

Proposta de um Sistema para Análise da Pressão Plantar Utilizando Palmilhas Sensíveis a Pressão

Vitor da S. Moreira¹, Luís Felipe C. Maccalli¹,
Erico M. Hoff do Amaral¹, Julio Saraçol Domingues Júnior¹

¹Engenharia de Computação – Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA)
Bagé – RS – Brazil

{vitormoreira, luismaccalli}.aluno@unipampa.edu.br,

{ericoamaral, juliomingues}@unipampa.edu.br

Abstract. *This paper presents the evolution of the Foot Inspect system, a computational tool for analyzing plantar pressure and creating customized insoles. The initial proposal used an Arduino microcontroller and pressure sensors, while the new version uses a NodeMCU ESP32 with Bluetooth communication, Force Sensitive Resistors (FSR) sensors, which are capable of measuring forces ranging from 0 N to 445 N, and a desktop application for data processing. The system generates heat maps of plantar pressure using geostatistical techniques, such as Kriging, and integrates with a database and a web interface to facilitate the diagnosis and treatment of foot deformities.*

Resumo. *Este trabalho apresenta a evolução do sistema Foot Inspect, uma ferramenta computacional para análise da pressão plantar e confecção de palmilhas personalizadas. A proposta inicial utilizava um microcontrolador Arduino e sensores de pressão, enquanto a nova versão emprega um NodeMCU ESP32 com comunicação Bluetooth, sensores Force Sensitive Resistors (FSR), dos quais são capazes de medir forças que variam de 0 N a 445 N, e um aplicativo desktop para processamento de dados. O sistema gera mapas de calor da pressão plantar por meio de técnicas de geoestatística, como a Krigagem, e integra-se a um banco de dados e uma interface Web para facilitar o diagnóstico e tratamento de deformidades podais.*

1. Introdução

Os pés são essenciais para o equilíbrio e a absorção de impactos durante atividades como caminhar ou correr. No entanto, deformidades como pé plano e pé côncavo podem comprometer sua funcionalidade. Segundo a Associação Brasileira de Medicina e Cirurgia do Tornozelo e Pé (ABTPÉ), cerca de 70% da população mundial relata desconforto ou dor nos pés em algum momento da vida, muitas vezes sem relação com traumas. Isso destaca a importância de análises biomecânicas detalhadas para identificar e tratar alterações na distribuição da pressão plantar, que afetam a estabilidade e a mobilidade.

A baropodometria é uma técnica usada para diagnosticar essas deformidades, medindo a pressão plantar durante a marcha. O tratamento geralmente envolve palmilhas personalizadas, que redistribuem a pressão para melhorar o conforto e a funcionalidade do pé. No entanto, o processo tradicional de confecção dessas palmilhas é subjetivo e demorado, baseado em *feedbacks* contínuos do paciente. Um exemplo de solução avançada

é o Footscan® (RSscan International) ¹, uma plataforma de baropodometria de alta precisão que utiliza sensores para análise estática e dinâmica da marcha. Seu software gera mapas de calor, gráficos de pressão e relatórios detalhados, permitindo uma avaliação precisa da distribuição da pressão plantar. Amplamente utilizado em clínicas de fisioterapia, ortopedia e centros de reabilitação, o sistema é reconhecido por sua eficiência no diagnóstico e tratamento de deformidades podais. No entanto, seu custo elevado, devido a tecnologia avançada e a complexidade do sistema, limita seu acesso a instituições especializadas, destacando a necessidade de soluções mais acessíveis, como a proposta pelo sistema Foot Inspect. Este trabalho apresenta a evolução do sistema Foot Inspect, que visa apresentar aprimoramentos da proposta, que por sua vez, visa melhorar o diagnóstico e tratamento de deformidades plantares por meio de uma solução computacional integrada e acessível.

2. Referencial Teórico

Problemas como o pé plano e o pé cavo afetam a biomecânica do corpo. O pé plano, caracterizado pela redução ou ausência do arco plantar, pode causar dores e instabilidade postural. Já o pé cavo, com arco excessivamente elevado, dificulta a absorção de impactos, levando a dores no antepé e calcanhar. Ambas as condições podem resultar em complicações como artrite e problemas na coluna [Oliveira 2015] [Ximenes and Peron 2013][Mickle 2011].



Figura 1. Exemplo de Deformidades mais Comuns

A baropodometria avalia a distribuição da pressão plantar durante a marcha, identificando áreas de sobrecarga e desequilíbrios. Realizada em plataformas de pressão ou com palmilhas sensíveis, auxilia no diagnóstico e na criação de palmilhas personalizadas para melhorar a funcionalidade do pé [Bovi 2011] [Oliveira 2015]. A informática médica e os sistemas embarcados, como microcontroladores e sensores, permitem a coleta e processamento de dados em tempo real, oferecendo soluções precisas para problemas médicos. A integração de sensores de pressão com dispositivos capazes de processar os dados, como a plataforma Arduino, ou ainda o NodeMCU ESP32, tem sido aplicada no monitoramento da pressão plantar e na análise da marcha.

2.1. Trabalhos Correlatos

O sistema Planipes [Pffaffen and Others 2011] propõe uma solução móvel para análise da pressão plantar, com aplicações clínicas (diagnóstico de pé diabético e criação de palmilhas ortopédicas) e esportivas. A arquitetura consiste em uma palmilha com 16 sensores Force Sensitive Resistors (FSR), um microcontrolador ATmega328P e comunicação Bluetooth. Os dados são processados e visualizados em um aplicativo Android, que gera

¹<https://www.rsscan.co.uk/foot-scanning-system.html>

mapas de pressão e análises de marcha. O trabalho de Howell et al [Howell et al. 2013] propõe uma solução de baixo custo para análise de marcha em pacientes em reabilitação de derrame cerebral. A palmilha é composta por 12 sensores FSR, calibrados com uma célula de carga, e utiliza comunicação wireless para envio de dados. Os resultados mostraram uma margem de erro abaixo de 10% em comparação com equipamentos comerciais, validando a eficácia da solução. Por fim, o sistema proposto por Melakessou [Melakessou and Others 2017] foca na análise em tempo real da marcha, com aplicações médicas e esportivas. A palmilha utiliza 8 sensores HD-FSR (alta sensibilidade) e técnicas de geoestatística, como a Krigagem, para processamento de dados. A solução permite a geração de mapas de pressão dinâmicos, oferecendo uma análise precisa da distribuição de peso durante a marcha.

3. Melhorias Propostas

O projeto Foot Inspect foi concebido como uma ferramenta para auxiliar no diagnóstico e tratamento de deformidades plantares. A proposta inicial consistia em um protótipo de uma palmilha com sensores de pressão conectados a plataforma Arduino, que coletava dados sobre a distribuição de pressão plantar durante a marcha. Esses dados eram armazenados em um cartão SD e, posteriormente, analisados em um software para *desktop*, resultando na criação de palmilhas personalizadas. A proposta inicial é apresentada na Figura 2, os dados após captura, eram processados e visualizados em mapas de calor usando técnicas de geoestatística, como a Krigagem.

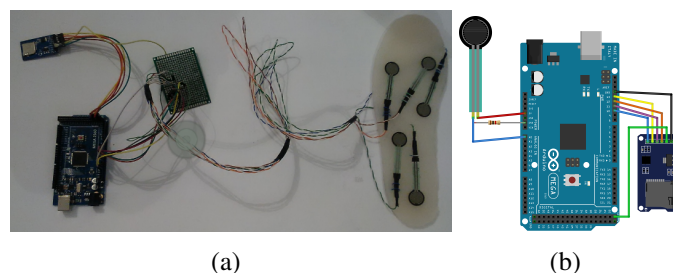


Figura 2. Proposta inicial

A primeira versão do sistema Foot Inspect apresentava limitações significativas, como a dependência de conexões físicas para transferência de dados, o que restringia a mobilidade do paciente durante a coleta. O armazenamento local em cartão SD tornava o processo manual e pouco prático, aumentando o risco de perda de dados. Além disso, a falta de comunicação sem fio dificultava a integração com outras ferramentas digitais, e a arquitetura pouco escalável complicava a adição de novas funcionalidades. A ausência de um banco de dados também impedia o armazenamento e gerenciamento eficiente dos dados coletados, limitando a capacidade de manter um histórico dos pacientes. Essas limitações motivaram o desenvolvimento de uma nova versão com melhorias como comunicação sem fio, integração com banco de dados e uma interface mais amigável.

3.1. Arquitetura modificada

A nova proposta (apresentada na Figura 3) utiliza sensores FSR embutidos em uma palmilha gerenciada por um NodeMCU ESP32, que envia os dados via Bluetooth para um computador. O sistema gera mapas de calor usando Krigagem e armazena os dados em um

banco de dados. A implementação do sistema tem o potencial de melhorar a confecção de palmilhas personalizadas, tornando o processo mais rápido e preciso. Além disso, a solução pode ser aplicada em diferentes contextos, desde a reabilitação física até a melhoria do desempenho esportivo, prevenindo lesões e otimizando a biomecânica.

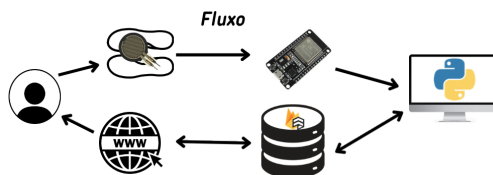


Figura 3. Proposta Refatorada

A evolução do projeto Foot Inspect introduz uma série de melhorias na arquitetura do sistema, com foco no uso de um nó sensor composto por sensores FSR (Force Sensitive Resistors) e por um NodeMCU ESP32, um aplicativo *desktop* para o processamento e envio dos dados para uma base de dados, do qual se integra a um WebApp. Essa nova arquitetura visa superar as limitações da proposta inicial, oferecendo maior precisão, mobilidade e integração com dispositivos móveis. O nó sensor é o componente central do sistema, responsável por capturar os dados de pressão plantar e transmiti-los para processamento. Ele é composto por uma palmilha de silicone na qual são embutidos os sensores FSR, estrategicamente posicionados para cobrir as principais áreas de pressão do pé, como o metatarso, o calcanhar e a região medial. Esses sensores são componentes eletrônicos que variam sua resistência elétrica conforme a força aplicada sobre eles, sendo amplamente utilizados em aplicações que requerem a medição de pressão, como na análise da marcha e na reabilitação física.

Os sensores FSR são capazes de medir forças que variam de 0 N a 445 N, cobrindo a faixa de pressão típica exercida pelo pé humano durante atividades como caminhar, correr ou ficar em pé. A escolha desses sensores se deve à sua sensibilidade, baixo custo e facilidade de integração aos microcontroladores. Além disso, eles são flexíveis e podem ser facilmente embutidos em uma palmilha de silicone, sem comprometer o conforto do paciente. O NodeMCU ESP32 é o dispositivo responsável por coletar e processar os dados dos sensores FSR. Ele substitui o Arduino utilizado na proposta inicial, oferecendo maior poder de processamento e funcionalidades de comunicação sem fio, como Wi-Fi e Bluetooth. O ESP32 é responsável por coletar os dados dos sensores FSR, processá-los e enviá-los via Bluetooth para um *back-end* no computador. Essa comunicação sem fio elimina a necessidade de conexões físicas, aumentando a praticidade e a liberdade de movimento do paciente durante a coleta de dados.

Após a coleta dos dados de pressão plantar pelo nó sensor, as informações são enviadas para um aplicativo de computador desenvolvido para processar e visualizar os dados. Esse aplicativo é responsável por receber os dados via Bluetooth, processá-los e gerar mapas de calor da pressão plantar, que são essenciais para o diagnóstico e tratamento de deformidades podais. O processamento dos dados é realizado por meio de um algoritmo de Krigagem, uma técnica de geoestatística amplamente utilizada para interpolar valores em áreas onde não há medições diretas. No contexto do projeto Foot Inspect, a Krigagem é utilizada para estimar os pontos intermediários entre as áreas de pressão captadas pelos sensores FSR, criando assim um mapa de calor contínuo e preciso da pressão

plantar. Essa técnica permite a geração de visualizações detalhadas da distribuição de pressão, identificando áreas de sobrecarga e desequilíbrios que podem ser corrigidos com o uso de palmilhas personalizadas.

O aplicativo de computador também permite a criação de animações em formato GIF, que mostram a variação da pressão plantar ao longo do tempo durante a marcha. Essas animações são úteis para os profissionais de saúde visualizarem o comportamento dinâmico da pressão plantar e ajustarem o tratamento de acordo com as necessidades do paciente. Além disso, o aplicativo integra-se a um banco de dados, onde os dados podem ser salvos, acessados e visualizados em tempo real. Essa interface permite que os profissionais de saúde acompanhem o progresso do paciente, gerem relatórios e armazenem os dados para análises futuras. A integração com uma interface Web, onde podem ser vistos os dados e GIFs da sessão, também facilita o compartilhamento de informações entre diferentes especialistas, como fisioterapeutas e ortopedistas, contribuindo para um diagnóstico mais preciso e um tratamento mais eficaz.

4. Resultados e Discussão

Foram executadas diversas etapas cruciais para o desenvolvimento e aprimoramento do sistema Foot Inspect. Uma das principais conquistas foi a implementação da comunicação entre o NodeMCU ESP32 e um computador via Bluetooth. Essa comunicação sem fio permite que os dados coletados pelos sensores de pressão sejam transmitidos em tempo real para o computador, onde são processados e visualizados. Atualmente, já é possível visualizar o mapa de calor gerado a partir dos dados de pressão como apresenta a Figura 4. Entretanto, nesta fase inicial, foi priorizado a utilização de valores de pressão aleatórios para realizar o teste da funcionalidade de comunicação do sistema.

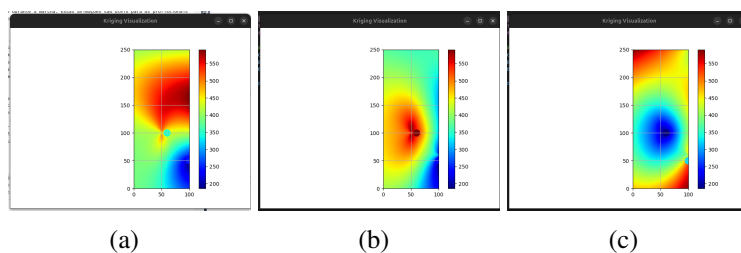


Figura 4. Mapas de Calor Gerados a partir dos Dados de Pressão

A calibração dos sensores é uma etapa crítica para garantir a precisão das medições. Diferentes métodos estão sendo testados para calibração, utilizando pesos conhecidos para ajustar a resposta dos sensores FSR. Além da calibração pretende-se considerar métricas de erro, como por exemplo, Root Mean Square Error com o objetivo de mensurar a precisão dos sensores. Esse processo é essencial para garantir que os dados coletados reflitam com exatidão a pressão exercida pelo pé durante a marcha. Outro avanço significativo foi a integração da base de dados ao aplicativo desktop e a interface WebApp. A base de dados armazena todas as informações coletadas pelos sensores, permitindo que os profissionais de saúde acessem os dados históricos do paciente.

Apesar dos avanços alcançados, a solução ainda necessita de aprimoramentos antes de ser submetida aos testes iniciais com pacientes reais. Embora tenhamos realizado

progressos nessa área, ainda estamos trabalhando para garantir que os sensores respondam de forma consistente e precisa a diferentes níveis de pressão. Além disso, estamos aprimorando a interface Web para torná-la mais amigável e funcional, com foco na usabilidade para os profissionais de saúde.

5. Conclusões

Os resultados preliminares indicam que o sistema Foot Inspect está no caminho certo para se tornar uma ferramenta eficaz no diagnóstico e tratamento de deformidades plantares. A comunicação sem fio entre o NodeMCU ESP32 e o computador, aliada à geração de mapas de calor em tempo real, representa um avanço significativo em relação à proposta inicial do projeto. A integração com a base de dados e a interface Web também demonstra o potencial do sistema para facilitar o acompanhamento do paciente e a colaboração entre diferentes profissionais de saúde. No entanto, é importante destacar que a ferramenta ainda necessita de aprimoramentos para oferecer uma experiência mais fluida e intuitiva aos usuários, especialmente para aqueles sem conhecimentos técnicos na área de tecnologia. Apesar desses desafios, acreditamos que o sistema Foot Inspect tem o potencial de aprimorar significativamente o processo de diagnóstico e tratamento de deformidades plantares, oferecendo uma solução mais precisa, personalizada e eficiente. A capacidade de gerar mapas de calor em tempo real, aliada à integração com dispositivos móveis e à comunicação sem fio, representa um avanço importante em relação aos métodos tradicionais de análise da pressão plantar. A próxima etapa do projeto envolverá a realização de testes práticos em laboratório, além de a integração de algumas métricas. Essa fase de testes práticos e clínicos é crucial para garantir que o sistema Foot Inspect atenda às expectativas dos profissionais de saúde e dos pacientes, oferecendo uma ferramenta confiável e de fácil utilização para o diagnóstico e tratamento de deformidades plantares.

Referências

- Bovi, G. (2011). *A multiple-task gait analysis approach: Kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects*.
- Howell, A. M., Kobayashi, T., Hayes, H. A., Foreman, K. B., and Bamberg, S. J. M. (2013). A low-cost insole-based system for gait analysis in stroke rehabilitation. *Journal of Rehabilitation Research & Development*.
- Melakessou, F. and Others (2017). Real-time gait analysis using a smart insole with hdfs sensors. In *Proceedings of the International Conference on Biomedical Electronics and Devices*.
- Mickle, K. J. (2011). Gait, balance and plantar pressures in older people with toe deformities, gait and posture. *Gait & Posture*.
- Oliveira, M. S. (2015). *Sistema de aquisição de sinais de pressão plantar com base em matriz de sensores*.
- Pfaffen, S. and Others (2011). Planipes: A mobile system for plantar pressure analysis. In *Proceedings of the International Conference on Biomedical Engineering*.
- Ximenes, M. and Peron, G. (2013). Implementação e avaliação de uma palmilha de látex com sistema de sensores para investigação da distribuição de pressão plantar em indivíduos autistas. In *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*.