcentagem, ou seja, quanto maior a intensidade da força aplicada mais próximo de cem por cento o gráfico irá indicar.

Na Figura 34 é possível observar a realização dos testes e o circuito implementado.



FIGURA 34 – Realização dos testes do protótipo final

Como o sistema atualiza os dados de força e o gráfico em tempo real, realizou-se a aquisição de três momentos com intensidades diferentes para demonstrar o funcionamento do sistema. A Figura 35 mostra o valor proporcional de força menor que 10%. É possível observar que em alguns pontos não houver sequer atuação de força sobre os sensores.

A escala de cor indica que cores em tons ciano são de menor intensidade e cores em tons de vermelho são de maior intensidade.

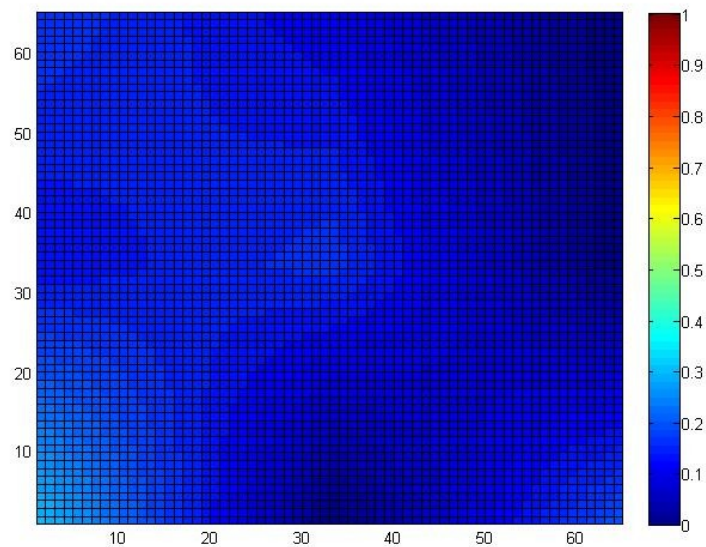


FIGURA 35 – Gráfico 2D com distribuição de pressão sobre a plataforma de sensores com intensidade de força entre 0 e 35%

Aplicando-se mais intensidade de força sobre a plataforma observou-se alteração de colocação e mudança no posicionamento na matriz de sensores. A Figura 36 indica maior intensidade de força aplicada nos pontos com tons de cor verde e amarelo.

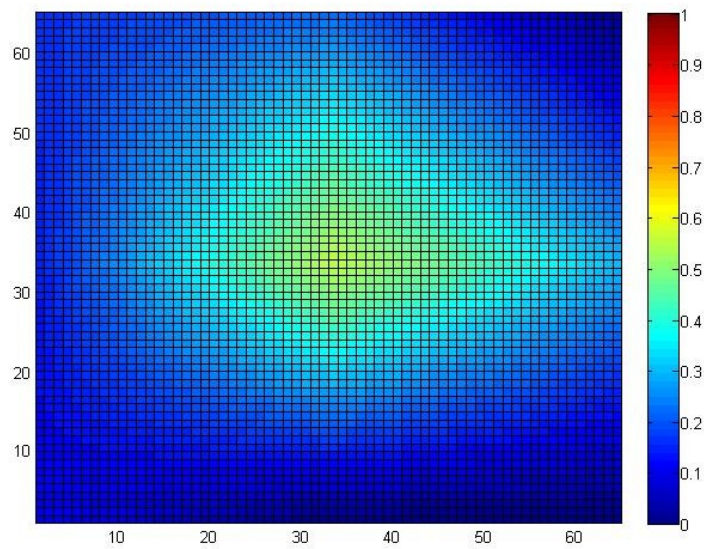


FIGURA 36 – Gráfico 2D com distribuição de pressão sobre a plataforma de sensores com intensidade de força entre 0 e 60%

Para finalizar, submeteu-se a plataforma a intensidade máxima e observou-se a variação na intensidade das cores para tons de vermelho. Na Figura 37 há pontos de maior intensidade no centro e em uma das extremidades, com intensidade próxima a 100%.

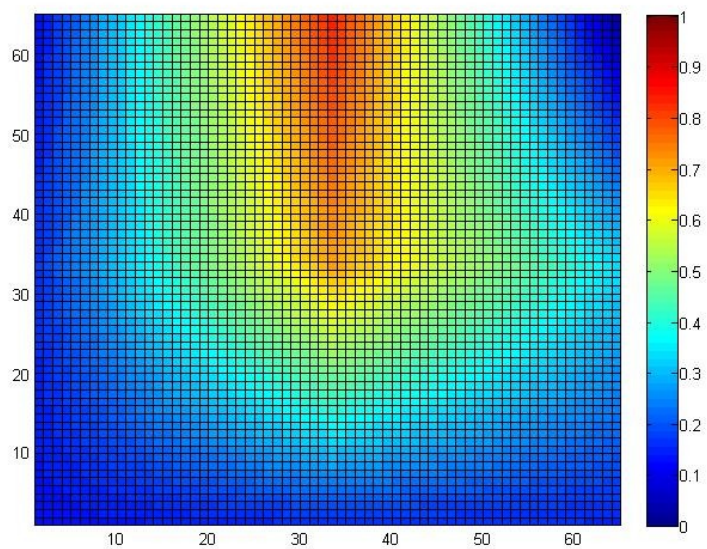


FIGURA 37 – Gráfico 2D com distribuição de pressão sobre a plataforma de sensores com intensidade de força entre 0 e 100%

Com base nos gráficos gerados durante os testes em bancada, foi possível verificar a variação de intensidade da força aplicada bem como a ação desta força em diferentes pontos da plataforma. A técnica de interpolação aplicada através do MATLAB permitiu visualizar a tendência da força quando aplicada em mais de um ponto, ou seja, qual a intensidade da força entre os pontos da matriz submetidos à ação.

Dessa forma foi possível validar o funcionamento do sistema integrado: plataforma de sensores; central microcontrolada; e *software* para visualização.

### 7.3 Comparativo com mercado

Visando atingir o objetivo de desenvolvimento com baixo custo, após o levantamento de produtos semelhantes, foi realizado o comparativo. Apesar de utilizar uma tecnologia diferenciada – transdutores *buzzer* piezoelétricos – das disponíveis no mercado, o sistema se mostrou adequado para o desenvolvimento proposto.

Analisaram-se dois modelos diferentes de produtos quanto ao custo, de acordo com as especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes e realizou-se a comparação conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos e custos de aplicações semelhantes disponíveis no mercado

Modelo Comercial	Tecnologia	Custo (US\$)
MatScan <sup>®</sup>	Sensores Resistivos	1.999,00
Tactilus <sup>®</sup>	Piezo-resistivo	4.000,00
Modelo Proposto	Piezoelétrico	196,00

O custo para a aplicação proposta pode ser distribuído entre os componentes principais sendo microcontrolador, sensores e placas de circuito impresso. Para a cobertura da mesma área de sensores (30x30cm), o custo do kit utilizado é de US\$60; dos sensores é de US\$36; e as placas US\$100

É importante salientar que os produtos analisados possuem tecnologias diferentes e são fabricados em larga escala, além de serem produtos comerciais, diferente do protótipo proposto por este projeto. Uma comparação baseada somente no custo de fabricação da proposta deste projeto não qualifica o mesmo no comparativo quanto a outras características neste tipo de sistema.

Os produtos analisados não foram testados para efeito de comparação de resultados devido ao custo elevado para aquisição.

## 8 CONCLUSÃO

A utilização de técnicas modernas para treinamento de atletas em diversas modalidades desportivas tem sido crescente e, cada vez mais se tem tentado aliar tecnologia e esporte. Os resultados alcançados com esse tipo de aplicação em esportes considerados de elite como o golfe, por exemplo, tem sido satisfatórios e cada vez mais abrem caminho para utilização em outras modalidades.

O custo elevado dos dispositivos comercializados ainda é uma barreira a ser transposta para possibilitar a disseminação da tecnologia. O comparativo de mercado indicou uma grande disparidade no custo, apesar de haver diferença na tecnologia empregada.

Conforme proposto, foi realizado um estudo dos sensores de pressão compatíveis com a aplicação proposta a fim de selecionar o modelo mais adequado. Os sensores piezoelétricos apresentaram melhores resultados de sensibilidade, além de serem ativos, consumindo menos energia tornando o sistema mais eficiente.

A definição do microcontrolador utilizado se deu pelo resultado do comparativo com outros dois dispositivos semelhantes no mercado. A tecnologia ARM tem sido empregada em muitos projetos devido ao seu alto desempenho e baixo consumo de energia, tornando-os ótimas opções para projetos que necessitem alta eficiência energética. Além do exposto, o modelo utilizado dispõe dos periféricos necessários para aquisição de sinal e um custo abaixo das outras soluções avaliadas.

Com a escolha dos sensores foi possível definir qual o melhor modelo para a plataforma proposta. Foram definidos, para a validação do funcionamento do sistema, nove sensores montados em uma matriz quadrada de três posições, o que se mostrou satisfatório para essa etapa. Todavia, para uma aplicação comercial ou que necessite de maior área de contato, é necessário avaliar a quantidade de sensores ideal, aumentando a resolução e a confiabilidade dos resultados dos dados da plataforma.

O sistema eletrônico desenvolvido para condicionamento, aquisição e transmissão de dados mostrou-se eficaz para a proposta, incorporando versatilidade – aumento do número



de sensores – e robustez, não apresentando falha em nenhum momento dos testes realizados. O circuito de condicionamento de sinal é capaz de suportar os mais diferentes tipos de sensores *buzzers* piezoelétricos alterando-se somente os elementos do circuito, demonstrando a versatilidade que o sistema pode alcançar. Conectando-se a um computador através da USB, possibilita a visualização do resultado na maioria dos dispositivos atuais que utilizam esse tipo de comunicação.

A utilização do MATLAB para visualização dos testes mostrou-se altamente eficiente diante da opção de desenvolvimento de um *software* próprio para este tipo de visualização. Por possuir diversas bibliotecas gráficas e poderoso sistema de cálculo, não houve dificuldade na geração dos gráficos e na interpolação dos valores. Os resultados visualizados nos testes do protótipo possibilitaram validar a transmissão dos dados bem como a variação da pressão exercida em diferentes pontos da plataforma.

A escolha dos sensores do tipo piezoelétricos para a aplicação proposta demonstrou-se correta, tanto pela sensibilidade e estabilidade elevada do sensor, quanto pela característica ativa, o que diminui o consumo de energia e otimiza o tamanho do sistema como um todo. Da mesma forma, o microcontrolador atendeu aos requisitos de projeto, uma vez que não apresentou atraso na leitura dos sensores, além de disponibilizar comunicação USB para conexão com microcomputador e velocidade de processamento compatível com a aplicação.

Com o andamento do projeto foi possível observar diferentes perspectivas no trabalho com sensores tanto para sensoriamento em aplicações desportivas, como para auxílio no tratamento/prevenção de doenças. Esse conhecimento foi sintetizado e disposto neste trabalho dentro do tempo disponível para tal, deixando ainda inúmeras lacunas a serem observadas no âmbito desta pesquisa.

Para desenvolvimento de aplicações futuras, sugere-se a caracterização dos sensores *buzzers* piezoelétricos para aplicação reversa, bem como a caracterização da plataforma com um todo para possibilitar a medição da força efetivamente aplicada.

Outro ponto a ser abordado é a ampliação da resolução da plataforma, que neste projeto limitou-se a oito sensores, para a capacidade máxima do sistema.

Sugere-se a realização de testes em situação real de uso do sistema num treinamento, a fim de validar o sistema comparando com os resultados alcançados em bancada.

Por fim, realizar a comparação com os sistemas comerciais pesquisados.

## REFERÊNCIAS

SWADDLING, Judith. *The Ancient Olympic Games*. ed. Texas : University of Texas Press, 2002.

OFFICIAL WEBSITE OF THE OLYMPIC MOVEMENT. Athenas 1896. Disponível em: <http://www.olympic.org/athens-1896-summer-olympics>. Acesso em: 06/05/2011.

SILVA, Ana S., CORREIA, Miguel F., SALAZAR, Antonio J., BORGES, Carla M. **WIMU: WEARABLE INERTIAL MONITORING UNIT a MEMS-based device for swimming performance analysis**. Biostec 2011 - 4th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Rome, Italy, 2011.

OHGI, Yuji. **MEMS SENSOR APPLICATION FOR THE MOTION ANALYSIS IN SPORTS SCIENCE**. ABCM Symposium Series in Mechatronics, Ouro Preto, 2006, v.2, p.501-508.

SENSOR PRODUCTS INC. Real-Time Foot Pressure Analysis – Application: Golf Swing. Disponível em: <http://www.sensorprod.com/dynamic/golf.php>. Acesso em: 14/06/2009.

PEREIRA, Fábio. **Tecnologia ARM Microcontroladores de 32 Bits**. ed. São Paulo : Érica, 2007. 448 p.

PAZOS, Fernando. **Automação de Sistemas & Robótica**. ed. Rio de Janeiro : Axcel Books, 2002. 377 p.

IDOETA, Ivan V., CAPUANO, Francisco G.. **Elementos de Eletrônica Digital**. ed. São Paulo : Érica, 1993. 350 p.

MARQUES, Maria A., **Desenvolvimento de Estruturas Planas com Caracterização Dinâmica de Forças em 3D Aplicação ao Pé**. 343 f. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) – Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2007.

BONA, Daniel D., **Desenvolvimento de um Sistema de Sensoriamento Remoto em Pranchas de Surf Utilizando Tecnologia ZIGBEE**. Monografia (Graduação em Tecnologia em Sistemas Eletrônicos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis – Brasil, 2009. 88 f.