

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Polianny Ferreira Santos

**PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE INTELIGENTE
PARA MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE HUMANA ESTÁTICA E DINÂMICA**

Belo Horizonte

2017

Polianny Ferreira Santos

**PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE INTELIGENTE
PARA MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE HUMANA ESTÁTICA E DINÂMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Paiva Martins.

Co-orientador: Prof. Dr. Rudolf Huebner

Área de Concentração: Bioengenharia

Belo Horizonte

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S237p

Santos, Poliany Ferreira

Projeto, implementação e validação de uma superfície inteligente para monitoramento de estabilidade humana estática e dinâmica / Poliany Ferreira Santos. Belo Horizonte, 2017.

131 f. : il.

Orientador: Carlos Augusto Paiva Martins

Coorientador: Rudolf Huebner

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

1. Equilíbrio postural. 2. Marcha humana. 3. Distúrbios da postura. 4. Vibração - Medição. 5. Biomecânica. 6. Estática. I. Martins, Carlos Augusto Paiva. II. Huebner, Rudolf. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 612.766

Ficha catalográfica elaborada por Fernanda Paim Brito - CRB 6/2999

Poliany Ferreira Santos

**PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE INTELIGENTE
PARA MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE HUMANA ESTÁTICA E DINÂMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Carlos Augusto Paiva da Silva Martins (Orientador)

Prof. Dr. Rudolf Huebner (Coorientador)

Dra. Flávia Magalhães Freitas Ferreira (Banca Examinadora)

Dr. Ricardo Queiroz Guimarães (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 14 de maio de 2017.

Aos Meus Pais: José Maria dos Santos e Vanderli Ferreira Santos

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus por esta grande oportunidade de me tornar uma mestra em Engenharia Elétrica e àqueles que me geraram, meus pais, muito obrigada pela paciência e todo investimento até aqui. Minhas amadas irmãs, cunhados, tios, primos e Maria Eduarda, obrigada pela união, paciência e incentivo.

Agradeço aos meus amigos (Lucas, Bernardo, Juares, David, Henrique, Valdinéia) que dedicaram horas me ajudando a desenvolver cada etapa deste projeto!

Agradeço a CAPES por confiar a mim a bolsa de estudos, sem a mesma seria impossível a realização do mestrado. Obrigada ao Dr. Carlos Augusto Paiva da Silva Martins por toda amizade e incentivo na orientação deste trabalho. Obrigada ao Dr. Marcos Pinotti (In memoriam) pela inspiração para uma geração de pesquisadores do Brasil e do mundo. Obrigada Dr. Rudolf Huebner pela dedicação e compreensão como meu coorientador. Obrigada Dr. Ricardo Guimarães e toda equipe de pesquisadores do LAPAN pela disposição, incentivo e apoio.

A cada funcionário e professor do PPGE meu muito obrigada por seu apoio, cuidado e incentivo.

“Tudo de bom que recebemos e tudo o que é perfeito vêm do céu, vêm de Deus, o Criador das luzes do céu.” Tiago 1:17

RESUMO

Um diagnóstico seguro de doenças que afetam a capacidade do equilíbrio postural, requer sistemas de medições de força sobre os pés durante o caminhar, o saltar e o correr. Nessa visão é que o presente trabalho projeta, implementa e valida um protótipo de superfície de forças com pastilhas piezoelétricas. O objetivo de implementar e validar um protótipo de superfície inteligente de força, esta em realizar uma análise de estabilidade estática e dinâmica em tempo real, de baixo custo e arquitetura modular. Para isso empregou-se a metodologia com pastilhas piezoelétricas para montagem da plataforma, permitindo o desenvolvimento de protótipos da superfície de forças de baixo custo. No primeiro protótipo, com pastilhas colocadas em lugares equidistantes de uma matriz 4 cm x 4 cm, e no protótipo 2, posicionados na matriz 15 cm x 10 cm, conforme o tamanho dos pés do usuário. O microcontrolador escolhido foi o Arduino Mega e os sinais dos sensores, os multiplexados com o MuxShield II da plataforma do Arduino. A obtenção da arquitetura modular varia conforme o tamanho dos pés e a quantidade de sensores a serem usados, sendo no máximo 48. Uma interface de fácil interpretação e de uso foi implementada através do Java 8 e Java 9, no primeiro e no protótipo 2 respectivamente. O teste de vibrações de um aparelho celular sobre a superfície, garantiu a eficiência da mesma para gerar sinais de saída correspondentes às frequências das vibrações aplicadas. Esse fato também foi evidenciado durante os testes realizados com algumas amostras das pastilhas piezoelétrica de 22 mm e 35 mm com vibrações de 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 30 Hz. Os resultados obtidos a partir dos dados brutos gerados pela superfície de forças, mostraram a possibilidade de uma análise do movimento humano com direção e sentido sobre a superfície, mediante testes realizados no primeiro protótipo. Através dos testes de estabilidade estática: Romberg, Unipodal e Tandem foi possível verificar movimentos de desequilíbrio estático humano, com olhos abertos e fechados quando analisados sobre a superfície de forças. Com o Teste Stteping, avaliou-se o equilíbrio dinâmico facilmente através da interface gráfica que promoveu também neste teste, a visualização do desequilíbrio do analisado.

Palavras-chave: Superfície de Forças. Plataforma de Forças. Pastilha Piezoelétrica. Estabilidade Estática. Estabilidade Dinâmica.

ABSTRACT

For the diagnosis of diseases that affect the ability of postural balance, it is necessary to develop systems for force measurements on the feet during walking, jumping and running. In this view, the present work describes the development of a force surface prototype with piezoelectric pellets. With the goal of the implement and validate a prototype of an low cost intelligent force surface with modular architecture, it is intended to perform static and dynamic stability analysis in real time. A methodology used with piezoelectric inserts for a platform assembly allowed the development of force surface prototypes low cost. In a first prototype, the piezoelectrics were places equidistant from a 4 cm x 4 cm matrix, and in definitive prototype, they were positioned in the matrix 15 cm x 10 cm, depending on the size of the user's feet. The chosen microcontroller was the Arduino Mega and the signals from the sensors were multiplexed with the MuxShield II of the Arduino platform. Therefore, a modular architecture was obtained according to the size of the feet and the number of sensors to be used, being a maximum of 48. An interface of easy interpretation and use was implemented through Java 8 and Java 9, in the first p and in the definitive prototype respectively. The test of vibrations of a mobilephone on the surface, guaranteed efficiency of the develop surface to generate output signals corresponding to the vibrations. This fact was also evidenced during the tests carried out with some samples of the 22 mm and 35 mm piezoelectric pellets with vibrations of 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz and 30 Hz. The results obtained from the raw data generated by the force surface also showed to be possible an analysis of the human movement with its direction and sense on the surface through the tests carried out in the first prototype. Through the static stability tests named: Romberg, Unipodal and Tanden it was possible to verify the movements of human static imbalance, with open and closed eyes, when analyzed on the surface of forces. With the Stteping Test, the dynamic balance was evaluated easily through the graphical interface that also promoted, the visualization of the analyzed imbalance in this test.

Keywords: Forcing Surface. Forcing Platform. Piezoelectric Paste. Static Stability. Dynamic Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Força exercida por um pé durante o caminhar, em 3 estágios, e as componentes de força durante o movimento	21
Figura 2 - Gravação realizada com dinamômetros sobre uma plataforma de forças das componentes de força vertical (F_y) e horizontal (F_x) de uma pessoa (a) andando devagar, (b) andando rápido e (c) correndo	22
Figura 3 - Ossos do pé direito, vista inferior	23
Figura 4 - Abóbada plantar sustentada por três arcos (A, B, C).....	24
Figura 5 - Pontos de apoio do pé direito	24
Figura 6 - Pé humano (acima) e detalhe de sua anatomia óssea (abaixo)	25
Figura 7 - Diagrama de cargas de um sensor piezo (a) antes da polarização, (b) durante a polarização e (c) após ser polarizado.....	27
Figura 8 - Relação tensão x força em um sensor piezoelétrico quando (a) não existe tensão ou força aplicada, (b) uma força comprime o sensor, (c) uma força estica o sensor, (d) uma tensão é aplicada no sentido da polarização e (e) uma força é aplicada no sentido contrário à polarização	27
Figura 9 - a) Pastilha piezoelétrica comercial. b) as ações de força impostas ao sensor e em c) a resposta do sensor piezoelétrico em função da ação sobre o mesmo	28
Figura 10 – Amplitude de 160Vpp gerada com a frequência do Shaker em 2Hz amostrada com Osciloscópio	29
Figura 11 - Comparação da pastilha piezoelétrica com a célula de carga PCB208C01 recebendo vibrações de 1Hz.....	30
Figura 12 - Plano cardinal, sargital, frontal e transversal do corpo humano.....	33
Figura 13 - Linha da gravidade.....	34
Figura 14 - Centro de gravidade (COG)	36
Figura 15 - Deslocamentos do Centro de Pressão.....	37
Figura 16 – Estatocinesigrama	38
Figura 17 – Estabilograma	39
Figura 18 - Forças de reação atuando entre o pé e o solo.....	42
Figura 19 - Setup 1 com Peso Padrão	55

Figura 20 - Base para escoamento do Peso-padrão.....	56
Figura 21 - <i>Setup 2</i> de teste com <i>Shaker</i>	60
Figura 22 - Morsa torno de bancada	60
Figura 23 - <i>Setup 3</i> de teste com o <i>Shake</i> fixado com suporte usinado	68
Figura 24 - Suporte para o Shaker com ajuste de altura de fixação1.....	68
Figura 25 Protótipo 1 da Superfície de Forças	86
Figura 26 Diagrama de blocos do protótipo 1 da Superfície de Força	87
Figura 27 - Diagrama de blocos do protótipo 2 da Superfície de Forças	88
Figura 28 Protótipo 2 da Superfície de Forças	88
Figura 29 Matriz dos Sensores do Protótipo 1	89
Figura 30 - Matriz de sensores do pé direito e esquerdo	90
Figura 31 - Matriz de Sensores da Superfície de Forças para pés de tamanho 39...91	91
Figura 32 - Matriz de Sensores da Superfície de Forças para pés de tamanho 33...92	92
Figura 33 - Matriz de Sensores da Superfície de Forças para pés de tamanho 43...92	92
Figura 34 - Diferenças entre os pés de tamanho 33,39 e 43	93
Figura 35 Esquemático do Protótipo 1	94
Figura 36 Módulo de Condicionamento de Sinais do Protótipo 1.....	95
Figura 37 - Circuito de Condicionamento de Sinais	97
Figura 38 - Circuito de Simulado	98
Figura 39 - Layout do Módulo de Condicionamento de Sinais	98
Figura 40 - Módulo de Multiplexação	99
Figura 41 - Módulo do Arduino - ArduinoMega 2560	100
Figura 42 - Diagrama do <i>Software</i>	101
Figura 43. Tela de Menu do Protótipo 1	103
Figura 44 Tela Sensor <i>Mapping</i> do Protótipo 1	104
Figura 45 Tela <i>Chart Analysis</i> do Protótipo 1	104
Figura 46 Tela Real Time <i>Chart</i> do Protótipo 1	105

Figura 47 Teste básico de funcionamento dos sensores do Protótipo 2	106
Figura 48 Teste de <i>Romberg</i>	108
Figura 49 Resultado do Teste de <i>Romberg</i>	109
Figura 50 Teste Unipodal - Perna Direita	111
Figura 51 Resultado Teste Unipodal - Perna Direita (OA)	111
Figura 52 Resultado Teste Unipodal - Perna Direita (OF).....	112
Figura 53 Teste Unipodal - Perna Esquerda	113
Figura 54 Resultado Teste Unipodal - Perna Esquerda (OA).....	114
Figura 55 Resultado Teste Unipodal - Perna Esquerda (OF).....	114
Figura 56 Teste Tandem	115
Figura 57 Resultado do Teste Tandem (OA).....	116
Figura 58 Resultado do Teste Tandem (OF).....	117
Figura 59 Dynamics Balance Test.....	118
Figura 60 Resultado do Dynamics Balance Test.....	119
Figura 61 Superfície de força com vibrações de Celular	120
Figura 62 Teste da Superfície com vibrações de Celular	120
Figura 62 Movimento sobre a superfície	121
Figura 63 Dados do sensor S2 durante o teste de Movimento	122
Figura 64 Dados do sensor S12 durante o teste de Movimento.....	123
Figura 66 Validação da Superfície com o assentar de uma pessoa.....	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Análises dos objetos	50
Quadro 2 - Análise das Características de <i>software</i>	51
Quadro 3 - Análises das Características de <i>Hardware</i>	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Repetibilidade do Sensor Piezoelétrico de 22mm com o peso caindo de 8 cm de altura.....	57
Gráfico 2 - Repetibilidade do Sensor Piezoelétrico de 35 mm com o peso caindo de 8 cm de altura.....	57
Gráfico 3 - Repetibilidade do Sensor Piezoelétrico de 22mm com o peso caindo de 3,5 cm de altura.....	58
Gráfico 4 - Repetibilidade do Sensor Piezoelétrico de 35 mm com o peso caindo de 3,5cm de altura.....	59
Gráfico 5 - Variação de Tensão (VP-P) do Sensor 1 de 35mm com a Frequência (Hz)	63
Gráfico 6 - Variação de Tensão (VP-P) do Sensor 4 de 35mm com a Frequência (Hz)	63
Gráfico 7 - Repetibilidade do Sensor 1 de 22 mm com o peso padrão com o <i>Setup 2</i>	64
Gráfico 8 - Repetibilidade do Sensor 2 de 22 mm com o peso com o <i>Setup 2</i>	65
Gráfico 9 - Repetibilidade do Sensor 3 de 22mm com o peso padrão com o <i>Setup 2</i>	65
Gráfico 10 - Repetibilidade do Sensor 1 de 35mm com o peso com o <i>Setup 2</i>	66
Gráfico 11 - Repetibilidade do Sensor 2 de 35mm com o peso com o <i>Setup 2</i>	66
Gráfico 12 - Repetibilidade do Sensor 3 de 35mm com o peso com o <i>Setup 2</i>	67
Gráfico 13 - Repetibilidade do Sensor 1 de 22 mm com o peso padrão com o <i>Setup 3</i>	79
Gráfico 14 - Repetibilidade do Sensor 2 de 22mm com o peso padrão com o <i>Setup 3</i>	80
Gráfico 15 - Repetibilidade do Sensor 3 de 22mm com o peso padrão com o <i>Setup 3</i>	80
Gráfico 16 - Repetibilidade do Sensor 1 de 35mm com o peso padrão com o <i>Setup 3</i>	81
Gráfico 17 - Repetibilidade do Sensor 2 de 35mm com o peso padrão com o <i>Setup 3</i>	81

Gráfico 18 - Repetibilidade do Sensor 3 de 35mm com o peso padrão com o *Setup 3*
.....82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precisão dos sensores de 22 mm	61
Tabela 2 - Precisão dos sensores de 35mm	62
Tabela 3 - Medições de Tensão VP-P do sensor de 22mm na Primeira Repetição..	70
Tabela 4 - Medições de Tensão VP-P do sensor de 22mm na Terceira Repetição ..	72
Tabela 5 - Medições de Tensão VP-P do sensor de 35mm na Primeira Repetição	74
Tabela 6 - Medições de Tensão VP-P do sensor de 35mm na Terceira Repetição ..	75
Tabela 7 - Medições de Força (N) durante teste do sensor de 22mm	77
Tabela 8 - Medições de Força (N) durante teste do sensor de 35 mm	78
Tabela 9 - Especificações do Arduíno Mega 2560	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contexto	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Justificativa	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Caminhar humano	20
2.2	Sensor utilizado – Pastilha Piezelétrica	25
2.3	Estabilidade estática	30
2.4	Estabilidade dinâmica	35
2.5	Plataformas de forças	40
3	TRABALHOS RELACIONADOS	43
4	AVALIAÇÃO DOS SENSORES PIEZOELÉTRICOS	54
4.1	Setup 1	54
4.1.1	<i>Método</i>	54
4.1.2	<i>Resultado</i>	56
4.2	Setup 2	59
4.2.1	<i>Método</i>	59
4.2.2	<i>Resultado</i>	61
4.3	Setup 3	67
4.3.1	<i>Método</i>	67
4.3.2	<i>Resultado</i>	69
4.4	Conclusão da avaliação dos sensores	82
5	SUPERFÍCIE DE FORÇA	85
5.1	Módulo de Sensores	89
5.2	Módulo de Condicionamento de sinais	94
5.3	Módulo de Multiplexação	99
5.4	Módulo de Coleta de Dados	99
5.5	Módulo de Interface Gráfica	101
5.6	Resultados da superfície de força	105
5.6.1	Testes de Estabilidade Estática	107
5.6.1.1	<i>Teste Romberg</i>	107
5.6.1.2	<i>Teste Unipodal</i>	109
5.6.1.3	<i>Teste Tandem</i>	115
5.6.2	Testes de Estabilidade dinâmica	117
5.6.2.1	<i>Teste Stteping (Dynamics Balance Test)</i>	117
5.6.3	Caracterização da superfície para análise de estabilidade dinâmica	119
	Validação da superfície sob vibrações	119
5.6.3.1	Validação da superfície sob vibrações	119
5.6.3.2	Validação da superfície com uma pessoa se movendo para análise do movimento	121
5.6.3.3	Validação da superfície com o movimento de assentar	123

6	CONCLUSÃO	126
	REFERÊNCIAS.....	128