

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



Microlocalização Humana com Sensores de Vibração

ORIENTADOR: JUN OKAMOTO JR.

AUTOR: ALEXANDER CSÓKA ROQUE

São Paulo, 2015

ALEXANDER CSÓKA ROQUE

Número USP: 7210192

Microlocalização Humana com Sensores de Vibração

Monografia apresentada no Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Engenheiro.

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica

Orientador: Jun Okamoto Jr.

Este relatório é apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É o produto do meu próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. O relatório pode ser livremente copiado e distribuído desde que a fonte seja citada.

Assinatura: _____

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, pelo incessante incentivo e apoio

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Jun Okamoto Jr., pela orientação, por insitigar minha curiosidade científica e por todo o conhecimento que me passou ao longo dos últimos anos.

Ao Prof. Dr. Rafael Traldi Moura, por toda a ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Politrônicos pelas trocas de ideias e pelo apoio ao longo de todo o caminho.

Aos que me ajudaram diretamente em validar o sistema, obrigado por todos os passos dados. Cada passo me trouxe mais perto de uma conclusão.

A minha família, pelo apoio incessante e inquebrável ao longo de tantos anos.

Resumo

Microlocalização humana é o processo de adquirir coordenadas que indiquem a posição de uma pessoa com precisão de metros ou centímetros. São usadas diversas tecnologias para fazer microlocalização em ambientes internos como Wi-Fi, Radio de Banda Ultralarga e câmeras, porém essas apresentam custo elevado, são de difícil instalação ou requerem que o usuário carregue algum dispositivo consigo.

Este projeto propõe um método de microlocalização em ambientes internos utilizando sensores de vibração de baixo custo a fim de evitar os problemas mencionados. Uma pessoa, ao andar em uma sala, gera vibrações mensuráveis a cada passo. Os sensores de vibração junto de um circuito de tratamento de sinal adquirem a vibração em diferentes pontos da sala e informam um microprocessador no momento em que detectarem um passo.

O microprocessador adquire os tempos em que cada sensor detecta um passo e executa um algoritmo que compara esses tempos com um mapeamento de tempos feito previamente para achar a origem do passo. O algoritmo requer baixo poder computacional e portanto pode indicar a posição de um passo em tempo real. Detectando os passos de uma pessoa é possível detectar sua posição e a sua trajetória. O algoritmo também aplica um modelo de uma pessoa caminhando para detectar pontos que formem uma trajetória mais realista e assim melhorar a precisão de microlocalização do sistema.

O sistema foi aplicado em um ambiente real e foi capaz de detectar com sucesso a posição de uma pessoa andando.

Palavras-chave: Microlocalização. Vibração. Piezo elemento. Tempo de Chegada. Mapeamento. Tempo real. Detecção de passos.

Abstract

Human microlocation is the process of acquiring coordinates that indicates a person's position with precision of metres or centimetres. Several technologies are used to do indoor microlocation such as Wi-Fi, Ultra-wideband Radio and video cameras, but these are costly, hard to install and require the user to carry a device with him.

This project proposes a microlocation method using low cost vibration sensors to avoid these problems. When a person walks in a room, every step generates measurable vibration. The vibration sensors acquire the vibration in different positions in a room and send signal through a signal treatment hardware to a microprocessor to inform the moment when a footstep is detected.

The microprocessor acquires the times in which each sensor detects a footstep and runs an algorithm that compares these times with a previously acquired fingerprint of time signals to find the origin of the footstep. The algorithm requires a low processing time and therefore can detect footsteps and perform microlocation in real time. It's possible to acquire a person's position and trajectory by detecting that person's footsteps. The algorithm also applies a human model to the system to improve detection and result in a more real trajectory and positioning.

The system was implemented in a real indoor space, and proved succesful in detecting a person's position.

Keywords: Microlocation. Vibration. Piezo element. Time of Arrival. Fingerprinting. Real Time. Footstep detection.

Sumário

1	Introdução	10
2	Tecnologias em Microlocalização	11
3	Solução Proposta	13
3.1	Necessidade dos Usuários	13
3.2	Características do Sistema	14
3.3	Limitações	15
3.4	Custos	15
4	Sensor de Vibração	16
4.1	Elemento Sensor	17
4.1.1	Elemento Piezoelétrico	18
4.1.2	Massa	18
4.1.3	Suporte de Massa	18
4.1.4	Acoplamento Sensor-Chão	19
4.1.5	Sensor Final	20
5	Hardware de Tratamento de Sinal	20
5.1	Esquemático do Circuito	21
5.1.1	Diodo de Corte	22
5.1.2	Amplificador de Carga	22
5.1.3	Comparador	22
5.1.4	Monoestável	22
6	Central de Processamento e Algoritmo de Microlocalização	23
6.1	Medição dos Tempos de Chegada	24
6.2	Métodos de Estimativa de Posição de Passo Detectado	24
6.3	Método de Mapeamento com Modelo Humano	24
6.3.1	Mapeamento de Diferenças de Tempos	24
6.3.2	Método de Detecção por Mapeamento	26
6.3.3	Regionalização	26
6.3.4	Aplicação de Pesos aos Pontos	27
6.3.5	Modelo de Limite de Velocidade	28
6.3.6	Modelo de Limite de Rotação	29
6.3.7	Software da Central de Processamento	29

7	Experimentos	31
7.1	Sala de Testes	31
7.1.1	Características Vibratórias do Ambiente	31
7.1.2	Posição dos Sensores	33
7.2	Características das Medidas de Tempos de Detecção de Vibração	35
7.2.1	Velocidade de Propagação da Vibração Variável	35
7.2.2	Dissipação das Vibrações de um Passo	35
7.3	Experimentos para Definição de Características do Sensor	35
7.3.1	Definição da Massa	36
7.3.2	Definição do Acoplamento Sensor-Chão	36
8	Resultados	38
8.1	Influência de Método e Sensores	39
8.1.1	Evolução do Algoritmo de Microlocalização	39
8.1.2	Diferença do Número de Sensores	40
8.2	Influência da Pessoa Detectada	41
8.2.1	Diferença de Pesos	41
8.2.2	Diferença de Calçados	42
8.2.3	Diferença de Velocidade de Caminhar	43
8.3	Medições em Tempo Real	44
8.4	Erros de Detecção	44
9	Conclusão	45
	Referências	46

1 Introdução

Microlocalização é o processo de localizar algum objeto com precisão de metros até centímetros como define Zafari et al. (2015). Esse ainda é um grande problema dentro do tema de ambientes inteligentes, amplamente desenvolvidos ultimamente, nos quais são aplicados diversos sistemas de sensoramento para controlá-los de uma maneira inteligente. Esses ambientes têm objetivos diversos, como manter temperatura e umidade constantes para proteção de livros delicados, fazer controle de iluminação para maior conforto dos seus usuários, dentre outros. O Institute for Building Efficiency (2011) discute a ideia semelhante de construções inteligentes que transcendem suas funções básicas para conseguirem otimizar seu desempenho e criar uma interação com seus usuários através de sensores inteligentes e conectividade. Dentro desse tema, detectar a posição de uma pessoa num espaço bidimensional torna-se uma ferramenta poderosa.

Algumas soluções para a microlocalização já existem, porém estas apresentam custo elevado e/ou são invasivas, muitas vezes sendo necessária alguma ação do usuário detectado ou que esse use algum equipamento especializado. Muitas tecnologias tentam aproveitar equipamentos já difundidos na sociedade como smartphones e roteadores para fazer microlocalização por Wi-Fi de custo aparente reduzido, porém há sempre a necessidade da pessoa detectada de carregar um celular. Outros métodos como os que usam câmeras fazem microlocalização não invasiva, porém necessitam de alto poder computacional para fazer tratamento de imagens.

A abordagem desse projeto é uma solução inovadora e de baixo custo para microlocalização humana que seja facilmente implementada em qualquer ambiente interno e que não necessite da colaboração da pessoa sendo detectada. Existe então uma oportunidade nesta área para desenvolvimento de nova tecnologia, dentro de um tema atual e de grande interesse social devido aos benefícios que esses ambientes podem trazer para a sociedade. Como existe uma experiência do aluno com sensores de vibração piezoelétricos devido a trabalho anterior na disciplina do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica 0303410 – "Desenvolvimento Integrado de Produtos"¹, foi proposta uma solução inovadora usando esse tipo de sensor. Alternativamente acelerômetros poderiam ser usados, embora estes sejam em geral mais caros que simples elementos piezoelétricos.

O objetivo primário é fazer a detecção dos passos de uma pessoa dentro de uma sala medindo as vibrações geradas pelos seus passos em pelo menos três pontos de medição, cada um com um sensor de vibração piezoelétrico. Um hardware será implementado para cada sensor, fazendo um tratamento de sinal que elimina ruídos e isola somente a informação de interesse. Um microprocessador usa essa informação para encontrar a posição da fonte de vibração através de algoritmos de análise de sinais e a envie a um usuário, podendo esse ser humano ou não.

Materiais piezoelétricos geram uma pequena tensão elétrica quando são deformados. A deformação no material será decorrente da vibração do chão em contato com uma das faces do material, enquanto a outra face estará pressionada por uma massa dimensionada. Discos piezoelétricos de PZT (Titanato Zirconato de

¹O trabalho recebeu o Prêmio Odebrecht de Sustentabilidade em 2014

Chumbo) e latão (Figura 4) são usados por ser o piezo elemento mais comum no mercado, por apresentarem baixo custo e serem eficientes para esse tipo de medida.

São feitos experimentos com sensores piezoelétricos acoplados ao chão, com objetivo de estudar as vibrações do ambiente e melhorar o sistema de medição. Esses experimentos são vitais para entender o tipo de sinal analisado e decidir o tipo de tratamento de sinal que se deve fazer.

Pela tensão gerada pelo piezo elemento ser pequena, é necessário desenvolver um hardware eletrônico que amplifique a carga gerada e filtre o sinal resultante para que este seja mensurável. Um microprocessador comum é capaz de tanto fazer a medição desse sinal quanto executar algoritmos para definir a posição dos passos detectados e enviar a um usuário.

O algoritmo usado baseia-se em um mapeamento de sinais feito na sala. Com pelo menos três sensores posicionados na sala, é feita uma série de medições de passos em posições conhecidas, e cria-se assim uma tabela de referência de sinais para essas posições. Quando o algoritmo é executado, ele usa as informações dessa tabela para comparar com os sinais que o microprocessador adquiriu com os sensores e assim localizar a posição da fonte de vibração

Como resultado teremos um produto de baixo custo capaz de realizar microlocalização humana não invasiva através de sensores de vibração com precisão semelhante a de sistemas de microlocalização usados hoje em dia.

2 Tecnologias em Microlocalização

O estado da arte na solução do problema de microlocalização humana está separado em algumas soluções, Zafari et al. (2015) e Teixeira et al. (2010) fazem um estudo dessas. GPS (Global Positioning System) é o sensor comumente usado em ambientes externos por sua facilidade de uso, custo e eficiência (até 10m de erro podendo ser aplicados algoritmos para aumentar precisão), porém sua ineficiência em ambientes internos nos leva a procurar outras soluções. A Apple introduziu em 2013 o iBeacon (Apple, 2014) que é uma das tecnologias mais recentes na área de microlocalização. O iBeacon usa tecnologia de Bluetooth Smart, também chamado de Bluetooth Low Energy (BLE) (Bluetooth®, 2015), e é usado de maneira a definir o grau de proximidade de um equipamento a um beacon, entre imediatamente perto (0-1 metro do beacon), próximo (1-3 metros), longe (até dezenas de metros dependendo da posição do beacon e de seu entorno) ou desconhecido, quando o equipamento não encontra o beacon. Ou seja, não obtém-se uma distância precisa, mas uma proximidade. Essa informação, embora limitada, é suficientemente útil para diversas aplicações.

Radio de Banda Ultralarga (UWB) é uma tecnologia complexa capaz de, através da comunicação entre um dispositivo móvel e um grupo de nós de um dispositivo fixo, alcançar uma precisão de localização de até 10cm (Zafari et al., 2015). A comunicação chega até 10 metros com alta taxa de comunicação (Foerster et al., 2001). Wi-Fi é usado em microlocalização através de triangulação de pontos de acesso ou mapeamento de nível de sinal Wi-Fi, sendo uma tecnologia interessante uma vez que Wi-Fi é utilizado em larga escala

para criar acesso à internet sem fios. Thummalapalli (2012) chegou a atingir precisão de até 2 metros em ambientes internos com esta tecnologia usando um algoritmo de Previsão de Movimento de Usuário e o método de mapeamento. Henken (2014) discute diversos métodos de localização usando celulares em ambientes fechados, sendo a maioria deles usando Wi-Fi. Alguns métodos usam ainda os outros sensores presentes nos celulares para poder fazer um mapeamento em tempo real da sala, conseguindo assim alta precisão sem precisar fazer mapeamento prévio. Uma tecnologia inovadora é usada pela empresa IndoorAtlas desde 2012 que usa o sensor magnético dos celulares e anomalias geradas no campo magnético terrestre dentro de prédios para alcançar precisões de microlocalização entre 10cm e 2 metros. Essa tecnologia necessita o mapeamento prévio das anomalias magnéticas do ambiente a ser detectado.

Essas são todas soluções que requerem que o usuário carregue consigo um dispositivo, sendo o sistema na verdade um localizador deste dispositivo, e assume-se que a posição dele é a mesma do usuário. Requerem portanto participação do usuário. Porém Teixeira et al. (2010) faz uma discussão completa de soluções capazes de detectar humanos sem que esses necessitem participar no processo. Algumas dessas são: sensores de pressão como pisos com sensores piezoelétricos que percebem um humano pisando em cima do sensor, câmeras que conseguem detectar o formato de um humano em sua filmagem, radares que fazem o mesmo emitindo sinais e analisando o retorno deles, sensores térmicos que captam a radiação de calor humano sendo capazes de criar imagens térmicas onde é fácil detectar humanos. Esses equipamentos são em geral caros, embora existam alguns de baixa resolução com preços menores sendo muito úteis para microlocalização. Quimiossensores podem detectar o cheiro de humanos, e até sensores de níveis de CO_2 já foram usados para detecção humana. Escâneres que usam ondas eletromagnéticas (radar), sonoras (Sonar) e radiação (Laser) na microlocalização são mais efetivos em alvos parados. Uma alternativa efetiva é o uso de tomografia, que garante alta precisão porém apresenta um alto custo de infraestrutura de sensores. Esses todos medem características estáticas humanas, sem ser necessária atividade humana.

Para detectar a atividade humana podem ser usados sensores de características dinâmicas, como microfones para medir som produzido por humanos ou sensores piroelétricos como foi proposto por Shankar et al. (2006), para medir variação de fluxo de calor conseguindo assim distinguir um humano andando em uma sala. Sensores de campo elétrico conseguem detectar um humano bloqueando uma fonte de campo elétrico. Sensores de efeito Doppler conseguem detectar a mudança na frequência de ondas enviadas devido ao movimento de um humano, conseguindo boas medidas de velocidade de movimento.

Leusmann et al. (2011); Rodríguez et al. (2008, 2010) discutem o uso de pisos sensores de pressão usando sensores piezoelétricos. Leusmann et al. (2011) tem o direcionamento de além de fazer a microlocalização fazer a detecção de quedas de humanos, com foco no auxílio a idosos, sendo as quedas no chão a principal causa de acidentes dentre idosos. Para isso é necessário a instalação de um piso repleto de sensores. O sistema atingiu uma taxa de sucesso em detecção de passos de 72% em média. Rodríguez et al. (2008, 2010) tem a intenção porém de detectar passos de um grande número de pessoas e de fazer uma verificação biométrica do passo de cada pessoa, conseguindo não só detectar a posição da pessoa mas que pessoa é aquela.

Em Mazarakis and Avaritsiotis (2005) temos uma patente de sensor de presença humana com detecção em uma área aproximada de raio de até 35 metros em torno do sensor, que foi desenvolvido para funcionar até em superfícies de terra, sendo o teste feito em terra com grama. Esse mostra maneiras de como melhorar a eficiência de sensores piezoelétricos conseguindo uma detecção de distâncias grandes aproveitando a maneabilidade da frequência natural do sensor.

Kessler and Raghavan (2008) propõe um sistema de microlocalização de danos em estruturas usando piezo elemento através de triangulação co-localizada. Essa maneira de fazer triangulação usa 4 sensores que são posicionados próximos um dos outros, sendo que o ponto a ser encontrado não precisa estar na área entre os sensores, mas pode estar fora. Dessa maneira pode-se trabalhar com uma unidade sensora ao invés de diversos sensores que devem ser posicionados distantes um dos outros, facilitando implementação do sistema em diversos ambientes. Mesmo fazendo triangulação dessa maneira os autores conseguem precisão alta em suas medições.

3 Solução Proposta

A solução proposta é um sistema de microlocalização que faz uso de pelo menos três sensores de vibração espalhados em uma sala para detecção dos passos de uma pessoa. Um microprocessador é usado para adquirir tempos de chegada das vibrações em cada sensor e executar um algoritmo para localizar a origem desse passo e portanto de uma pessoa.

Pode-se notar que embora muitos caminhos para solucionar o problema da microlocalização humana já tenham sido desenvolvidos, o método selecionado não foi ainda estudado sendo uma ideia original com grande potencial. Essa solução foi pensada considerando as necessidades dos usuários de um sistema de microlocalização.

3.1 Necessidade dos Usuários

Para definir uma solução para o problema de microlocalização humana é necessário considerar cada usuário e suas necessidades. A seguir são apontados os diferentes usuários e suas necessidades:

Pessoa que anda por um ambiente inteligente e tem seus passos detectados

Caso a microlocalização seja usada para sistemas de segurança, por exemplo um sistema que avise pessoas entrando em áreas perigosas em estações de metrô, é necessário para o usuário que a detecção seja rápida para fazer um aviso ao usuário em tempo real.

No caso de um ambiente inteligente que deve aumentar o conforto do usuário, por exemplo um sistema de controle de iluminação que ilumine apenas onde a pessoa está, ou um sistema que atenda a idosos, é necessário que o sistema seja pouco invasivo ao usuário no sentido de não necessitar esforços do usuário. Um

problema recorrente por parte dos idosos é de esquecerem de carregar consigo dispositivos de microlocalização para sua segurança, então um sistema não invasivo é necessário para estes usuários.

Proprietário do ambiente que usa o sistema de microlocalização

Para este usuário é necessário que o sistema de microlocalização seja de baixo custo e fácil instalação. Sistemas muito caros são indesejados por este usuário e sistemas como os de Leusmann et al. (2011); Rodríguez et al. (2008, 2010) são de difícil instalação, se tornando inconcebível dependendo do sistema.

Para suprir as necessidades de todos os usuários então é necessário um sistema não invasivo, que trabalhe e tempo real, tenha capacidade de armazenar informações, tenha baixo custo e seja de fácil instalação.

3.2 Características do Sistema

Não invasivo

Com o objetivo principal de criar um sistema não invasivo foram usados sensores de vibração para extrair as informações necessárias para fazer a microlocalização. Humanos geram vibrações em sua locomoção e portanto não é necessário nenhum esforço adicional para informar o sistema de sua localização nem carregar nenhum dispositivo consigo.

Rápido

Como apenas os tempos de detecção de cada sensor são usados como informação e o algoritmo necessita baixo poder computacional. Qualquer microprocessador comum consegue fazer a detecção e os cálculos necessários para executar o algoritmo em tempo real.

Baixo Custo

Foi desenvolvido um sensor usando matéria prima barata e métodos produtivos simples, reduzindo o preço do sensor. Como o poder computacional é baixo, microprocessadores de baixo custo podem ser usados para executar o algoritmo, resultando então em um sistema de baixo custo.

Fácil Instalação

Diferente dos sistemas que usam sensores piezoelétricos apresentados por Leusmann et al. (2011); Rodríguez et al. (2008, 2010) os sensores desenvolvidos não estão presos ao chão, são apenas peças que são posicionadas sobre o chão, sem interferir com a sala onde será instalado o sistema. Os sensores podem ser colocados e removidos facilmente de uma sala.

3.3 Limitações

Devido ao uso de sensores de vibrações o sistema tem algumas limitações. A maior é o fato do sistema poder detectar no máximo apenas uma pessoa por vez. Em uma sala onde tem mais de uma pessoa andando, as vibrações se misturam e atrapalham a detecção.

Também existem ambientes ruidosos como chão de fábricas, lugares muito próximos a avenidas com grande fluxo de carros e prédios com grande fluxo de pessoas onde o ruído pode ser grande o suficiente para esconder vibrações geradas por passos de pessoas, impedindo a detecção.

3.4 Custos

O sistema foi criado para ser de baixo custo. A lista a seguir mostra os custos para cada parte do sistema. Os valores apresentados são todos unitários e obtidos no segundo semestre de 2015:

- 4x Sensores de Vibração
 - Elemento piezoelétrico - R\$0,60
 - Peças impressas 3D e Massa- R\$3,40
 - Fonte de alimentação e cabo de alimentação- R\$12,50
 - Circuito de tratamento de sinal - R\$12,00
 - Par trançado 10m - R\$3,50
- Placa FEZPanda II - R\$180,00 (preço de 2014 quando foi comprada)

Cada sensor custa então em torno de R\$32 reais, tornando o custo total do sistema R\$308 reais com 4 sensores. A central de processamento que tem o valor mais significante de todos foi escolhida por estar disponível para testes, porém o sistema poderia ser feito com um microprocessador mais barato. Uma placa de desenvolvimento como Arduino Nano, que custa em torno de R\$30,00, poderia ser usada em uma versão de mais baixo custo, em torno de R\$158,00.

4 Sensor de Vibração

Medições de vibrações do chão são repletas de ruídos. Em chãos de construções comuns estes ruídos são inevitáveis por conta da rigidez das estruturas que as constituem. Estas causam uma grande repercussão de vibrações na estrutura. Um impacto em uma parte da construção causa vibrações em outra parte dela, mesmo que estas sejam muito longe uma da outra. Portanto uma sala como a do laboratório de testes recebe ruídos de uma variedade de fontes, sendo de pessoas andando na sala ao lado, de portas batendo no corredor, das máquinas trabalhando na oficina um andar abaixo ou até de carros se movendo na rua mais próxima. O sistema projetado precisa funcionar mesmo em um ambiente ruidoso como o da Figura 1.

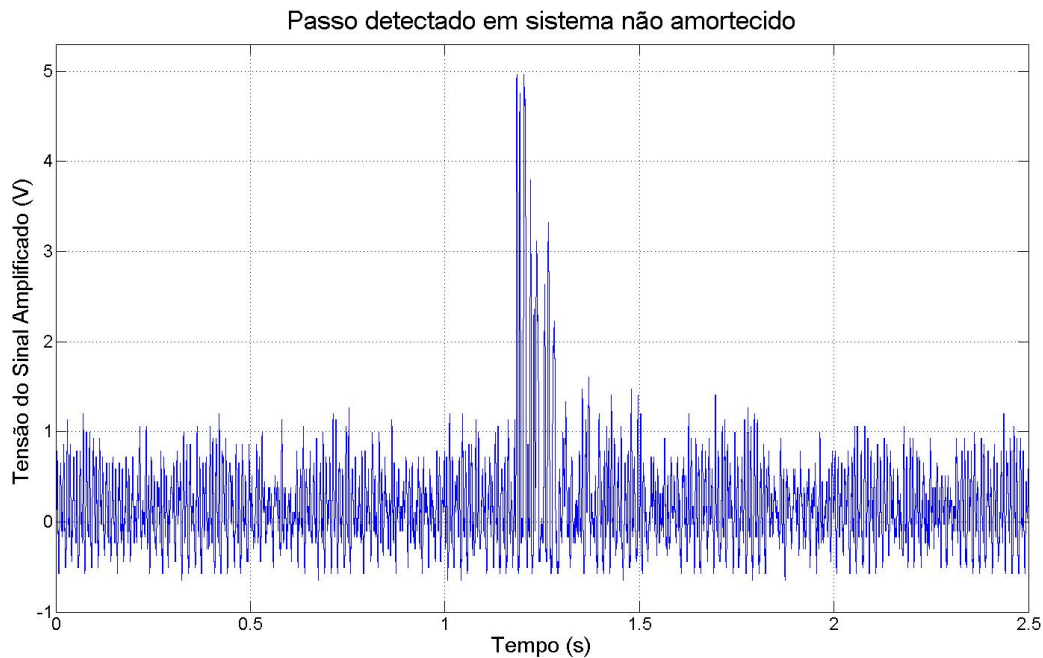


Figura 1: Vibrações de um passo em meio ao ruído medidos pelo sensor projetado

Grande parte desses ruídos são originários de impactos feitos no chão, como passos de pessoas, carros passando por cima de buracos e batidas de martelo em uma construção ocorrendo no prédio. Impactos em estruturas incitam vibrações em suas frequências naturais, logo o ruído medido no chão será nessas frequências. Como um passo de uma pessoa pode também ser considerado um impacto no chão, o sinal que o sistema deve medir tem a mesma frequência que o ruído. Isso é mostrado na Figura 2. Por isto não é possível eliminar o ruído por filtros de frequência, uma vez que o sinal que deve ser medido seria eliminado também.

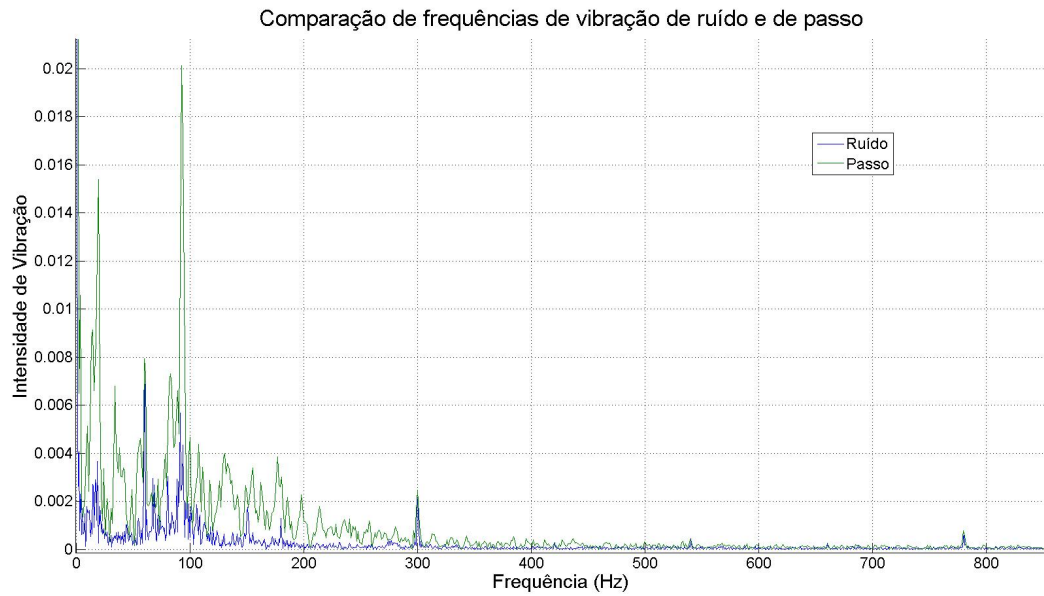


Figura 2: Transformada de Fourier de ruído e de um passo

Logo, neste ambiente não é possível usar as técnicas demonstradas por Mazarakis and Avaritsiotis (2005) para aumento de sensibilidade. Outras técnicas de eliminação de ruído e aumento de sensibilidade foram usadas e serão apresentadas nas próximas seções. As seções a seguir explicam o sensor projetado e as características importantes do chão onde ocorre a detecção.

4.1 Elemento Sensor

Com os requisitos de projeto em mente, foi desenvolvido o seguinte sensor:

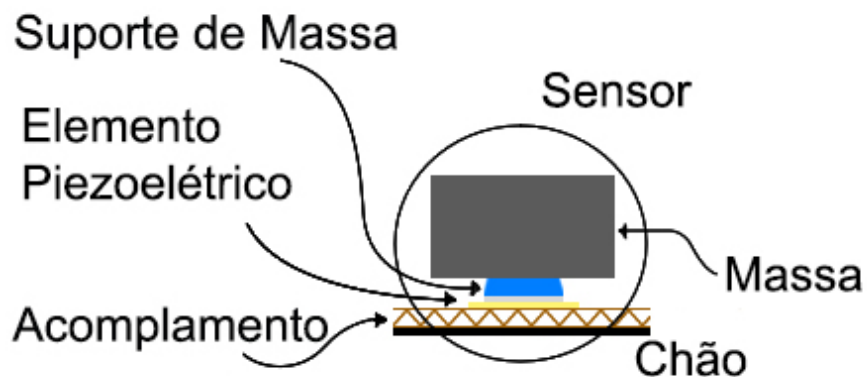


Figura 3: Elemento sensor

4.1.1 Elemento Piezoelétrico

Elementos piezoelétricos são materiais capazes de gerar uma tensão elétrica decorrente de sua deformação ou gerar uma deformação decorrente da aplicação de uma tensão elétrica. Esses materiais são em geral cristais ou cerâmicas, porém com avanço tecnológico já foram sintetizados outros tipos de materiais com esta propriedade. Estes são usados em geração de ondas mecânicas (Buzzers, motores ultrassônicos, micro bombas), micro posicionamento (atuação em até nanômetros), captação de ondas mecânicas (microfones, acelerômetros, sensores de impacto) e geração de energia (geradores de energia por pressão humana em chão de baladas, em esteiras de academias, de impactos de gotas de chuva). Diferentes elementos têm diferentes polarizações para ter maior sensibilidade em diferentes deformações, ou seja, o elemento pode ser feito para ter apenas sensibilidade às deformações desejadas.

Foi usado um disco piezoelétrico de PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) e latão (Figura 4) pela facilidade de encontrar esse elemento em lojas de componentes, pelo seu preço baixo e pela maneira como são polarizados, tendo sensibilidade na compressão. Para utilização é necessário somente soldar um terminal ao latão e um terminal à cerâmica.



Figura 4: Disco piezoelétrico de PZT e latão

4.1.2 Massa

Para que as vibrações vindas do chão se tornem deformações no elemento piezoelétrico é necessário adicionar uma massa acima do elemento. Esta adicionará inércia à face superior do sensor, sendo a face inferior deslocada junto com a vibração, criando assim uma deformação que seria desprezível sem esta massa adicional. Esta massa foi definida experimentalmente da maneira descrita na seção 7.3.1.

4.1.3 Suporte de Massa

Para medir a tensão elétrica do elemento piezoelétrico é necessário soldar um par de fios a ele, um fio ao estranho e outro à cerâmica. Por isso o disco da Figura 4 não terá uma superfície inteiramente lisa por conta da gota de solda que ficará acima dela. Ao posicionar uma massa acima do sensor, a massa somente pressionaria a área de cerâmica abaixo da gota de solda, perdendo capacidade do elemento de gerar tensão.

Portanto foi desenvolvido um suporte que evita esta gota de solda, ampliando a área de contato entre

a massa e o sensor. Este suporte foi produzido usando uma impressora 3D de plástico ABS. Foi feito sólido para evitar amortecimentos elevados entre a face superior do sensor e a massa. A Figura 5 mostra um modelo do suporte e a Figura 6 mostra o suporte na sua montagem final no sensor.

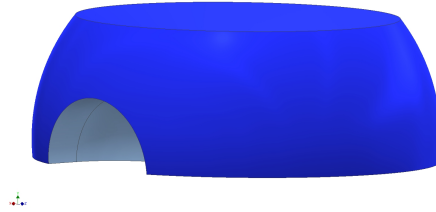


Figura 5: Suporte de massa

4.1.4 Acoplamento Sensor-Chão

Para reduzir o ruído vibratório e para amplificar o sinal recebido, pode-se criar um acoplamento eficaz entre o chão e o elemento piezoelétrico. Colocando apenas o sensor em direto contato com o chão cria-se uma interface muito rígida, que acaba recebendo todo o ruído vindo das vibrações do chão. Portanto, um acoplamento que reduza a rigidez da interface sensor-chão consegue reduzir o ruído. Além disso, sendo esta interface uma estrutura capaz de amplificar o impulso vibratório do passo de uma pessoa, a sensibilidade do sensor aumenta.

Este acoplamento também tem a capacidade de mudar o tempo de assentamento do sinal. O tempo de assentamento de sinal indica a frequência máxima de passos que um sensor consegue detectar, sendo desejado que este seja baixo para ter maior frequência de detecção. Em geral, com aumento da sensibilidade ocorre o aumento do tempo de resposta. Logo é necessário encontrar um meio termo entre alta sensibilidade e baixo tempo de assentamento.

Para definir este acoplamento foram feitos testes com diversos materiais. Medindo os sinais do sensor através de um amplificador de tensão (seção 5.1.2) com um osciloscópio foi possível analisar diferentes materiais. Borracha resultou em um amortecimento alto suficiente para cortar toda a sensibilidade do sensor, enquanto uma chapa de alumínio e uma de fibra de vidro se mostraram muito rígidas. Os materiais que deram bons resultados, fazendo um amortecimento suave sem interferir no sinal recebido foi papelão e plástico ABS impresso 3D.

Papelão ondulado, usado em caixas de papelão, é uma estrutura de rigidez reduzida que foi capaz de garantir um sinal ao mesmo tempo bastante sensível mas com ruído suficientemente amortecido para garantir uma boa leitura do momento em que ocorre um passo. Estruturas com plástico 3D conseguiram garantir também boas leituras. A seção 7.3.2 demonstra a definição experimental do acoplamento escolhido. A figura 17 mostra os acoplamentos testados.

4.1.5 Sensor Final

Após testes feitos e escolhas de materiais, a figura a seguir mostra o sensor desenvolvido. Ele tem cerca de *6cm* de altura:



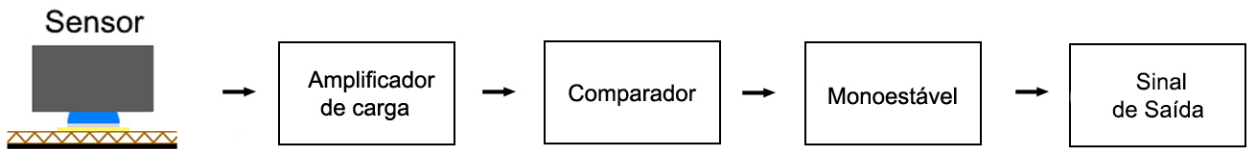
Figura 6: Sensor desenvolvido

5 Hardware de Tratamento de Sinal

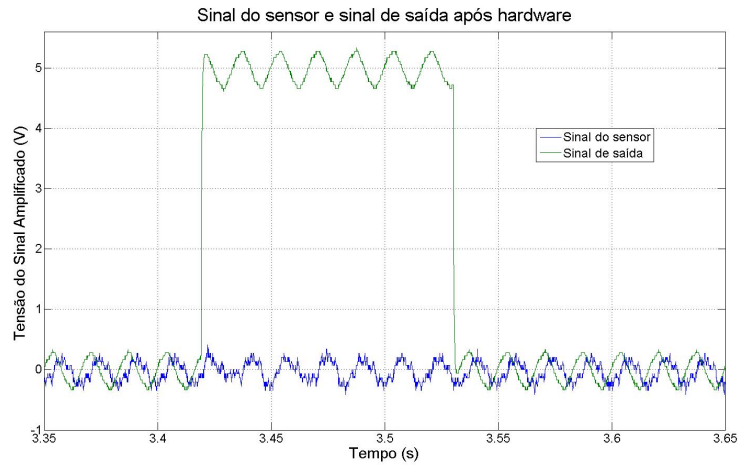
A tensão gerada pelo piezo elemento é muito baixa para ser medida por um microcontrolador diretamente, então é necessário fazer uma eletrônica de tratamento de sinal entre o sensor e o microcontrolador. O hardware recebe o sinal do piezo elemento por um curto par trançado e envia o sinal de saída ao microprocessador por um longo par trançado. O hardware é definido a partir do sinal de entrada dele e o sinal de saída desejado.

O sinal de entrada é um sinal ruidoso de baixa tensão, onde ocorre um pico de tensão no momento de detecção de um passo, que aos poucos é amortecido voltando então a ser somente ruído. O sinal de saída desejado deve apenas ter um pico de tensão no instante em o sinal de entrada recebe o seu pico, para assim extrair os tempos de chegada das vibrações nos sensores. Depois deve manter o sinal alto pelo tempo de assentamento das vibrações para evitar que um passo envie dois picos de tensão distintos, fazendo com que o microprocessador contabilize dois passos onde ocorreu somente um.

A eletrônica deve usar elementos de resposta rápida para não ter atrasos no sinal. A Figura 7 mostra um diagrama com as etapas do hardware no tratamento de sinal e uma imagem do sinal de entrada comparado com o de saída obtido no sensor.



(a) Diagrama do hardware implementado



(b) Sinal do sensor e sinal de saída após hardware

Figura 7: Sinal de entrada e de saída desejado

É importante notar que o sinal do sensor é tão pequeno que o ruído de 60Hz da rede elétrica no sistema de medição é suficiente para esconder o sinal.

5.1 Esquemático do Circuito

Com o objetivo claro, foi desenvolvido o seguinte circuito para tratamento de sinal:

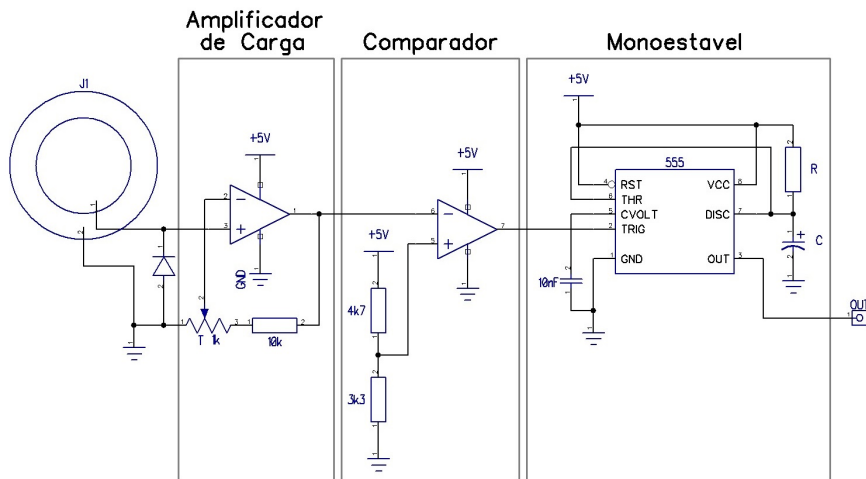


Figura 8: Circuito de hardware de tratamento de sinal

5.1.1 Diodo de Corte

Inicialmente se corta todo sinal de tensão negativa vinda do piezo elemento com um diodo. Isto é feito para eliminar tensões negativas geradas pelo piezo elemento.

5.1.2 Amplificador de Carga

O primeiro Amplificador Operacional do circuito na figura 8 funciona como um amplificador de carga de ganho variável quando junto do trimpot T. Este trimpot deve ser de multivoltas para garantir uma possibilidade de ajuste fino do ganho do amplificador. É necessário colocar um amplificador de carga nesta parte do circuito para que os níveis de tensões sejam mensuráveis pelo microcontrolador usado.

O ajuste do trimpot é feito para manter o sinal o mais amplificado possível de uma maneira que o ruído não ultrapasse a tensão de comparação do Comparador.

5.1.3 Comparador

O sinal amplificado passa por um comparador de aproximadamente 2V, permitindo um ruído abaixo dessa tensão sem efeito no sinal de saída. Esta parte do circuito se torna digital, sendo a saída do comparador apenas de 0 ou 5V. Devido ao funcionamento do circuito 555 monoestável explicado na seção a seguir, o comparador deve manter o sinal em 5V quando não estiver recebendo sinal acima de 2V e deve enviar o sinal para 0V assim que receber algum sinal acima de 2V.

O sinal digital indica então todo momento em que a vibração é maior que a normal, separando o ruído de vibrações mais significativas.

5.1.4 Monoestável

Uma vez que o sinal vindo do Comparador muda de 5V para 0V, o circuito monoestável 555 é ativado. Este circuito mantém seu sinal de saída em 0V até ser ativado. Quando ativado, sua saída fica em 5V por um tempo definido pelo resistor R e o capacitor C e então volta a 0V até ser reativado. É usado como um timer. O tempo deve ser suficiente para o assentamento das vibrações geradas por um passo.

O sinal do monoestável deve entrar em um pino detector de picos do microprocessador. Logo é necessário ter este monoestável no circuito para evitar que um passo envie mais de um pico para o microprocessador. O monoestável deve então enviar ao microprocessador apenas um pico no instante em que o comparador lhe enviar o primeiro pico vindo de um passo. Após isto, o monoestável deve apenas manter o sinal em 5V pelo tempo de assentamento do sinal do passo. Logo a resistência R e o capacitor C devem ser definidos com este tempo de assentamento em vista, seguindo a seguinte equação:

$$t_a = 1.1 * R * C \quad (1)$$

Cada parte deste circuito analógico é de resposta rápida, sendo o seu atraso desprezível quando comparado a velocidade das vibrações. O gráfico a seguir mostra o sinal em cada parte do circuito:

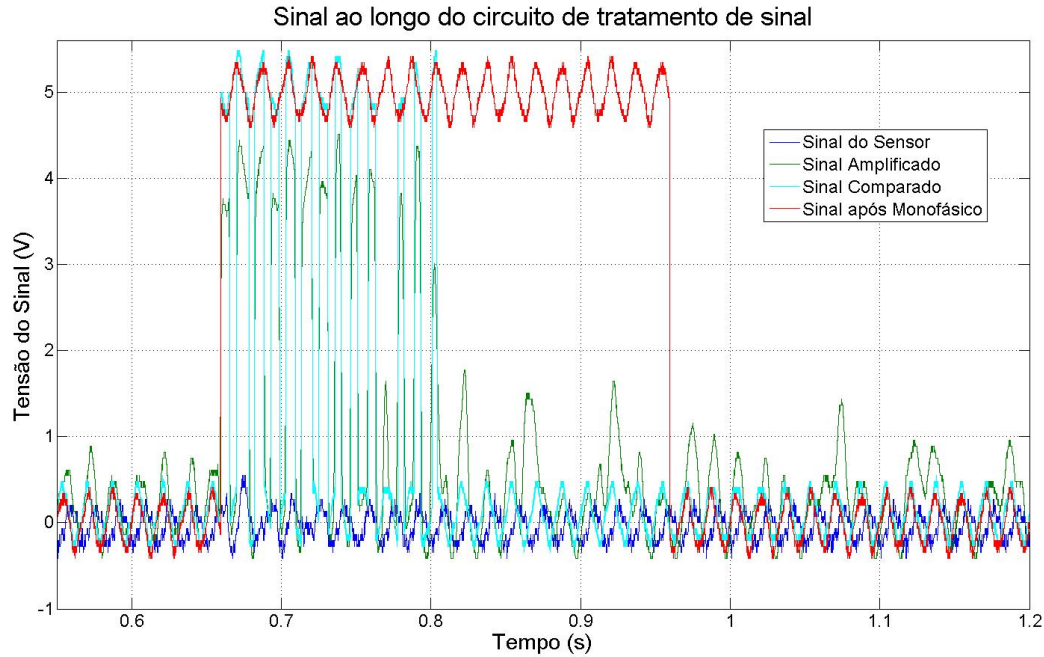


Figura 9: Sinal ao longo do circuito de tratamento de sinal

6 Central de Processamento e Algoritmo de Microlocalização

O processo feito pela central de processamento pode ser dividido em três partes: medição dos tempos de chegada, estimativa de posição do passo detectado, e envio de resultados.

Para fazer a medição dos tempos de chegada, a central deve ter pelo menos um detector de interrupção para cada sensor. Um timer de alta frequência é necessário para garantir medições de tempo precisas. Também para esta etapa é necessário que o processador tenha uma velocidade alta suficiente para não perder precisão na medição de tempo.

Para a estimativa da posição do passo é necessário que o processador seja capaz de fazer cálculos em alta velocidade. Portanto um processador capaz de fazer cálculos de ponto flutuante é necessário, de preferência de 32 bits.

Para o envio dos resultados é necessário que a central de processamento tenha uma interface de comunicação comum, podendo enviar os resultados tanto para um computador como para outro microprocessador.

Considerando todos os pontos acima foi escolhida a placa de desenvolvimento FEZ Panda II da GHI Electronics. Ela possui um processador ARM7 que trabalha a 72Mhz, diversas entradas que aceitam interrupções, timers de 32 bits que podem trabalhar a 9Mhz, e um conector micro USB que pode ser usado para comunicação.

6.1 Medição dos Tempos de Chegada

O tempo de chegada é o momento no tempo em que a vibração gerada por um passo atinge um sensor. Após a ocorrência de um passo, cada sensor gerará uma interrupção no microprocessador em tempos diferentes. Foi configurado um timer na central de processamento que fique contando o tempo e no momento que cada interrupção ocorre, o valor do timer é salvo em uma variável de tempo de cada sensor. Após ocorrerem pelo menos três interrupções, não importando a ordem, é iniciado o processo de estimativa de posição.

6.2 Métodos de Estimativa de Posição de Passo Detectado

Com as diferenças de tempo de chegada, pode-se começar o algoritmo de localização para estimativa de posição do passo detectado. Aatique (1997) faz uma análise completa de métodos de fazer localização usando a diferença de tempo de chegada, e uma de suas conclusões é que o método de Chan (Chan and Ho, 1994) é o mais efetivo uma vez que ele dá uma solução exata e requer menos tempo computacional.

O método de Chan é de fácil implementação porém tem uma dependência direta do conhecimento da velocidade de propagação das ondas detectadas, sejam eletromagnéticas ou mecânicas. Para eletromagnéticas pode-se usar a velocidade da luz porém para a vibração é necessário medir a velocidade. A seção 7.2.1 explica por que não é possível fazer uma medição boa de velocidade. Dessa maneira, mesmo tentando usar uma velocidade média, o método de Chan se provou ineficiente para microlocalização com sensores de vibração.

Uma técnica interessante de trabalhar com as diferenças de tempos de chegada é a desenvolvida por Zheng et al. (2007) onde se descobre tanto a velocidade de propagação do sinal quanto a posição da fonte apenas partindo dos tempos de chegada. Porém, para o funcionamento do método são necessários ao menos 5 sensores, o que seria ruim para distribuir na sala do laboratório. As variações de velocidades medidas também fariam com que este método tivesse grandes erros, embora a quantidade maior de sensores poderia reduzir os erros para valores aceitáveis. Este não foi o método aplicado porém é uma alternativa válida para ser explorada em um novo estudo.

A técnica utilizada no projeto foi a de Mapeamento de Sinais. Esta técnica consiste de aplicar incitações conhecidas em um sistema e gravar os resultados obtidos. Desta maneira cria-se uma tabela de referência, ou mapa, de quais são as reações do sistema dependendo das incitações possíveis. Quando o sistema detecta uma incitação desconhecida, é possível usar o mapa para achar uma incitação próxima a detectada. A técnica será explicada na seção 6.3.

6.3 Método de Mapeamento com Modelo Humano

6.3.1 Mapeamento de Diferenças de Tempos

O primeiro passo é definir a discretização do espaço que será mapeado e a informação que será guardada para cada parte mapeada. Para a discretização do espaço é necessário ter noção do ambiente no qual será

implementado o sistema. A seção 7.1.2 mostra dimensões da sala, e as posições adotadas para os sensores. No projeto foi feita uma discretização de 1,2m entre cada ponto mapeado, apenas para o espaço do retângulo definido pelos sensores. Isto resultou em 26 pontos ao longo do espaço onde é possível andar na sala. Essa discretização foi escolhida por garantir uma precisão aceitável na detecção de passos e por não conter uma quantidade muito grande de pontos, diminuindo o tempo de mapeamento. Se fosse feito um mapeamento com uma discretização menor como 0,6m a precisão do sistema maior mas seria necessário mapear 110 pontos, resultando em um tempo de mapeamento muito maior e resultaria em uma velocidade menor de cálculo devido a maior quantidade de pontos para tratar.

A informação guardada para cada ponto foram os tempos de chegada em cada sensor. Para normalizar a informação foi estipulado que o tempo de chegada no sensor 1 seria sempre 0 e os outros seriam guardados em relação a esse. Para cada ponto foram feitas 10 medições de passos e tirada uma média. Além disso cada ponto tem um valor em X e Y e um número de identificação. A figura e a tabela a seguir demonstram as informações de cada ponto obtido:

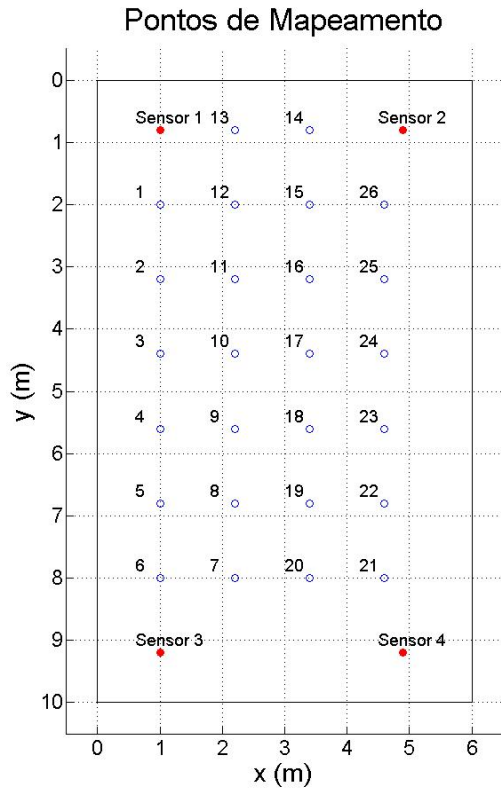


Figura 10: Pontos de mapeamento obtidos na sala

Ponto	x	y	t1 (ms)	t2(ms)	t3(ms)	t4(ms)
1	0	1,2	0,00	4,89	20,88	11,30
2	0	2,4	0,00	-0,97	16,90	4,78
3	0	3,6	0,00	7,75	2,38	0,62
4	0	4,8	0,00	0,60	-7,96	-4,11
5	0	6	0,00	-6,07	-16,04	-19,74
6	0	7,2	0,00	-10,01	-25,65	-23,99
7	1,2	7,2	0,00	1,25	-12,83	-15,98
8	1,2	6	0,00	3,81	-13,40	-16,06
9	1,2	4,8	0,00	-0,53	1,98	-1,64
10	1,2	3,6	0,00	8,65	0,33	-1,29
11	1,2	2,4	0,00	-3,10	12,18	14,39
12	1,2	1,2	0,00	-2,28	15,67	7,09
13	1,2	0	0,00	5,61	18,26	9,53
14	2,4	0	0,00	-12,42	3,81	-0,08
15	2,4	1,2	0,00	-5,49	10,54	11,27
16	2,4	2,4	0,00	-6,46	8,59	8,56
17	2,4	3,6	0,00	3,00	-0,93	-7,93
18	2,4	4,8	0,00	17,27	4,99	-5,13
19	2,4	6	0,00	10,81	-7,71	-12,67
20	2,4	7,2	0,00	7,76	-13,85	-20,55
21	3,6	7,2	0,00	-0,14	-8,12	-20,11
22	3,6	6	0,00	8,86	-11,75	-18,01
23	3,6	4,8	0,00	11,62	-0,61	-11,85
24	3,6	3,6	0,00	8,06	0,55	0,52
25	3,6	2,4	0,00	1,35	9,38	5,14
26	3,6	1,2	0,00	-3,48	10,53	5,96

Tabela 1: Tabela com posição e tempos em milissegundos obtidos para cada ponto do mapa

6.3.2 Método de Detecção por Mapeamento

Tendo o mapa feito pode-se aplicar diferentes métodos para localizar a origem de um passo detectado. Thummalapalli (2012) descreve alguns desses métodos e o algoritmo escolhido foi o do Vizinho Mais Próximo. Pelos motivos explicados na seção 7.2.2 o algoritmo é aplicado apenas para os três primeiros sensores, uma vez que a quarta medida é sempre a que contém maior erro.

Em sua forma mais simples, o algoritmo consiste de:

1. Definir ordem cronológica de ativação dos sensores, sendo a o primeiro sensor ativado, b o segundo e c o terceiro,
2. Calcular as diferenças de tempo $\Delta t_{ba} = t_b - t_a$ e $\Delta t_{ca} = t_c - t_a$ tanto para o passo detectado quanto para cada ponto do mapa.
3. Calcular para cada ponto do mapa a distância euclidiana do passo detectado. Sendo p o passo detectado e i o ponto do mapa tratado, calcula-se a distância euclidiana como:

$$d_i = \sqrt{(\Delta t_{ba,p} - \Delta t_{ba,i})^2 + (\Delta t_{ca,p} - \Delta t_{ca,i})^2} \quad (2)$$

4. Encontrar dentre os pontos do mapa o de menor distância euclidiana. Este ponto é considerado o Vizinho Mais Próximo. A posição do passo é assumida como a posição do seu Vizinho Mais Próximo.

Apenas em sua forma mais simples, porém, o algoritmo contém muitos erros. Devido às variações de velocidade e aos erros incorporados pela dissipação das vibrações, o algoritmo fica com precisão baixa, e portanto foram feitas mudanças que aumentam a complexidade do algoritmo e a precisão de localização.

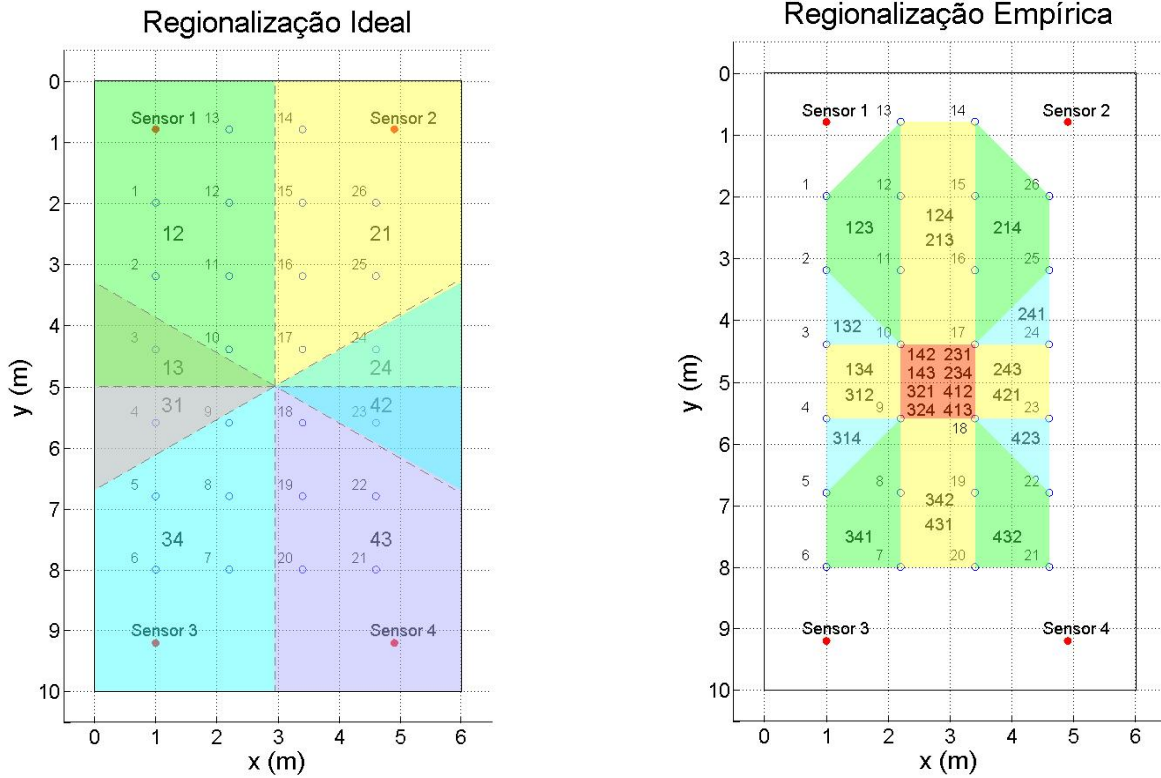
6.3.3 Regionalização

Como as medidas de tempo tem um atraso para maiores distâncias do sensor do passo, uma característica confiável da medida de tempos é a ordem de ativação dos sensores. Então é possível aumentar a precisão do sistema limitando a região provável de localização do passo detectado de acordo com essa ordem.

Considerando vibrações em um ambiente ideal, pode-se dividir o espaço em regiões usando as mediatrizes entre cada par de sensores. Devido à disposição simétrica dos sensores, apenas a ordem dos primeiros dois sensores ativados já delimita uma região. A figura 11a demonstra como ficaria a divisão em um ambiente ideal.

Devido aos erros presentes no ambiente real, apresentados em 7.2, existem outras possibilidades de ordem de ativação de sensores. Partindo da regionalização ideal em 11a e fazendo alterações decorrentes de análises empíricas do sistema, foi definida a regionalização da figura 11b. Neste caso a ordem dos três primeiros sensores define a região a ser analisada. Os números dentro de cada região na figura indicam a ordem de ativação dos sensores para aquela região.

Uma vez definida a região em que pode estar o passo, apenas os pontos contidos nesta região são considerados para fazer a localização do passo detectado. Logo, os cálculos nos passos 2 e 3 do algoritmo na seção 6.3.2 são feitos apenas para os pontos na região definida.



(a) Regionalização ideal a partir de dois sensores. Os dois números grandes dentro de cada região mostram a ordem dos sensores para aquela ser a região considerada.

(b) Regionalização empírica a partir de três sensores. Os três números grandes dentro de cada região mostram a ordem dos sensores para aquela ser a região considerada.

Figura 11: Regionalização da sala de acordo com ordem de ativação dos sensores

6.3.4 Aplicação de Pesos aos Pontos

Ao invés de escolher apenas um ponto, uma solução para melhorar a qualidade da localização foi fazer uma média dos pontos mais próximos do detectado. São selecionados todos os pontos da região definida em 6.3.3, e a cada ponto é aplicado um peso inverso a sua distância euclidiana do passo detectado. É feita uma média então das coordenadas dos pontos da região e assim encontra-se as coordenadas do passo detectado.

O cálculo de x_p e y_p desta maneira fica, sendo n o número de pontos do mapeamento usados:

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i/d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i} \\ y_p &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i/d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i} \end{aligned} \quad (3)$$

No algoritmo demonstrado na seção 6.3.2 no passo 4 a posição do passo passa a ser calculada com 3.

6.3.5 Modelo de Limite de Velocidade

É possível reduzir erros e traçar uma trajetória mais real aplicando um modelo de humano ao sistema. A primeira característica do modelo humano é a velocidade máxima que ele pode ter. No caso, foi aplicado o modelo de uma pessoa caminhando, não podendo ultrapassar $v_{max} = 1m/s$. Para isso, um cronômetro deve medir o tempo $t_{anterior}$ desde o último passo e então limitar a distância entre a nova posição e a velha posição para:

$$d_{max} = t_{anterior} * v_{max} \quad (4)$$

Caso um novo passo seja detectado a uma distância maior que essa, é considerado que o passo teve a mesma direção, porém a distância do passo antigo será apenas d_{max} . Caso o novo passo seja detectado a uma distância menor que d_{max} , nenhuma alteração é feita. A figura a seguir mostra um exemplo de resultado da aplicação desse modelo:

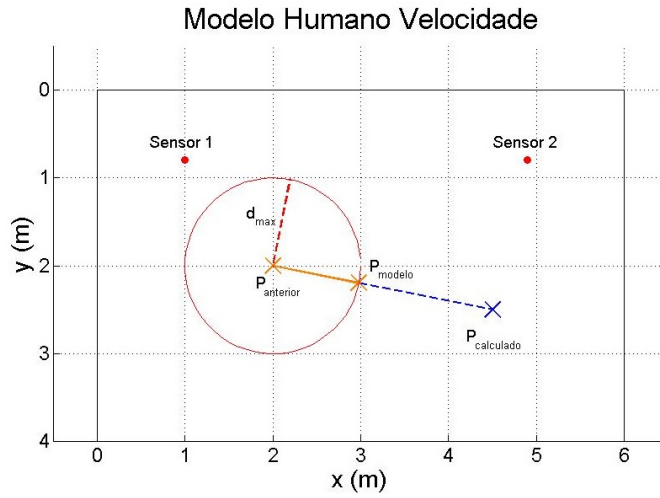


Figura 12: Modelo de limite de distância de passo

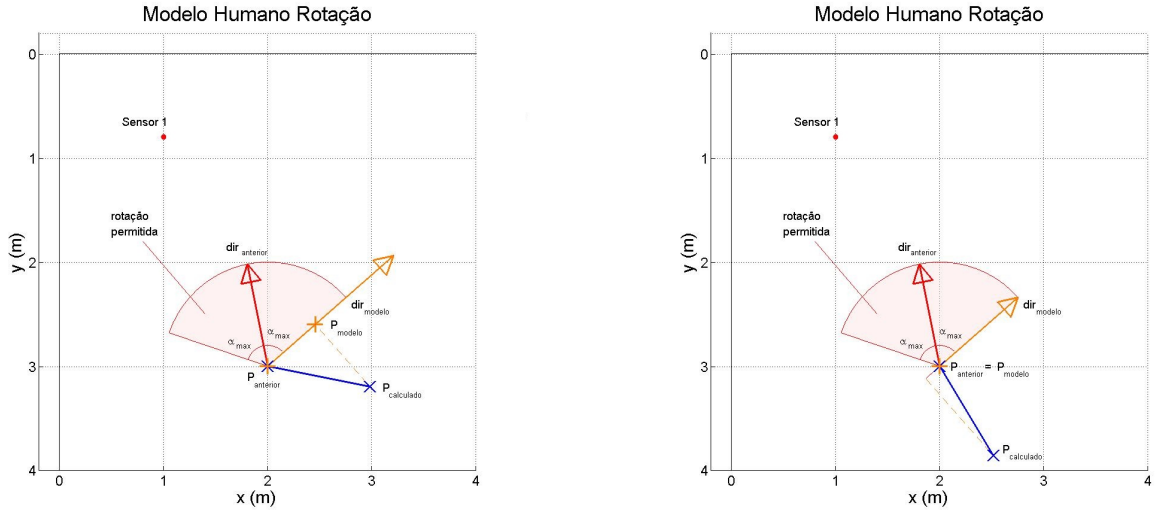
Para o primeiro passo detectado pelo sistema é considerado como se o passo anterior tivesse sido no centro da sala.

6.3.6 Modelo de Limite de Rotação

A segunda característica do modelo humano é a velocidade de rotação máxima que um humano pode ter. Foi aplicado uma velocidade de rotação máxima $v_{rot} = 60/s$. Assim como é feito com a velocidade de translação, é calculado um ângulo máximo de rotação a cada passo de:

$$\alpha_{max} = t_{anterior} * v_{rot} \quad (5)$$

A direção de um passo é definida pela reta do passo anterior para esse passo. Caso um passo seja detectado a um ângulo maior que α_{max} da direção do passo anterior, é considerada apenas a projeção do passo detectado na direção do ângulo limite α_{max} mais próximo. Caso essa projeção seja negativa em relação a direção do ângulo limite mais próxima, esta é considerada como zero. Caso o ângulo entre o passo detectado e a direção antiga seja menor que α_{max} nenhuma alteração é feita. A figura a seguir mostra dois casos de aplicação deste modelo:



(a) Caso ponto esteja a um ângulo maior que o máximo

(b) Caso a projeção seja negativa

Figura 13: Modelo de limite de rotação

6.3.7 Software da Central de Processamento

Aplicando todos os métodos apresentados nas últimas seções, pode-se delinear o funcionamento do software da Central de Processamento:

1. Inicialização

- Carregar dados do mapeamento da Tabela 1.
- Setar posição inicial do modelo de pessoa como centro da sala e direção a 0.

- Ativar interrupções nos pinos do microprocessador ligados aos sensores.
 - Ativar Timer.
2. Detecção de Três sensores
- Aguardar três sensores serem ativados dentro de um espaço de tempo de $60ms$.
 - Filtros digitais evitam a detecção de falsas interrupções que poderiam ser causadas por vibrações muito fortes na sala.
3. Ordenação
- Ordenar os sensores por ordem de ativação. É feita uma ordenação por inserção, achando uma ordem crescente de tempos de ativação dos sensores.
4. Regionalização
- Definir região de trabalho para a ordem de ativação de sensores a partir das regiões definidas em 11b.
5. Aplicação de pesos e localização
- Calcular para cada ponto a distância euclidiana usando a equação 2.
 - Aplicar a cada ponto um peso proporcional á sua proximidade para cálculo das coordenadas de origem do passo detectado usando o equacionamento 3.
6. Limitação de velocidade
- Calcular d_{max} pela equação 4.
 - Aplicar modelo de limitação de velocidade para o d_{max} calculado.
7. Limitação de rotação
- Calcular α_{max} pela equação 5.
 - Aplicar modelo de limitação de rotação para o α_{max} calculado.
8. Gravação de memória
- Gravar em variáveis globais as coordenadas e direção do passo detectado para aplicação do modelo de humano no próximo passo detectado.
9. Comunicação e Retorno
- Enviar por USB uma mensagem com os valores das coordenadas da posição da pessoa detectada.
 - Retornar ao passo 2 desse algoritmo para detectar um próximo passo.

7 Experimentos

7.1 Sala de Testes

7.1.1 Características Vibratórias do Ambiente

Cada ambiente possui uma série de características que modificam as vibrações transmitidas pelo chão. Estas influenciam diretamente as medições de sensores de vibração são identificadas a seguir:

- Material
 - Chãos feitos de materiais diferentes tem velocidades de transmissão de vibrações diferentes e amortecimentos de vibração diferentes. A tabela a seguir mostra a diferença de velocidades de vibrações em diferentes materiais. No caso de usar as diferenças de tempos de chegada, velocidades muito altas prejudicam a precisão adquirida da análise do microprocessador.

Material	Velocidade (m/s)
Aço	6100
Vidro (Pyrex)	5600
Madeira (Carvalho)	4000
Concreto	3100

Tabela 2: Velocidade de ondas sonoras em diferentes materiais (Kinsler and Frey, 1962)

- Dimensões
 - Salas com paredes muito próximas tem uma grande influência de reflexão de ondas nas paredes, criando um ambiente mais ruidoso. Além disso, em salas pequenas o usuário não precisa atingir uma velocidade de andar alta, portanto seus passos tendem a ser mais leves. Ao menos, devido a não necessidade de detectar passos a longas distâncias, é possível reduzir a sensibilidade do sensor, diminuindo então os efeitos adversos de ambientes pequenos.
 - Ambiente grandes tem reduzida influência de reflexões em paredes e vibram em frequências menores. Uma pessoa tende a andar mais rápido em ambientes grandes, causando impactos mais facilmente percebidos pelos sensores. Portanto ambientes como este são mais interessantes para o sensor desenvolvido neste projeto
- Estrutura
 - Por estrutura deve-se considerar toda a sustentação do chão. No primeiro andar de prédios muitas vezes este está em contato direto com o solo, garantindo uma sustentação do chão em toda sua extensão. Isto faz estes ambientes terem uma característica de chão mais rígido do que ambientes no segundo andar, onde a sustentação acontece só nas laterais de uma sala ou por colunas, diminuindo

então esta rigidez. Variações nas frequências naturais da sala, no amortecimento de vibrações e nas reflexões que podem ocorrer são resultados dessas diferentes estruturas possíveis dos chãos.

- Assoalho

- Uma interface entre o chão e a pessoa como um carpete, madeira ou azulejo pode modificar principalmente o amortecimento dos impactos dos passos de um humano no ambiente. Se o sensor estiver acima do assoalho este amortecimento ocorre duplamente. Neste caso, assoalhos mais rígidos e de menor espessura teriam um menor amortecimento, sendo mais interessantes para a detecção de passos.

Por estes motivos o sensor deve ser calibrado para diferentes ambientes. Os ganhos do hardware devem ser calibrados para que os sinais sejam obtidos precisamente e com a sensibilidade desejada, e o software deve ser calibrado para fazer o cálculo correto da posição do passo dado, ambos dependentes das características do ambiente em que o sensor deve trabalhar.

O laboratório onde foi desenvolvido o sensor fica no segundo andar do prédio de Engenharia Mecânica e Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Por estar no segundo andar tem frequências de vibração maiores e baixo amortecimento estrutural. O assoalho é de Paviflex, um plástico rígido. As dimensões da sala são de um retângulo de 10 metros por 6 metros.



Figura 14: Foto do laboratório onde foi desenvolvido e testado o sistema de microlocalização

Os primeiro modos de vibrar da sala foram obtidos experimentalmente medindo o ruído vibratório da sala em diferentes posições e fazendo uma Transformada de Fourier:

Modo de vibrar	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência (Hz)	120	140	180	300	420	540	660	780

Tabela 3: Primeiro modos de vibrar da sala

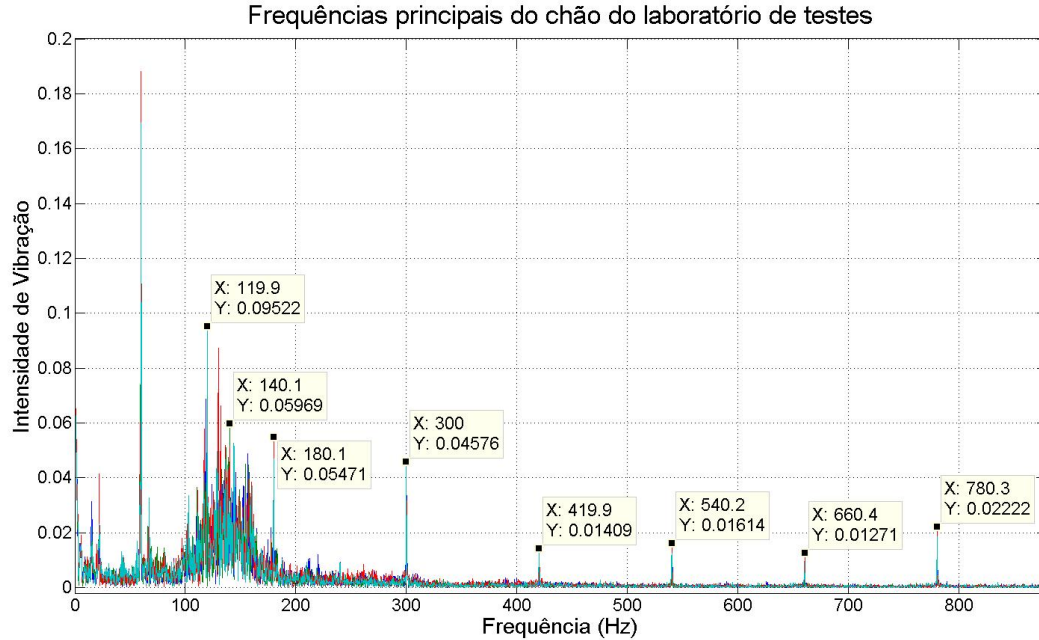
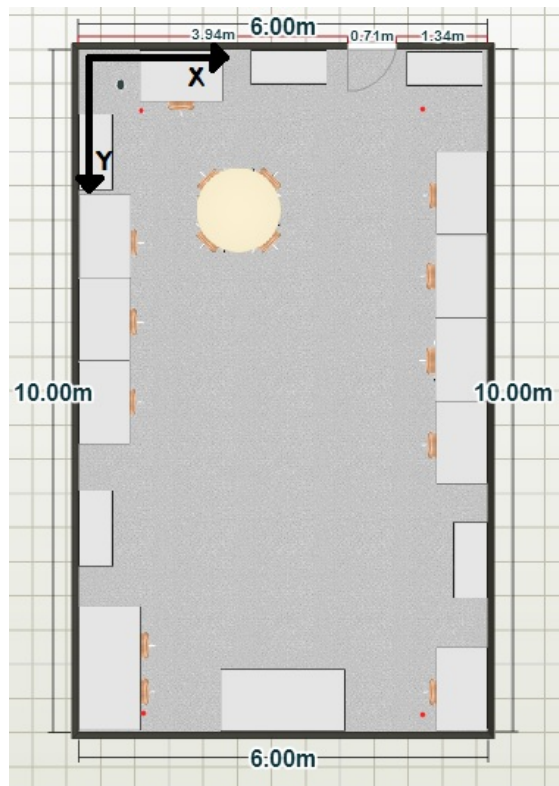


Figura 15: Transformada de Fourier de medições de ruídos no chão

Apenas picos presentes em todas as medições foram considerados. O pico maior em 60Hz não foi considerado uma vez que este vem da rede elétrica que trabalha a 60Hz.

7.1.2 Posição dos Sensores

Foi feito um modelo do laboratório onde será implementado o sistema usando o Autodesk® Homestyler® para melhor demonstrar as dimensões e os objetos presentes. Em vermelho pode-se ver a posição escolhida para os sensores. Foram posicionados 4 sensores, um em cada canto da sala. Embora sejam necessários apenas 3 sensores, foram usados 4 para poder melhorar a precisão do sistema.



(a) Vista superior da sala com eixos cartesianos posicionados na origem do sistema



(b) Vista 3D da sala

Figura 16: Vistas da sala onde será implementado o sistema com sensores em vermelho

As coordenadas dos sensores são:

Sensor	x	y
1	1,0	0,8
2	4,9	0,8
3	1,0	9,2
4	4,9	9,2

Tabela 4: Coordenadas dos sensores

7.2 Características das Medidas de Tempos de Detecção de Vibração

Após testes usando os sensores desenvolvidos foi possível observar diversas características das medidas obtidas.

7.2.1 Velocidade de Propagação da Vibração Variável

Uma característica importante para localização é a velocidade de propagação das ondas mecânicas no chão da sala de testes. Foram feitas medições no laboratório que mostraram uma variação da velocidade ao longo da sala variando de 1000m/s até 2000m/s. Essas variações são decorrentes da estrutura irregular da construção. Em um momento pode-se dar um passo em cima de uma viga de aço, garantindo uma alta velocidade de propagação, porém em um outro momento se pisa em uma parte de concreto livre que garante uma velocidade de propagação mais baixa. Portanto a velocidade não é uma característica confiável para uso nos algoritmos de localização.

7.2.2 Dissipação das Vibrações de um Passo

Quanto maior a distância do sensor da origem do passo, maior é o erro da medida. As vibrações feitas por um passo de uma pessoa não são suficientemente fortes para percorrer distâncias longas sem se dissiparem. Portanto a primeira parte da vibração gerada por um passo acaba não chegando nos sensores mais distantes. Isso foi comprovado medindo os tempos de chegada para incitações de diferentes intensidades. Um impacto feito por uma grande massa caindo de um metro de altura resultou em diferenças de tempos de chegada muito menores do que os medidos com passos de uma pessoa. Pode-se observar que quanto maior a distância do sensor maior é o efeito desta dissipação inicial.

7.3 Experimentos para Definição de Características do Sensor

Para definir as características do sensor de vibração foram feitos experimentos usando o sensor e o circuito de tratamento de sinal propostos. Para fazer a aquisição dos dados foram usados um Osciloscópio de dois canais e a Placa de Aquisição de Dados (PAD) da *National Instruments* NI PCI-6610. Esta foi

usada para medir níveis de tensão em 12 bits a uma frequência de amostragem de 10kHz em múltiplos canais simultaneamente. Esses dados foram analisados usando o programa MATLAB.

7.3.1 Definição da Massa

Para a definição da massa foram testadas massas de 10g até 2kg. Foram feitas comparações entre pares de massas usando um Osciloscópio, com dois canais conectados a dois sensores distintos com massas diferentes. Analisando o sinal de cada um para cada passo foi possível notar que não é necessário usar massas muito altas. Após o teste de diversas massas, foi decidido que um cilindro de aço de 300g seria usado.

7.3.2 Definição do Acoplamento Sensor-Chão

A definição do Acoplamento Sensor-Chão foi feita comparando sempre um sensor usando um acoplamento e outro em contato com o chão como grupo de controle. Para cada acoplamento foram feitas 3 medições, em 4 distâncias distintas, sendo que cada medição tem em torno de 4 passos. Como foram testados 8 acoplamentos, foram medidos em torno de 384 passos.

As distâncias medidas foram de 1m, 2m, 5m e 9m. Os acoplamentos a seguir foram testados. Foram dados os seguintes nomes para cada Acoplamento para uso ao longo do relatório, de cima para baixo: Papelão, Triângulo, Hexágono 1, Hexágono 2, Raio, Ampulheta 1, Ampulheta 2, Ampulheta 3:

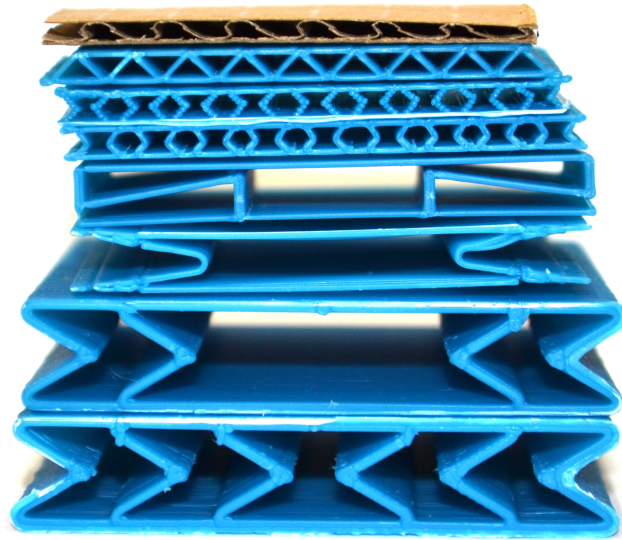


Figura 17: Estruturas testadas como acoplamentos

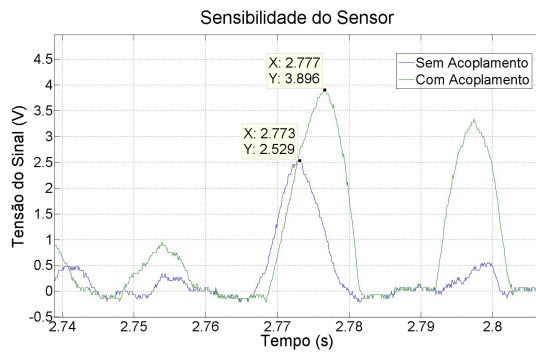
As características comparativas que puderam ser retiradas dos sinais recebidos foram a sensibilidade, o tempo de assentamento do sinal, a capacidade de detectar passos e a sensibilidade á ruídos. A seguir são definidas cada uma destas características:

- A sensibilidade é essencialmente o ganho do sensor com acoplamento em relação ao sensor sem acoplamento. É obtida dividindo o valor máximo de um pico do sensor com acoplamento pelo valor máximo

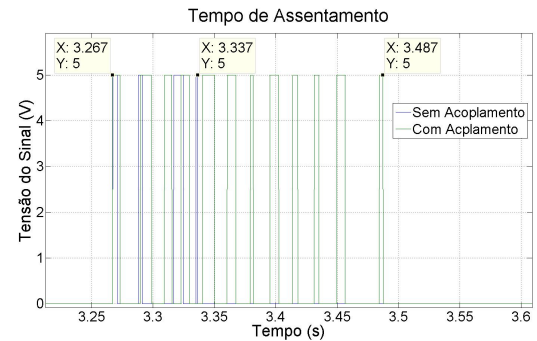
de um mesmo pico no sensor sem acoplamento.

- O tempo de assentamento é o tempo entre o primeiro pico do comparador (seção 5.1.3) e o último. Dividindo o tempo de assentamento do sensor com acoplamento pelo do sensor sem acoplamento conseguimos um fator relativo de tempo de assentamento. A seção 4.1.4 explica o significado do tempo de assentamento.
- A capacidade de detectar passos é calculada dividindo o número de passos detectados pelo sensor com acoplamento pelo número de passos detectados pelo sensor sem acoplamento. Também é apenas definido que um passo foi detectado se este passo é distinguível do anterior. Se um passo ocorre dentro do tempo de assentamento do passo anterior ele não é detectado.
- Sensibilidade á ruídos é calculada dividindo a média do ruído do sensor com acoplamento pela média do ruído do sensor sem acoplamento.

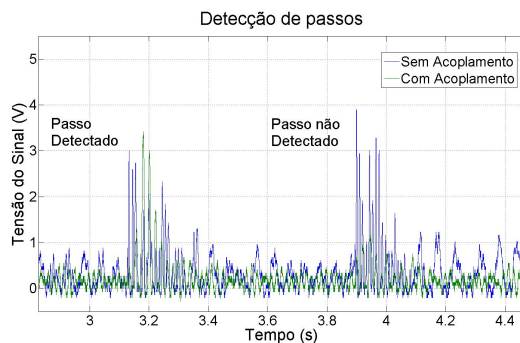
O sensor ideal tem alta sensibilidade, baixo tempo de assentamento, alta capacidade de detectar passos e baixa sensibilidade a ruídos. A figura a seguir mostra gráficos exemplo para cálculo de cada característica:



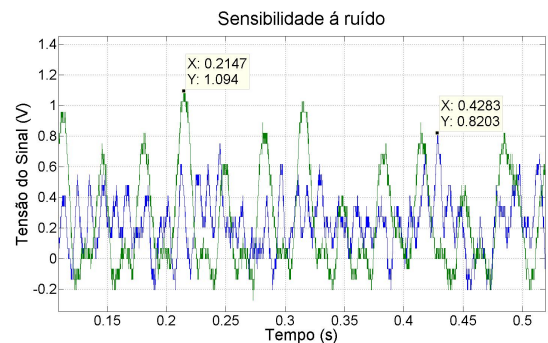
(a) Sensibilidade do sensor



(b) Tempo de assentamento



(c) Detecção de passos e não detecção



(d) Sensibilidade a ruídos

Figura 18: Cálculo de características comparativas de sensores com acoplamentos

Foi feita uma tabela com as características relativas de todos os acoplamento disponíveis:

Acoplamento	Sensibilidade	Fator de assentamento	Capacidade de detecção	Sensibilidade a ruído
Papelão	1,123	0,579	0,36	0,683
Triângulo	1,252	1,135	0,67	0,690
Hexágono 1	1,323	0,299	0,46	0,637
Hexágono 2	1,089	1,852	0,73	0,723
Raio	1,680	7,657	1,00	0,896
Ampulheta 1	2,450	3,709	0,85	0,669
Ampulheta 2	2,030	2,332	1,15	0,845
Ampulheta 3	1,499	1,907	1,24	0,918

Tabela 5: Cálculo de características relativas dos sensores com acoplamento

Diante das informações obtidas, duas opções se mostraram mais viáveis de uso, a Ampulheta 2 e a Ampulheta 3. Destas foi selecionada a Ampulheta 2 como acoplamento mais adequado.

8 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados do uso do sistema desenvolvido no ambiente descrito na seção 7.1. Como base para teste foram definidas três rotas ao longo da sala, uma dá a volta na sala passando próximo dos sensores, a outra cruza a sala em uma diagonal e a terceira é uma linha que cruza a sala no meio que o usuário deve percorrer diversas vezes. Essas serão chamadas respectivamente de Rota U, Rota Diagonal e Rota Vai e Volta. As setas indicam a direção de movimentação. A Rota U foi escolhida como base de comparação.

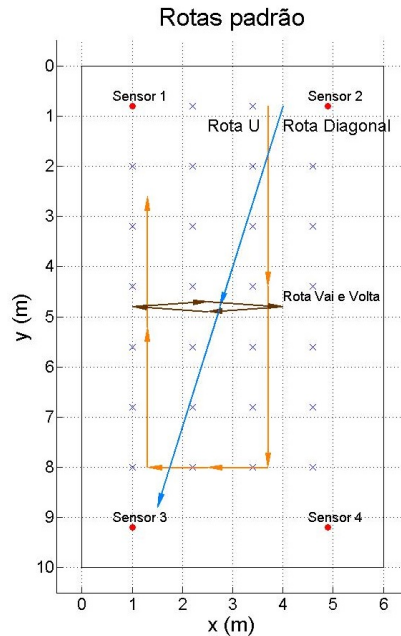


Figura 19: As três rotas padrão

8.1 Influência de Método e Sensores

8.1.1 Evolução do Algoritmo de Microlocalização

Na seção 6.3 é apresentado o método de mapeamento e diversas modificações para sua melhora. Para mostrar o efeito de cada modificação foi feita uma medição apenas de tempos de chegada para cada sensor, para uma pessoa andando na Rota U. Com os tempos de chegada foi executado cada parte do algoritmo e mostrado os resultados em uma imagem. Esta imagem consegue mostrar o aumento de precisão do sistema para cada modificação feita no algoritmo.

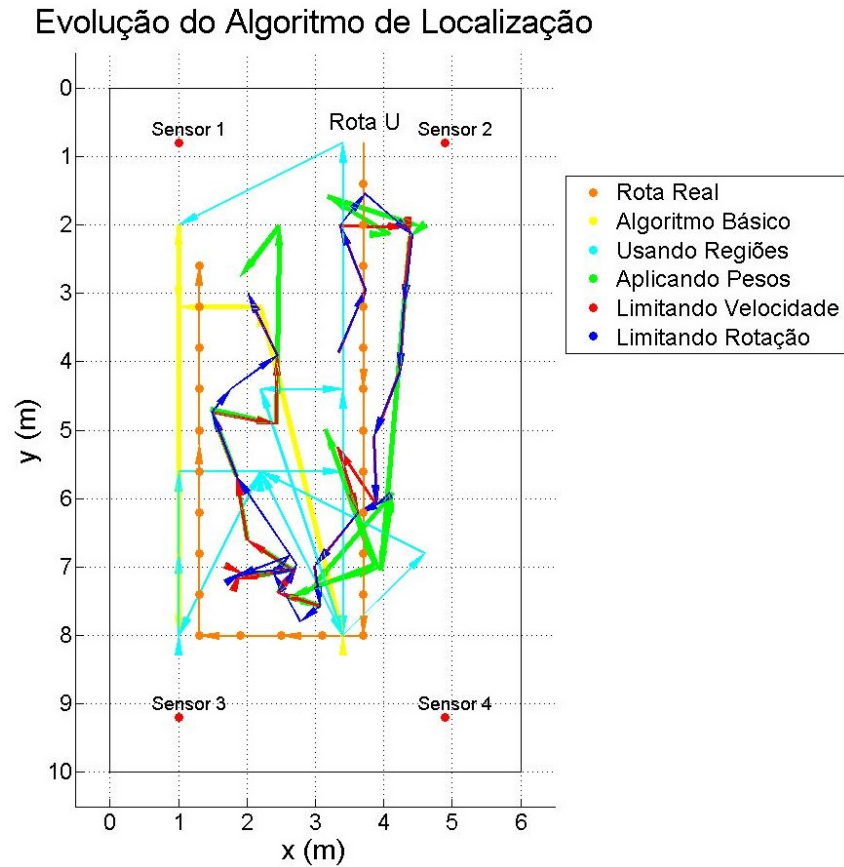


Figura 20: Evolução do algoritmo para cada etapa apresentada na seção 6.3

Foram calculados os erros médios para estes pontos e os desvios padrões dos erros, apresentados na tabela a seguir:

Algoritmo de Localização	Erro Médio (m)	Desvio Padrão do Erro
Algoritmo Básico	4,18	4,381
Regionalização	1,92	2,200
Aplicando Pesos	1,17	1,329
Limitando Velocidade	1,04	1,138
Limitando Rotação	1,02	1,132

Tabela 6: Erros para cada método de localização mostrado na Figura 20

Pode-se observar então que para cada modificação feita, a rota detectada teve maior precisão. Apenas após fazer a Regionalização e aplicar pesos aos pontos medidos é possível observar que a rota detectada se assemelha a rota real. Ao aplicar o modelo de humano, não só a detecção aumenta de precisão, mas pode-se observar que a rota criada pelos pontos assemelha-se mais a um movimento real de um humano.

É importante notar que após aplicar o modelo humano os primeiros passos são detectados próximos ao centro da sala. Isso ocorre por que é assumido inicialmente que a posição da pessoa fica no centro da sala até ela dar seu primeiro passo, como é explicado na seção 6.3.5.

8.1.2 Diferença do Número de Sensores

O sistema foi feito usando 4 sensores, porém em teoria apenas 3 são necessários. A seguir é feita uma comparação do sistema caso fosse usado apenas o mínimo de 3 sensores, usando os mesmos dados de 8.1.1 para a Rota U. Adaptações precisaram ser feitas na etapa de regionalização.

Comparação de Detecção por Número de Sensores

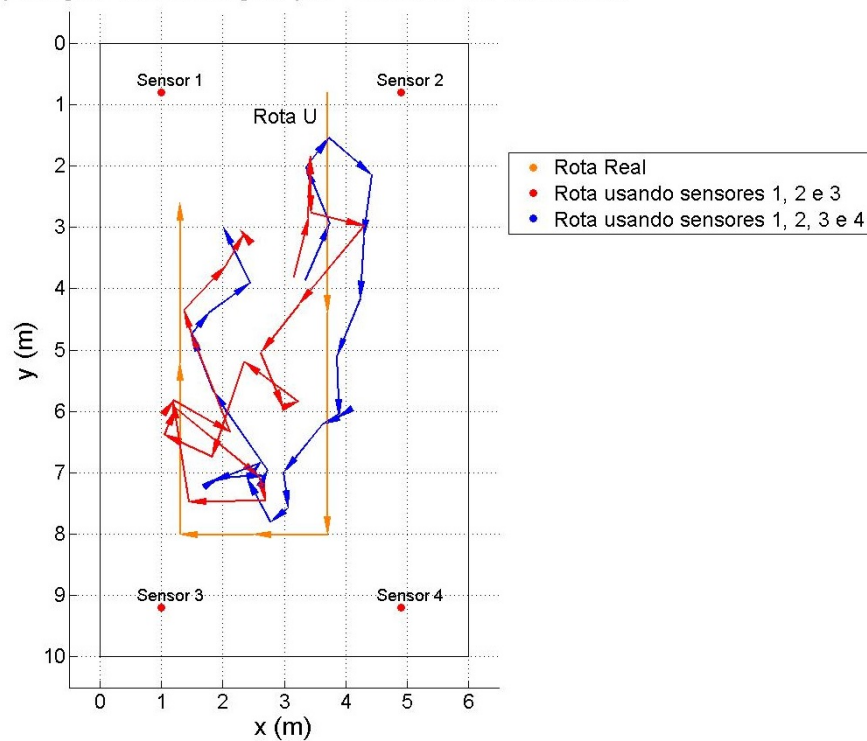


Figura 21: Comparação de detecção usando 3 e usando 4 sensores

Pela Figura 21 pode-se ver que a detecção com menos sensores tem menor precisão, principalmente próximo a área do sensor 4 que não é usado na detecção mostrada pelas linhas vermelhas. O erro médio aumentou em 20% com um sensor a menos. Isso sugere que ao usar mais de 4 sensores a precisão do sistema deveria aumentar. A imagem também sugere que a precisão do sistema é maior nas áreas mais próximas dos sensores.

8.2 Influência da Pessoa Detectada

8.2.1 Diferença de Pesos

Os pesos de pessoas podem variar muito, e para o sistema isso significa uma mudança significativa na intensidade dos impactos de cada passo a ser detectado. Foram feitos testes com pessoas de 60kg, 80kg e 110kg. A figura a seguir mostra as rotas detectadas e a tabela a seguir mostram os erros para cada peso.

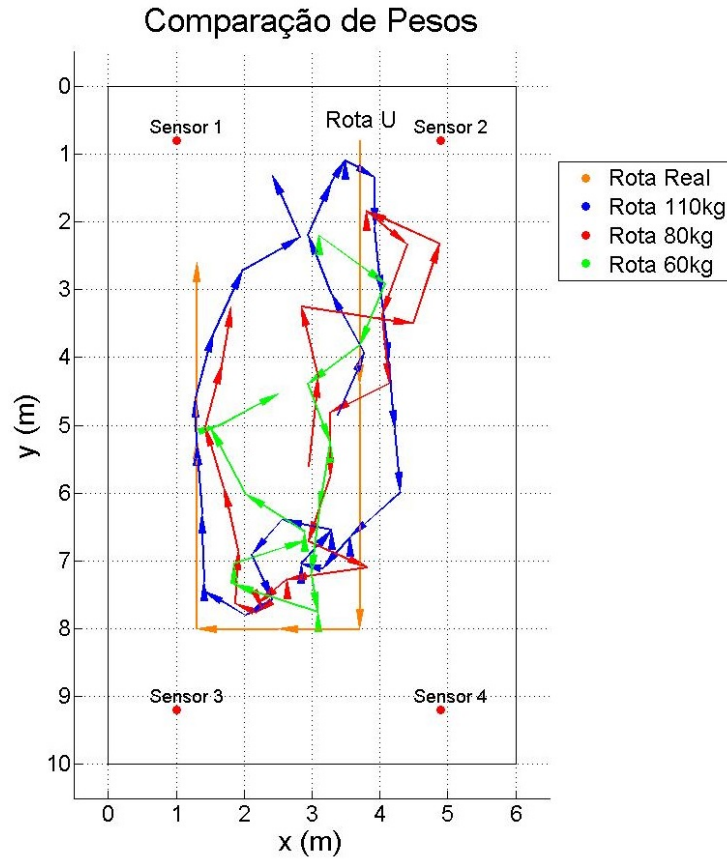


Figura 22: Comparação de detecção para pessoas de diferentes pesos

Peso (kg)	Erro médio (m)	Passos detectados
110	0,66	34
80	0,70	26
60	0,83	20

Tabela 7: Erros para detecção de pessoas de diferentes pesos

É possível observar então um aumento no erro médio para menores pesos, porém mais importante, menos passos foram detectados para as pessoas de menor peso. Isso significa que pessoas de menor peso são mais dificilmente detectadas. Isso se deve ao fato dos impactos gerados a cada passo serem menores e portanto gerar uma menor vibração.

8.2.2 Diferença de Calçados

Os calçados usados por uma pessoa alteram a interação que ela tem com o chão. O calçado é um amortecedor de impactos, portanto quanto mais duro maior será a vibração gerada. Na figura a seguir seguem rotas detectadas com sapatos sociais, tênis e descalço.

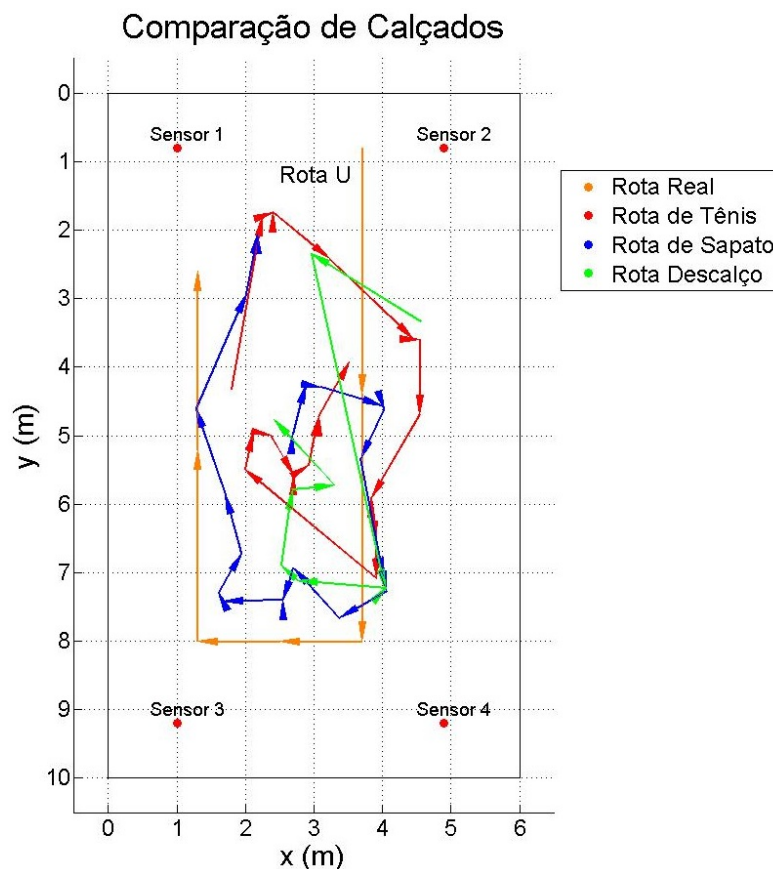


Figura 23: Comparação de detecção com diferentes calçados

Calçado	Erro médio (m)	Passos Detectados
Sapato	0,6	21
Tênis	1,05	21
Descalço	1,18	9

Tabela 8: Erros para detecção de pessoa com diferentes calçados

Pode-se notar que o sistema teve grandes dificuldades de detectar uma pessoa descalça pela pequena quantidade de passos detectados. Isso se deve ao fato da pessoa que anda descalça amortecer seus próprios passos ao andar. Enquanto isso, com sapato a detecção aumentou. Logo, calçados mais duros facilitam na detecção de passos, diminuindo o erro do sistema.

8.2.3 Diferença de Velocidade de Caminhar

A velocidade de caminhar de uma pessoa influencia diretamente a capacidade de detecção do sistema. Passos muito rápidos podem ser perdidos nas vibrações de passos anteriores. A figura a seguir mostra a diferença entre passos mais lentos e passos mais rápidos.

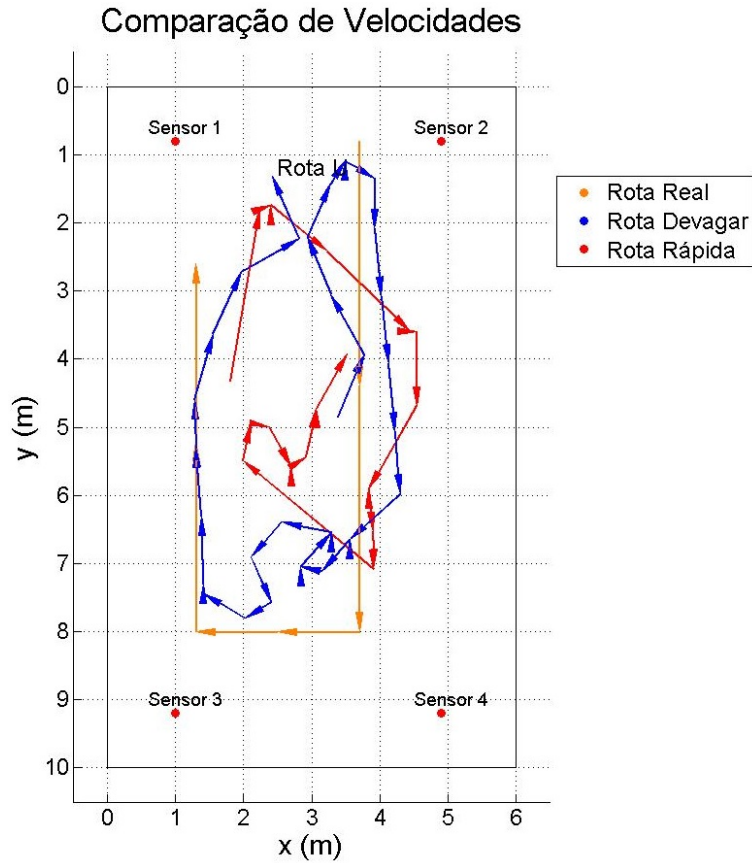


Figura 24: Comparação de detecção em diferentes velocidades

Velocidade	Erro médio (m)	Passos Detectados
Lenta	0,66	34
Rápida	1,05	21

Tabela 9: Erros para detecção de pessoa em diferentes velocidades

Pode-se ver que passos mais espaçados no tempo garantem melhor localização e um número maior de passos é detectado. Quando uma pessoa anda mais rápido ou até corre é possível que ela gere tanta vibração no chão que o sistema não consiga detectá-la. Isso ocorre por que quando o sensor recebe muitas vibrações ele não consegue distinguir o momento em que ocorreu um passo.

8.3 Medições em Tempo Real

Foram feitas diversas medições para cada uma das rotas definidas. A seguir algumas delas:

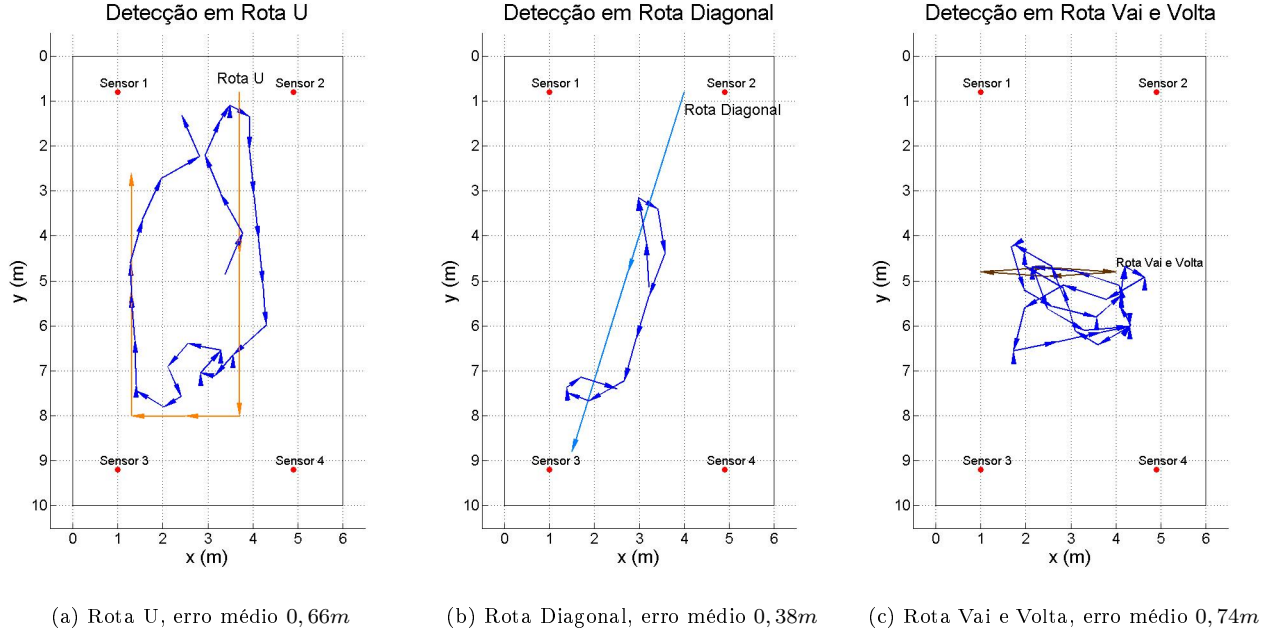


Figura 25: Microlocalização para cada rota usando algoritmo completo com modelo humano

É possível então para diferentes rotas perceber o caminho que uma pessoa faz na sala usando os passos detectados. Esses pontos todos foram detectados em tempo real. No momento em que o passo ocorre o sistema executa os cálculos e envia as coordenadas por USB. Isso significa que as rotas apresentadas nas imagens acima todas podem ser desenhadas ao mesmo tempo que os passos são dados.

8.4 Erros de Detecção

Com um grande número de medições feitas, em torno de 200 passos, é possível estimar um erro para o sistema. Para cada passo detectado foi calculada uma distância euclidiana do ponto onde ocorreu o passo e essa distância foi considerada como o erro. Foi percebido que nas rotas definidas, o maior erro ocorre na Rota Vai e Volta, em segundo fica a Rota U e a rota onde ocorre a melhor detecção é a Rota Diagonal.

A média de erro é de 0,713m e o desvio padrão do erro é de 0,533m, logo, a maior parte dos passos detectados fica entre 0,18m e 1,25m da posição real dos passos. Raramente um passo vai estar a mais de 1,78m do passo detectado. Este erro não é pequeno, porém para maior parte das aplicações é suficiente. De acordo com Zafari et al. (2015) esse erro é comparável com o de localização por Mapeamento Magnético, Mapeamento por Wi-Fi e localização por Zigbee.

Para diminuir os erros do sistema existem algumas modificações que poderiam ser feitas. O mapeamento feito na seção 6.3.1 propõe uma discretização de 1,2m do espaço, porém uma discretização menor de

0,6m poderia garantir uma precisão maior no sistema final. A seção 8.1.2 também mostra que o aumento no número de sensores pode diminuir o erro. Colocando mais dois sensores em (0,4.2) e (3.9,4.2) seria possível melhorar a precisão do sistema.

9 Conclusão

A microlocalização humana é um dos problemas presentes em muitos sistemas inteligentes. Neste projeto é proposta uma solução usando sensores de vibração que é capaz de microlocalizar uma pessoa. Ao longo do período de trabalho do projeto foi possível desenvolver sensores de vibração de baixo custo, validá-los para funcionamento no ambiente proposto, desenvolver e validar um hardware de tratamento de sinal para estes sensores capaz de isolar somente a informação necessária vinda dos sensores e juntar essas partes com uma central de processamento para formar o sistema de microlocalização. Foi feito um mapeamento de sinais da sala e criado um algoritmo que usa o mapeamento para fazer detecção em tempo real de passos e microlocalização de uma pessoa. O algoritmo consiste da detecção do passo e a aplicação de um modelo de humano.

Foi possível criar um sensor de vibração simples, barato e eficiente, porém as vibrações no chão se mostraram ser difíceis de medir. Os sinais medidos são muito ruidosos, as vibrações geradas pelo passo de uma pessoa se mostraram muito variáveis, podendo ser as vezes fortes e facilmente detectáveis e as vezes tão fracas que se misturam no ruído e se tornam indetectáveis. Mesmo assim os sensores se provaram suficientes para detectar os passos de uma pessoa andando no ambiente proposto.

O chão se mostrou ser um transmissor de vibração muito mais heterogêneo do que previsto, eliminando a capacidade de uso de algoritmos que precisam de um modelo de transmissão de vibrações em velocidade constante. Para ultrapassar este problema foi feito o mapeamento de sinais, que se mostrou ser um método efetivo para trabalhar mesmo em um ambiente heterogêneo.

Os resultados foram satisfatórios e os erros de posicionamento se mostraram semelhantes aos de outros métodos de microlocalização comuns. Para a maior parte das aplicações comuns de microlocalização o erro do sistema é aceitável. Mesmo com as diferenças que cada pessoa possa ter de peso, calçado e velocidade de andar o sistema se mostrou capaz de fazer a microlocalização.

O fato do sistema ser capaz de detectar apenas uma pessoa cria grandes limitações de aplicação do sistema, porém por não ser necessário que o usuário carregue consigo um dispositivo, este sistema tem uma área de aplicação diferenciada.

Existe espaço para melhorar o sistema desenvolvido. É possível reduzir o tamanho do sensor e seria útil criar uma aderência com o chão para que não tenha como uma pessoa retirar facilmente o sensor do chão. Colocando um circuito de potência na eletrônica é possível trazer a alimentação junto do par trançado usado para transmitir a interrupção, tirando a necessidade do sensor estar próximo de uma tomada e diminuindo custos.

A central de processamento pode ser substituída por uma mais barata. O Arduino Nano é uma placa de custo reduzido que poderia ser usada no sistema.

A implementação do algoritmo apresentado por Zheng et al. (2007) é uma pesquisa que deve ser feita na procura por um sistema de microlocalização mais preciso. Funcionando, esse algoritmo não necessitaria de um mapeamento prévio da sala. Modificações podem ser feitas também para melhorar o modelo de humano, aumentando a precisão de microlocalização.

Referências

- Aatique, M. **Evaluation of TDOA techniques for position location in CDMA systems**. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- Apple. **Getting Started with iBeacon**, Junho 2014. Disponível em: <<https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>>. Acesso em: 12 Abril 2015.
- Bluetooth®. **Bluetooth Smart**, 2015. Disponível em: <<http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Smart.aspx>>. Acesso em: 12 Abril 2015.
- Chan, Y. e Ho, K. **A simple and efficient estimator for hyperbolic location**. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 42(8):1905–1915, 1994.
- Foerster, J., Green, E., Somayazulu, S., e Leeper, D. **Ultra-Wideband Technology for Short- or Medium-Range Wireless Communications**. 2001. Disponível em: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/marko/UWB/UWB/art_4.pdf>. Acesso em: 12 Abril 2015, Intel Architecture Labs, Intel Corp., Intel Connected Products Division, Intel Corp.
- Henken, R. **Indoor-localization using a mobile phone**. Master's thesis, University of Groningen, Maio 2014.
- IndoorAtlas. **Indoor positioning made ubiquitous**. Disponível em: <<https://www.indooratlas.com/>>. Acesso em: 12 Abril 2015.
- Institute for Building Efficiency, I. **What is a Smart Building**, Abril 2011. Disponível em: <<http://www.institutebe.com/smart-grid-smart-building/What-is-a-Smart-Building.aspx>>. Acesso em: 09 Abril 2015.
- Kessler, S. S. e Raghavan, A. **Co-Located Triangulation for Damage Position Identification from a Single SHM Node**. 2008. Metis Design Corporation, Cambridge, Estado Unidos.
- Kinsler, L. e Frey, A. **Fundamentals of Acoustics**, 1962. John Wiley & Sons, Inc., 2nd ed., pg. 502.

- Leusmann, P., Mollering, C., Klack, L., Kasugai, K., Ziefle, M., e Rumpe, B. **Your Floor Knows Where You Are: Sensing and Acquisition of Movement Data**. 2011. Disponível em: <http://www.humtec.rwth-aachen.de/files/piezoboden_leusmannmoellering_final_paper.pdf>. Acesso em: 04 Março 2015, Aachen, Alemanha, RWTH Aachen University.
- Mazarakis, G. P. e Avaritsiotis, J. N. **A Prototype Sensor Node for Footstep Detection**. pages 415 – 418, 2005. doi: 10.1109/EWSN.2005.1462036. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=1462036>>. Acesso em: 04 Março 2015, ISBN 0-7803-8801-1, INSPEC 8402509, Dept. of Electr. & Comput. Eng., National Technical University of Athens (NTUA), Atenas, Grecia.
- Rodríguez, R. V., Lewis, R. P., Mason, J. S. D., e Evans, N. W. D. **Footstep Recognition for a Smart Home Environment**. *International Journal of Smart Home*, Vol. 2(No. 2), Abril 2008. Disponível em: <http://www.sersc.org/journals/IJSH/vol2_no2_2008/IJSH-Vol.2-No.2-R04-Footstep%20Recognition%20for%20a%20Smart%20.pdf>. Acesso em: 04 Março 2015, Swansea University, Swansea, Reino Unido.
- Rodríguez, R. V., Mason, J. S. D., Fierrez, J., e Garcia, J. O. **Analysis of Time Domain Information for Footstep Recognition**. G. Bebis et al. (Eds.): ISVC 2010, Part I, LNCS 6453:pp. 489 – 498, 2010. Disponível em: <http://atvs.ii.uam.es/files/2010_ISVC_RVera.pdf>. Acesso em: 04 Março 2015, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, Swansea University, Swansea, Reino Unido.
- Shankar, M., Burchett, J. B., Hao, Q., Guenther, B. D., e Brady, D. J. **Human-tracking systems using pyroelectric infrared detectors**. *Optical Engineering*, 45(10):106401–106401, 2006.
- Teixeira, T., Dublon, G., e Savvides, A. **A Survey of Human-Sensing: Methods for Detecting Presence, Count, Location, Track, and Identity**. *ACM Computing Surveys*, 5, 2010. Disponível em: <http://www.eng.yale.edu/enalab/publications/human_sensing_enalabWIP.pdf>. Acesso em: 04 Março 2015, Yale, Estados Unidos, Yale University.
- Thummalapalli, S. **Wi-Fi Indoor Positioning**. Setembro 2012. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A563953&dswid=2933>>. Acesso em: 12 Abril 2015, Halmstad University, Sweden.
- Zafari, F., Papapanagiotou, I., e Christidis, K. **Micro-location for Internet of Things equipped Smart Buildings**. *CoRR*, abs/1501.01539, 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1501.01539>>. Acesso em: 09 Abril 2015.
- Zheng, J., Lui, K. W., e So, H.-C. **Accurate three-step algorithm for joint source position and propagation speed estimation**. *Signal Processing*, 87(12):3096–3100, 2007.