

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME DE CASTRO LEITE

**CARACTERIZAÇÃO POR MEIO DE ESPECTROGRAMA DOS
PERFIS VIBRACIONAIS DE UMA FERRAMENTA CAPINA
MECÂNICA EM SOLOS DE DIFERENTES UMIDADES**

VIÇOSA

2023

GUILHERME DE CASTRO LEITE

**CARACTERIZAÇÃO POR MEIO DE ESPECTROGRAMA DOS
PERFIS VIBRACIONAIS DE UMA FERRAMENTA CAPINA
MECÂNICA EM SOLOS DE DIFERENTES UMIDADES**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Geice Paula Villibor

VIÇOSA

2023

GUILHERME DE CASTRO LEITE

**CARACTERIZAÇÃO POR MEIO DE ESPECTROGRAMA DOS
PERFIS VIBRACIONAIS DE UMA FERRAMENTA CAPINA
MECÂNICA EM SOLOS DE DIFERENTES UMIDADES**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 14 de Julho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão - Orientador

Universidade Federal de Viçosa

Prof^a. Dra. Geice Paula Villibor - Coorientadora

Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Andre Luiz de Freitas Coelho - Membro

Universidade Federal de Viçosa

Eng. M.Sc. André Luis Carvalho Mendes - Membro

Universidade Federal de Viçosa

*“Só se pode alcançar um grande êxito
quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”
(Friedrich Nietzsche)*

Este trabalho é dedicado primeiramente a Deus, aos meus familiares, minha mãe Marinete, minha avó Cacilda, minha irmã Ana Vitória e meu padrasto Odilon que foram alicerces nessa caminhada.

Dedico também aos amigos que sempre me incentivaram, a equipe do projeto, que sem eles não seria possível, e aos professores que fizeram parte desse processo, em especial a prof.^a Geice, pela oportunidade de desenvolver conhecimento tecnológico dentro da Universidade Federal de Viçosa.

Agradecimentos

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do presente trabalho.

Resumo

A demanda por alimentos orgânicos e a necessidade de diminuir os impactos devido à utilização de defensivos agrícolas, faz com que cultivadores mecânicos ganhem espaço no processo de controle de plantas daninhas em cultivos agrícolas. A problemática é que a interferência das diferentes condições de solo pode influenciar na eficácia da utilização de cultivadores. Por esse motivo, o desenvolvimento de mecanismos autônomos que se adaptem as condições do solo, para ocasionar perturbações que controlem essas plantas daninhas sem prejudicar as culturas, viabilizam maior eficiência no processo de capina. No entanto, para possibilitar o desenvolvimento desses mecanismos, é necessário reconhecer características da interação solo-ferramenta para criar padrões de reconhecimento das diferentes características de solos. Objetivou-se com esse trabalho analisar sinais de vibração da interação de um cultivador mecânico de dentes rotativos em contato com o solo, para diferentes umidades, utilizando um protótipo de uma ferramenta de capina em condições laboratoriais. O sistema de aquisição de dados foi composto por um acelerômetro triaxial MEMS - ADXL345, de baixo custo, e um computador de placa única - Beaglebone Green embarcado ao cultivador. A programação do sistema de aquisição da placa foi realizada em linguagem Python e os dados tratados por meio do software MATLAB para obtenção dos gráficos no domínio do tempo e da resposta em frequência da interação solo-ferramenta. As medições foram realizadas para areia e solo argiloso, com variações no teor de água do solo para uma velocidade angular constante de 200 rpm do rotor do cultivador. A análise no espectro de frequência, a partir da avaliação do regime transitório (início da interação do mecanismo com o solo) e regime permanente (mecanismo em completo contato com o solo), mostrou que é possível correlacionar vibrações características do cultivador. A identificação dos perfis vibracionais possibilitou reconhecer as condições de solo tendo como principal fator de diferenciação a resistência ao cisalhamento do solo.

Palavras-chave: Acelerômetro, Beaglebone, Cultivador, Vibração

Abstract

The organic food demand and the need of reducing impacts of agrochemical usage, has made so that the mechanical cultivators got space in the weeding process. The issue resides on the cultivator efficacy loss which can be influenced by the interference coming from the different soil conditions. For that reason, the development of autonomous mechanisms that adapt themselves to said conditions, using perturbations for weed control without spoiling the cultivation, provides greater efficiency in the weeding process. However, to allow the making of these mechanisms, its necessary to reckonize the characteristics of soil-tool interactions to create known patterns for the soil characteristics. This study aimed to analyze the vibration responses of the interaction of the Rotary teeth mechanical cultivator with the soil, for different moisture scenarios, by using a prototype of a tool in lab conditions. The data acquisition system was made of a Triaxial MEMS-ADXL345 accelerometer, with low budget and a single board computer - Beaglebone Green shipped on the cultivator. The system acquisition programming was made on Python, and the data was treated through MATLAB to obtain graphics for the time plus the soil-tool interaction vibration responses. The measurements were made for sandy and clayish soil, with moisture variations with a constant angular velocity of 200rpm for the cultivator rotor. The analysis on the frequency specter, through the transitory regime (beginning of the interation), showed that it is possible to correlate the cultivator's own vibrations. The identification of the vibrational profiles made it possible to recognize the soil conditions, having as the main differentiating factor the shear strength of the soil.

Keywords: Accelerometer, Beaglebone, Cultivator, Vibration

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Controle mecânico de plantas daninhas.....	15
1.1.1	Cultivadores mecânicos.....	15
1.2	Sistema de aquisição de dados vibracionais.....	16
1.2.1	Acelerômetro.....	16
1.2.2	Acelerômetro MEMS.....	17
1.2.3	Protocolo de comunicação I2C.....	19
1.2.4	Computador de Placa Única.....	19
1.2.4.1	<i>Arduino</i>	20
1.2.4.2	<i>Raspberry Pi</i>	20
1.2.4.3	<i>BeagleBone</i>	20
1.3	Análise vibracional.....	21
1.3.1	Transformada Rápida de Fourier.....	22
1.3.2	Espectrograma.....	22
1.3	Objetivo Geral.....	23
2	Materiais e Métodos.....	23
2.1	Projeto do cultivador.....	23
2.1.1	Acelerômetro MEMS triaxial ADXL345.....	25
2.1.2	BeagleBone Green Wireless.....	25
2.1.3	Módulo Grove – Sensor de umidade.....	26
2.2	Caracterização dos solos.....	26
2.3	Processamento dos dados.....	27
3	Resultados e Discussão.....	28
4	Conclusão.....	31

Referências Bibliográficas	32
----------------------------------	----

Lista de Figuras

Figura 1: Representação do cultivo em linhas e crescimento das plantas daninhas Fonte: KUMAR et al., 2020	16
Figura 2: Sistema massa-mola Fonte: ZONTA, 2023	17
Figura 3: Eixo referente as medições da sensibilidade de aceleração Fonte: ANALOG DEVICES, 2022.....	18
Figura 4: Orientações de referência dos eixos de medição a) vista superior do acelerômetro nas direções X e Y b) vista do acelerômetro referente a orientação da gravidade na direção Z Fonte: ANALOG DEVICES, 2022	18
Figura 5: Topologia de rede do barramento I2C Fonte: BALLESTRIN, 2016.....	19
Figura 6: Comparativo técnico das placas Arduino Uno, Raspberry Pi e Beaglebone Fonte: PEREIRA, 2013	21
Figura 7: Parâmetros de análise de uma onda senoidal Fonte: HANLY, 2022.....	22
Figura 8: Modelo do rotor de hastes utilizado no trabalho Fonte: SOUZA, 2022	24
Figura 9: Mecanismo de capina utilizado para análise de vibração, posicionamento do sensor de vibração, com a disposição dos eixos de referência, bem como o sensor de umidade utilizado Fonte: AUTOR.....	24
Figura 10: Aceleração das vibrações coletadas nos eixos x,y e z analisadas em função do tempo para areia, solo seco e solo úmido Fonte: AUTOR	29
Figura 11: Espectrograma tridimensional da aceleração para os eixos x, y e z para areia, solo seco e solo úmido Fonte: AUTOR.....	30

Lista de Tabelas

Tabela 1: Frações texturais dos solos arenoso e argiloso a partir dos dados de análise granulométrica	26
Tabela 2: Resultados do ensaio do ângulo de repouso	27

1 Introdução

A presença de plantas daninhas é um problema recorrente na agricultura, visto que além de concorrerem por nutrientes com as culturas, são relativamente difíceis de serem eliminadas, gerando perdas econômicas para os produtores. Dentre as formas de controle, o cultivador mecânico automatizado intra-fileiras é de grande interesse por ser um método mecânico, que por consequência dispensa o uso de produtos químicos nocivos à saúde humana e ambiente. A automatização reduz a necessidade do trabalho manual humano, resultando em um aumento significativo da eficiência e diminuição dos custos quando comparado à capina manual, além de também promover um controle mais adequado das plantas (KSHETRI, 2020).

Apesar das vantagens do cultivador autônomo, ainda existem desafios a serem solucionados, sendo um desses, a grande variabilidade das condições de solos durante a operação de capina. Tal variabilidade demanda uma adaptação das ferramentas de capina referente aos parâmetros de um determinado solo, a fim de otimizar seu funcionamento (KSHETRI, 2020). Diversos parâmetros podem influenciar o desempenho da ferramenta de capina, como umidade, resistência à penetração e granulometria. A presença de pedras pode também influenciar na eficiência de alguns cultivadores (MERFIELD, 2016). As características físicas dos solos granulares são determinadas pelas seguintes propriedades: tamanho e forma das partículas, textura superficial e distribuição de tamanhos. Estas características dos grãos influenciam na relação tensão-deformação e na resistência do solo (GUZMÁN, 2008).

Por ser uma máquina de funcionamento mecânico, o cultivador gera vibrações durante seu funcionamento, resultantes de seu movimento e da interação de ruptura do solo, originada pelo fenômeno de cisalhamento. A resistência do solo ao cisalhamento é determinada pelas características coesivas e friccionais entre as partículas do solo, sendo definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (PINTO, 2000). Tais vibrações podem relacionar-se diretamente com as condições do solo trabalhado, gerando um espectrograma de frequências característico que possibilita reconhecer o perfil vibracional do equipamento para diferentes condições de solo.

Com isso, pretende-se melhorar a eficiência dos capinadores mecânicos autônomos, ao reconhecer as características do solo pela vibração, para posteriormente realizar ajustes de parâmetros operacionais na ferramenta de cultivo como, velocidade de rotação do rotor e tempo de operação, para os diferentes perfis vibracionais conhecidos da interação solo-ferramenta.

1.1 Controle mecânico de plantas daninhas

Dente as principais técnicas de controle mecânico, a técnica de arranquio envolve a remoção física das plantas infestantes na cultura, arrancando-as pela raiz, usando as mãos ou uma ferramenta apropriada, sendo a técnica mais antiga empregada para essa finalidade e com baixa eficiência se comparado a métodos mais modernos, por esse motivo, quando utilizada, é em áreas pequenas e para controle localizado. A capina manual para controle de plantas daninhas envolve o uso de uma enxada. Nessa técnica, o agricultor utiliza a enxada para cortar as raízes das ervas daninhas próximas ao solo, removendo-as manualmente, é uma técnica de baixo custo e realizada apenas na linha do cultivo devido ao baixo rendimento da operação (FRONZA & HAMMAN, 2014).

A técnica de roçada envolve o corte ou a poda das plantas indesejadas com o uso de uma roçadeira ou um equipamento similar, a vegetação é cortada rente ao solo, visando remover as partes aéreas das plantas daninhas. Isso reduz o crescimento e a competição por recursos, como nutrientes, água e luz, ajudando a controlar a propagação das plantas indesejadas. Já o cultivo mecanizado pode ser empregado com o uso de tratores ou de tração animal, baseando-se na exposição das raízes das plantas daninhas ao sol e suspendendo a absorção de água com a ação do cultivo (OLIVEIRA & BRIGHENTI, 2018).

1.1.1 Cultivadores mecânicos

Os cultivadores mecânicos, objeto deste trabalho, são máquinas agrícolas projetadas realizar movimentações superficiais no solo para auxiliar no preparo, controle de plantas daninhas e manutenção de plantações. Oferecem também uma abordagem sustentável e eficiente, que faz essas ferramentas agrícolas serem amplamente adotadas como alternativas aos métodos convencionais, como o uso de herbicidas químicos, visando reduzir os impactos ambientais e proporcionar práticas agrícolas mais sustentáveis.

Nos cultivos em linha ou fileiras, Figura 1, as plantas daninhas crescem entre as linhas e dentro das linhas (intra-linhas). As plantas daninhas na zona intra-linhas reduzem a produção de copas em até 33% ou mais (KNEZEVIC, 2002; PERUZZI et al., 2007). Vários sistemas estão disponíveis para fornecer controle eficaz na zona entre linhas, enquanto o controle na zona de intra-linhas ainda é um grande desafio, sendo o maior desafio, o dano as plantas da cultura principal (KUMAR et al., 2020).

Vários sistemas mecânicos foram desenvolvidos e modificados para controle de ervas daninhas dentro da linha, sem a intenção de interferir na cultura. Estes incluem capinador

Finger, capinador *Torsion*, capinador *Brush*, grades de dentes de mola, capinador rotativo e cultivadores. No entanto, requerem condições especializadas de solo e plantas, caso contrário, pode resultar em graves danos ao cultivo (KUMAR et al., 2020).

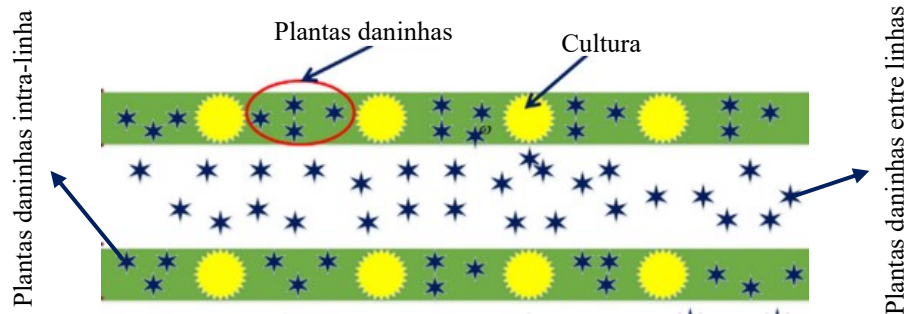


Figura 1: Representação do cultivo em linhas e crescimento das plantas daninhas

Fonte: KUMAR et al., 2020

1.2 Sistema de aquisição de dados vibracionais

1.2.1 Acelerômetro

Acelerômetros são dispositivos capazes de medir a aceleração de um corpo tomando-se como referência a aceleração da gravidade. Quando uma estrutura está sujeita a uma vibração ou aceleração, essa força faz com que a massa do acelerômetro comprima o material piezoelétrico que é sensível à pressão mecânica.

De forma geral, os acelerômetros possuem como sistema básico de funcionamento massa-mola, que se baseia nos princípios físicos da Lei de Hooke, que diz que o deslocamento da mola é proporcional à força aplicada e, da Segunda Lei de Newton para determinar a aceleração do corpo (PUTNAM, 1996), representadas nas equações a seguir:

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

$$F = k \cdot x \quad (2)$$

Onde:

m = massa do corpo;

a = aceleração;

k = constante da mola

x = deslocamento.

A partir das equações 1 e 2 e da Figura 2, evidencia-se como a aceleração pode ser facilmente determinada.

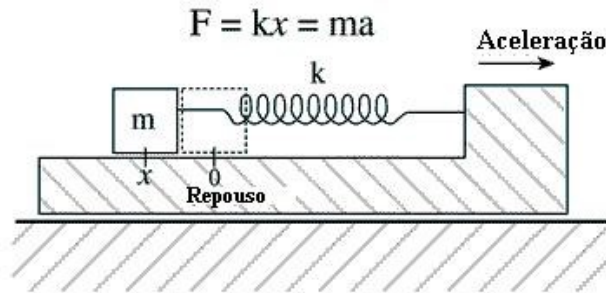


Figura 2: Sistema massa-mola

Fonte: ZONTA, 2023

Ao aplicarmos uma força a esta massa, a mola responderá com uma força proporcional ao seu deslocamento. Isolando-se a aceleração na equação de força da Figura 2, temos:

$$a = \frac{kx}{m} \quad (3)$$

Devido à relação entre a massa do acelerômetro e a aceleração, a carga elétrica gerada pelo material piezoelétrico é proporcional à aceleração. Portanto, medindo a carga elétrica produzida, é possível determinar a magnitude da aceleração ou vibração.

Dos acelerômetros mecânicos destacam-se os capacitivos, os piezoelétricos e os piezoresistivos. Entretanto tais tipos estão sendo substituídos pelos acelerômetros de silício baseados em tecnologia de sistema microeletromecânico (MEMS), que utilizam técnicas de fabricação semicondutora possibilitando tamanho compacto, baixo consumo de energia e custo reduzido (FIGUEIREDO, 2007).

1.2.2 Acelerômetro MEMS

O acelerômetro MEMS é um tipo de transdutor que converte energia mecânica em energia elétrica, e sua função principal é medir a aceleração de um sistema. Consiste em três componentes principais: uma massa sísmica, uma estrutura de molas e placas condutoras. As placas condutoras estão localizadas em ambos os lados da massa sísmica e têm a mesma capacitância quando o sistema está em equilíbrio mecânico. Quando uma aceleração é aplicada à massa sísmica, que está fisicamente conectada às placas dos capacitores, a distância ou área entre as placas condutoras é alterada, resultando em uma mudança na capacitância, essa mudança é proporcional à aceleração aplicada ao sistema (TEZ; AKIN, 2013).

Esses sensores, possibilitam medir aceleração e vibração através da sensibilidade, que estão relacionadas ao descolamento no eixo. O eixo de deslocamento no acelerômetro pode ser uniaxial (em X ou Z), biaxial (em XY ou XZ) ou triaxial (X, Y e Z), dependendo então do acelerômetro tipo MEMS adquirido e para qual finalidade será utilizado (FIGUEIREDO et al.,

2007), a Figura 3 ilustra as direções das medições de aceleração dos eixos de referência do sensor e utilizadas como parâmetro neste trabalho.

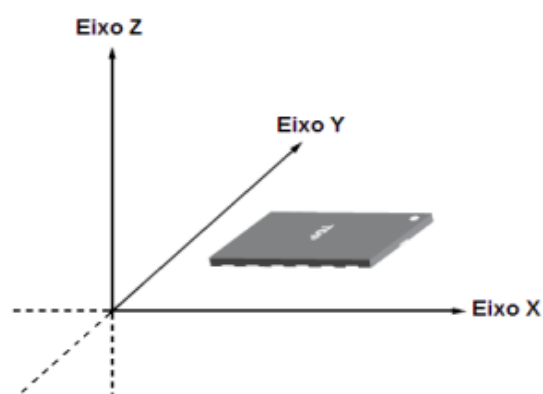
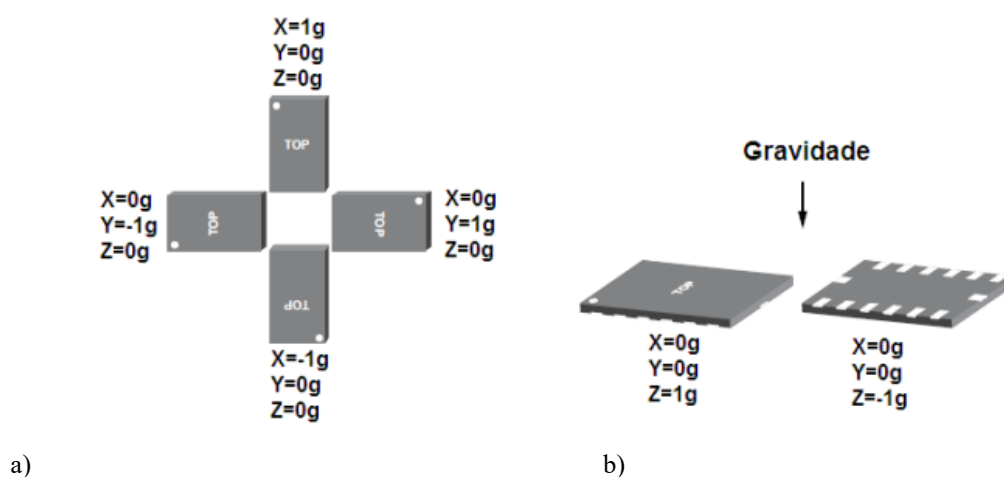


Figura 3: Eixo referente as medições da sensibilidade de aceleração

Fonte: ANALOG DEVICES, 2022

Na Figura 4.a) para os eixos $\pm X$ e $\pm Y$, e na Figura 4.b) para o eixo $\pm Z$, é apresentado as direções de deslocamento do acelerômetro com base nos sinais de saída de cada eixo em função da gravidade (g). Os valores de referência são utilizados para calibração do sensor. O sensor é posicionado no ângulo reto de um dos eixos em relação a gravidade e coletado os valores para ajuste do valor multiplicativo, para obter mais próximo do unitário, que é multiplicado com a gravidade.



a)

b)

Figura 4: Orientações de referência dos eixos de medição a) vista superior do acelerômetro nas direções X e Y b) vista do acelerômetro referente a orientação da gravidade na direção Z

Fonte: ANALOG DEVICES, 2022

1.2.3 Protocolo de comunicação I2C

Uma das principais vantagens do uso de sensores MEMS na criação de sistemas de navegação inercial é a capacidade de integração com interfaces de comunicação digital. O barramento I2C, Figura 5, facilita a integração de circuitos de caráter final de aplicação como por exemplo sensores e conversores, com um sistema de controle, de modo que possam trabalhar sinais de maneira direta com valores reais.

A interface de comunicação I2C, desenvolvida pela Philips para conexão de periféricos à unidade processamento, é composta por um barramento de apenas dois fios, as vias SDA e SCL, que correspondem ao sinal de dados e de *clock*, respectivamente. O protocolo utiliza a topologia mestre-escravo, na qual o mestre é responsável por iniciar a comunicação e o periférico responde apenas aos dados solicitados, utilizando um sinal do mestre para sincronização (RIBEIRO, 2014).

Cada periférico de uma rede possui um endereço, então em todas as comunicações, o mestre indica para qual periférico está destinada a mensagem, não precisando de mais pinos para endereçamento. Dentre as características deste protocolo, destacam a confirmação de recebimento em todas as mensagens trocadas, velocidade máxima limitada a 3,4Mbs, necessidade de dois resistores para *pull-up* externo.

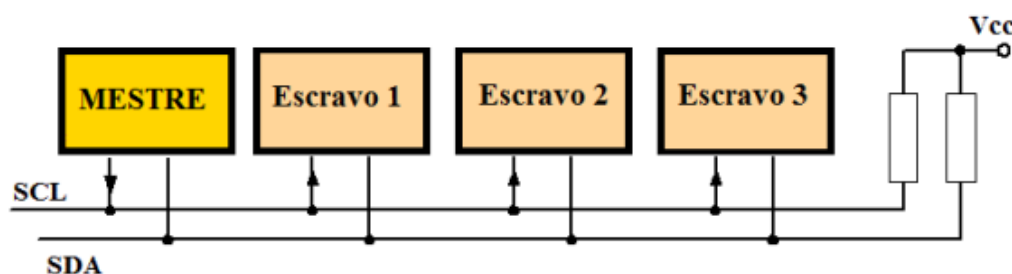


Figura 5: Topologia de rede do barramento I2C

Fonte: BALLESTRIN, 2016

1.2.4 Computador de Placa Única

Computador de placa única o microprocessador, funções de entrada/saída, memória e outros recursos são todos construídos em uma única placa de circuito impresso, com RAM incorporada em uma quantidade predeterminada e com slots de expansão para periféricos. O computador responsável pela aquisição e processamento dos dados extraídos do acelerômetro, sendo uma combinação de *hardware* e *software* projetado para realizar uma função dedicada.

1.2.4.1 Arduino

O Arduino é uma placa com um microcontrolador de baixo custo (KUSHNER, 2011) e, por meio dele, torna-se possível conectar a quase todos os tipos de sensores, luzes, motores e outros aparelhos, sendo ele projetado como uma tecnologia lúdica para ensinar e desenvolver aplicações de eletrônica e programação. Sendo possível, também, construir sistemas interativos e, em seguida, compartilhar o projeto com o mundo, colocando-o na rede e contribuindo com a comunidade aberta do Arduino (PEREIRA, 2013).

O ambiente de desenvolvimento de software Arduino padrão é voltado para a aplicação de programação embarcada, essencialmente C com um IDE simples, mas progrediu significativamente desde o AVR básico de 8 bits e suporte C básico. A maioria das entradas e saídas do é tratada por meio de *shields* do Arduino. Os conectores circundam a maior parte da placa e permitem que a maioria das placas seja usada conectando-as.

1.2.4.2 Raspberry Pi

O Raspberry Pi possui sistema em um chip (SoC) que inclui um processador Arm de 700Mhz, 512 MB de memória RAM, no modelo B, e um processador gráfico (GPU) VideoCore IV com conexão HDMI e RCA. O sistema de armazenamento é por meio de um cartão SD ou pendrive conectado à porta USB (RASPBERRY PI, 2013).

As vantagens do Raspberry Pi sobre o Arduino é o fato dele ter mais memória RAM e velocidade de processamento, além de permitir a instalação de um sistema operacional, bem como dar acesso a diversos periféricos por meio da porta USB, como por exemplo, um modem 3G. Contudo, a desvantagem sobre o Arduino é o consumo de energia que nos modelos A e B do Raspberry Pi está em 300 mA e 700 mA, respectivamente, contra 16 mA.

1.2.4.3 BeagleBone

A plataforma BeagleBone é semelhante ao Raspberry Pi, com sistema operacional Linux e possui Ethernet, USB e suporte gráfico como parte de seu pacote básico, cartão multimídia embutido (eMMC) de 2 Gbytes, ou seja, possui software pronto para ser executado imediatamente e, tem um soquete microSD como o Raspberry Pi.

O BeagleBone Black possui processador AM335x 1GHz ARM Cortex-A8 da Texas Instrument. A placa tem um acelerador gráfico 3D, acelerador de ponto flutuante NEON e inclui um par de Unidades Programáveis em Tempo Real (PRU), que são microcontroladores de 32 bits. O Cortex-A8 é uma plataforma escalar dupla que tem vantagem em desempenho em

comparação com o ARM11 do Raspberry Pi. As placas possuem conectores Ethernet, HDMI e USB.

Além de vir pré-instalado com a distribuição Linux Ångström, um diferencial desse sistema é o suporte a IDE Cloud9, que é um ambiente de desenvolvimento *online* para aplicativos Javascript baseados em Node.js (BEAGLEBOARD.ORG, 2013).

Nome	Arduino Uno	Raspberry Pi	BeagleBone
Modelo	R3	Modelo B	Black
Preço	R\$75,00	R\$250,00*	R\$230,00*
Tamanho	2,95"x2,10"	3,37"x2,125"	3,4"x2,1"
Processador	Atmega328	ARM11	ARM Cortex-A8
Velocidade de Clock	16MHz	700Mhz	700MHz
RAM	2KB	256MB	256MB
Flash	32KB	Cartão SD	4GB (microSD)
EEPROM	1KB	-	-
Tensão de alimentação	7V a 12V	5V	5V
Corrente mínima	42mA	700mA	170mA
pinos GPIO	14	8	65
Entradas analógicas	6	-	7
PWM	6	-	8
I2C	2	1	2
SPI	1	1	1
UART	1	1	5
Interface de Desenvolvimento	Arduino	IDLE, Scratch, Squeak/Linux, Python	Scratch, Squeak, Linux, Python
Ethernet	Apenas com uso de shield	10/100	10/100
USB	-	2 USB 2.0	1 USB 2.0
Saída de vídeo	Pode-se montar	HDMI, RCA	HDMI
Saída de áudio	-	Jack	HDMI

Figura 6: Comparativo técnico das placas Arduino Uno, Raspberry Pi e Beaglebone

Fonte: PEREIRA, 2013

1.3 Análise vibracional

Ao analisar dados de vibração no domínio do tempo (amplitude de aceleração/vibração plotada em relação ao tempo), a análise é limitada a alguns parâmetros para quantificar a força de um perfil de vibração: amplitude, valor de pico a pico e RMS. Uma onda senoidal simples é mostrada na Figura 7 com esses parâmetros identificados.

A vibração é um movimento oscilante em torno de um equilíbrio, portanto, a maioria das análises de vibrações procuram determinar a taxa dessa oscilação ou a frequência. O número de vezes que um ciclo de movimento completo ocorre durante um período de um segundo é a frequência da vibração e é medida em hertz (Hz). Para ondas senoidais simples, a frequência de vibração pode ser determinada observando a forma de onda no domínio do tempo, mas a medida que adicionamos diferentes componentes de frequência e ruído, é preciso realizar uma análise de espectro para obter uma imagem mais clara da frequência de vibração.

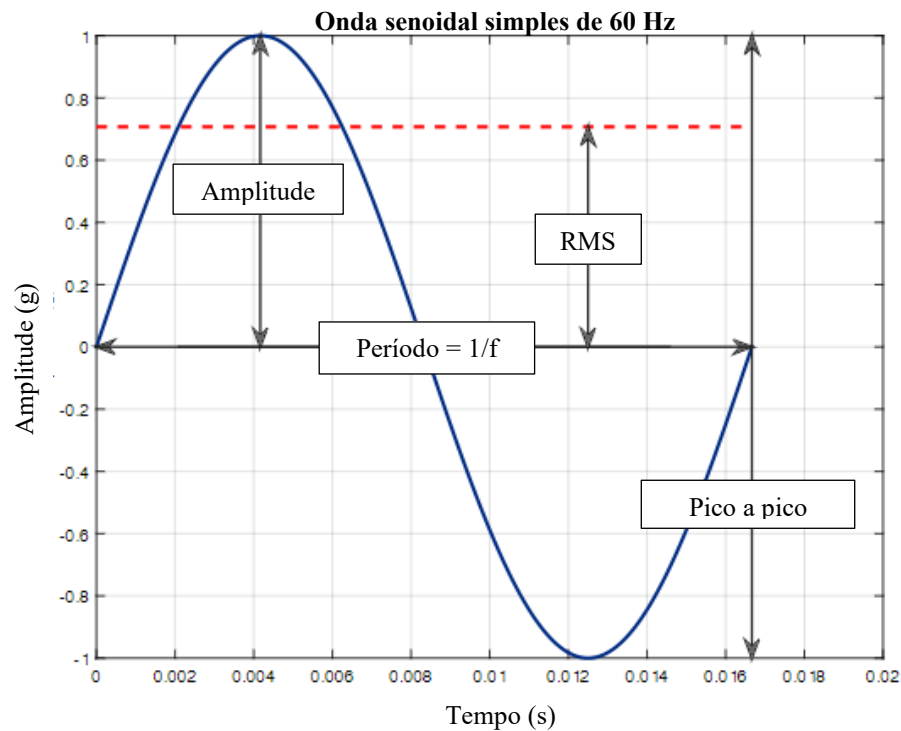


Figura 7: Parâmetros de análise de uma onda senoidal

Fonte: HANLY, 2022

1.3.1 Transformada Rápida de Fourier

Qualquer forma de onda é, na verdade, apenas a soma de uma série de senoídes simples de diferentes frequências, amplitudes e fases. A análise por Fourier ou análise de espectro para desconstruir um sinal em seus componentes individuais de onda senoidal, resulta na amplitude da aceleração/vibração em função da frequência, o que permite realizar análises no domínio da frequência (ou espectro) para obter uma compreensão mais profunda do perfil de vibração (LATHI, 2006).

1.2.4 Espectrograma

Em muitas aplicações, a frequência de vibração muda com o tempo, ao analisar uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) em um ambiente de vibração em mudança, é necessário trabalhar com um espectrograma. O espectrograma funciona dividindo os dados do domínio do tempo em uma série de blocos e obtendo a FFT desses períodos. As séries de FFTs são sobrepostas umas às outras para visualizar como a amplitude e a frequência do sinal de vibração mudam com o tempo (LATHI, 2006).

1.3 Objetivo Geral

A hipótese que precede o trabalho foi que ao se conhecer o perfil vibracional pela análise em frequência do mecanismo de capina para diferentes condições de solo, é possível posteriormente utilizá-los para classificação e conseqüentemente para ajustes operacionais no mecanismo. Dessa forma, objetivou-se com esse trabalho analisar respostas de vibração da interação de um cultivador mecânico em contato com o solo, para diferentes teores de água, utilizando um protótipo de uma ferramenta de capina em condições laboratoriais.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Coletar dados vibracionais em função do tempo nos eixos X, Y e Z do mecanismo de capina, através de um sistema embarcado;
- Avaliar as características dos solos trabalhados;
- Gerar perfis vibracionais de cada solo através do espectro de frequência.

2 Materiais e Métodos

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Projeto de Máquinas, da Universidade Federal de Viçosa. Foi realizada a construção de um cultivador com dentes rotativos, projetado inicialmente para pesquisas a nível de laboratório, com um sistema de aquisição de dados embarcado constituído por um Acelerômetro MEMS triaxial ADXL345 (ANALOG DEVICES, 2022) e um computador de placa única BeagleBone Green Wireless (BBGW, Beaglebone.org).

2.1 Projeto do cultivador

O protótipo de cultivador de dentes rotativos projetado, tem a base fixa e um rotor que gira em torno de um eixo vertical, com quatro hastes que interagem com o solo em profundidade ajustável entre 25 e 50 mm, a Figura 8 apresenta uma simulação computacional do modelo do rotor trabalhado. O acionamento do cultivador é feito por um Motor de Indução de Gaiola Trifásico de 1 CV (MARATHON MOTORS, 2022) controlado por um inversor de frequência, CFW 500 (WEG, 2013), utilizado para ajustar a velocidade de trabalho do rotor.



Figura 8: Modelo do rotor de hastes utilizado no trabalho

Fonte: SOUZA, 2022

Como a velocidade de operação do rotor para perturbação do solo deve ser baixa, foi implementado no cultivador transmissão mecânica por polias e correias com redução 5:1 para que o cultivador opere com velocidade de 200 rpm sem causar danos de sobrecarga ao motor. A Figura 9 mostra o protótipo desenvolvido para os testes de laboratório e a disposição do sistema de aquisição de dados.

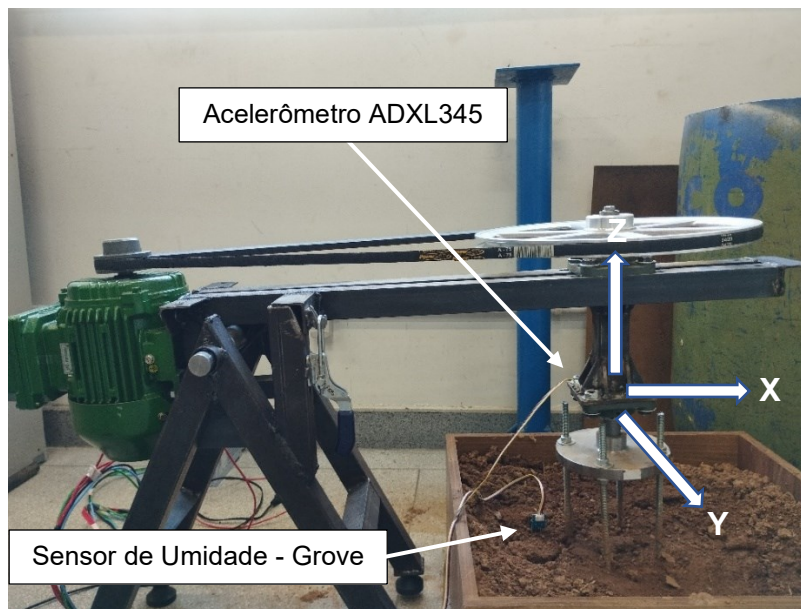


Figura 9: Mecanismo de capina utilizado para análise de vibração, posicionamento do sensor de vibração, com a disposição dos eixos de referência, bem como o sensor de umidade utilizado

Fonte: AUTOR

2.1.1 Acelerômetro MEMS triaxial ADXL345

Acelerômetro MEMS triaxial ADXL345 (ANALOG DEVICES, 2022) é um sensor de aceleração de três eixos baseado na tecnologia de microeletromecânica. Ele é capaz de medir a aceleração em três direções: eixo X, Y e Z.

O sensor ADXL345 possui uma faixa de medição programável de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g ou ± 16 g, sendo capaz de medir acelerações dentro desses intervalos. Possui resolução de 10 bits para detecção de variações de aceleração e sensibilidade que varia de acordo com a faixa de medição selecionada. Por exemplo, para a faixa de ± 2 g, a sensibilidade é de 256 LSB/g (bit menos significativo por gravidade), o que significa que uma mudança de 1 LSB no valor de saída representa uma mudança de $1/256$ g na aceleração medida.

O acelerômetro opera com taxa de amostragem programável de até 3200 Hz, permitindo a captura de dados de aceleração em alta velocidade. O ADXL345 oferece diferentes modos de operação, como medição de alta resolução, medição de baixo consumo de energia, modo de espera e modo de detecção de atividade/inatividade.

A comunicação com outros dispositivos é por meio de protocolos digitais, como I2C ou SPI. Como recursos adicionais, possui detecção de *tap* simples e duplo, detecção de queda livre e detecção de atividade/inatividade. Esses recursos permitem a implementação de funcionalidades avançadas em aplicações que utilizam o sensor.

2.1.2 BeagleBone Green Wireless

BeagleBone Green Wireless (BBGW, Beaglebone.org) é uma placa de desenvolvimento de hardware de código aberto que combina as funcionalidades da BeagleBone Black com recursos adicionais de conectividade sem fio. A placa utiliza um processador ARM Cortex-A8 de 1 GHz, possui 512 MB de memória DDR3 RAM e 4 GB de armazenamento eMMC embutido, além de um slot para cartão microSD para expansão adicional de armazenamento.

A BeagleBone Green Wireless é equipada com conectividade Wi-Fi 802.11b/g/n e Bluetooth 4.1, permitindo a comunicação sem fio. As Interfaces de E/S (Entrada/Saída), inclui portas USB 2.0, portas Ethernet, portas UART, interfaces I2C e SPI, bem como pinos GPIO (*General Purpose Input/Output*) para expansão e conexão com periféricos.

Suporta uma variedade de sistemas operacionais, como Debian, Ubuntu, Android e, possui conectores de expansão compatíveis com *capex*, que são placas de expansão que permitem adicionar recursos extras, como câmeras, *displays*, sensores, entre outros.

2.1.3 Módulo Grove – Sensor de umidade

Um dos tipos de sensores para efetuar a medição da umidade do solo é o Grove Moisture, que mede o índice de água no solo onde está inserido. Esse sensor é constituído por duas sondas revestidas com uma camada de ouro para adiar a deterioração devido à oxidação. O Grove vem acompanhado de um módulo para a sua conexão com o microcontrolador Arduino. Mede o teor de água presente no solo através do princípio da resistência elétrica, onde uma corrente é aplicada nas suas sondas e, dependendo da dificuldade (resistência) que essa corrente encontrar no solo, o valor da quantidade de água varia.

A tensão de entrada desse sensor é entre 3.3 e 5V e o resultado da medição é dado em resistência elétrica (Ω) – quanto maior for o valor de resistência obtido, mais seco estará o solo, já que a água é boa condutora de eletricidade.

2.2 Caracterização dos solos

Antes do início dos testes a análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão, conforme apresentado por Ruiz (2005). Foi realizada para quantificar as frações de solo presentes nos solos arenoso e argiloso, sendo separados em frações de areia grossa, areia fina, silte e argila, caracterizadas na Tabela 1.

Tabela 1: Frações texturais dos solos arenoso e argiloso a partir dos dados de análise granulométrica

	Proporções (kg kg^{-1})	
	Solo arenoso	Solo argiloso
Areia grossa	0,906	0,304
Areia fina	0,048	0,180
Argila	0,035	0,415
Silte	0,011	0,101
Dados utilizados nos cálculos:		
Massa de terra fina seca ao ar	10 g	10 g
Massa de areia grossa	9,34 g	3,02 g
Massa de areia fina	0,50 g	1,80 g
Massa de silte + argila	0,0098 g	0,1030 g
Massa de argila	0,0073 g	0,0827g
Volume da suspensão	500 mL	500mL
Volume coletado	10 mL	10 mL
Fator f	1 kg kg^{-1}	1 kg kg^{-1}

Realizou-se também a determinação do ângulo de repouso do solo, sendo o ângulo de atrito de um material submetido a um esforço praticamente igual a zero, ou seja, sem confinamento (Guzmán, 2008), realizado através do método descrito do cilindro de elevação, em conformidade com Müller et al. (2021). Os resultados definitivos do ensaio de ângulo de repouso estão apresentados na Tabela 2. Foram realizados três testes para cada caracterização de solo seco e a média dos resultados foi considerado o valor representativo de cada amostra.

Tabela 2: Resultados do ensaio do ângulo de repouso

Amostra	Solo arenoso	Solo argiloso
1	37°	38°
2	36°	41°
3	35°	44°
Média	36°	41°

A classificação do teor de água (base seca) dos solos utilizados neste trabalho foi de 9%, 10% e 39%, para areia, solo argiloso seco e úmido, respectivamente. Para definir o teor de água no solo, precedeu a utilização e calibração do Módulo Grove, identificado na Figura 9. A calibração do sensor foi realizada através da medição de quatorze amostras com quantidades diferentes de água.

O valor medido no sensor das quatorze amostras foi comparado com os valores das mesmas amostras, submetidas a completa secagem em estufa a 105°C para determinação do teor de água no solo, padronizada pela norma ABNT NBR 6457/2016. Após os testes foi comparado os valores coletados no sensor e os valores percentuais ajustados por uma equação de linha de tendência relacionando cada amostra. A equação foi utilizada para definir o teor de água de cada solo do trabalho, medido pelo Módulo Grove e aplicado a equação da linha de tendência para obtenção dos valores em percentagem.

2.3 **Processamento dos dados**

A programação foi realizada através do ambiente de desenvolvimento integrado Cloud9 IDE da Beaglebone e o script para aquisição de dados escrito em linguagem python através da *Adafruit Unified Sensor Library*. As medições de vibração foram salvas no cartão SD da placa Beaglebone, em formato .csv, e transferidas para um computador, para os dados de vibração do mecanismo serem tratados por meio do software MATLAB. Os níveis de vibração foram coletados no domínio do tempo em função da aceleração da gravidade (g) para três condições de solo: solo arenoso, solo argiloso seco e solo argiloso úmido. A frequência de rotação do

disco circular foi de 3,33 Hz, equivalente à velocidade angular de 200 rpm. O sensor MEMS ADXL345 utilizado possui taxa de amostragem de 100 Hz e produz leitura correta para componentes de frequência de até 50 Hz, segundo o teorema de Nyquist, em que a frequência de amostragem deve ser no mínimo o dobro da frequência do sinal amostrado, para que não ocorra o efeito do *aliasing* (LATHI, 2006). Para maior precisão nos dados do sensor, foi realizada a calibração para a referência gravitacional, determinado um valor de correção a partir dos dados de referência do sensor em cada eixo de medição.

O acelerômetro foi montado no mancal mais próximo ao rotor. Cada medição de vibração teve duração de aproximadamente 10 segundos com uma coleta de 1024 amostras, valor definido para possibilitar o processamento do sinal no MATLAB, através do algoritmo FFT, sem necessitar de um complemento de decimação no tempo devido ao comprimento do sinal ser uma potência de dois, que possibilita a transformação e divisão dos dados para explorar as simetrias do sinal no espectro (MATHWORKS, 2022).

As vibrações mecânicas foram caracterizadas por acelerações nos eixos x, y e z. Conforme apresentado na Figura 14, o eixo x está ao longo do comprimento do braço giratório, o eixo y ao longo da direção axial ao eixo de velocidade angular dos dentes rotativos e o eixo z está na direção transversal do braço giratório. Para as três condições de solo analisadas, os níveis de vibração partindo da operação do mecanismo a vazio até o contato e penetração no solo foram coletados. Os dados de aceleração em regime transitório, momento em que os dentes rotativos iniciam contato com o solo, e em regime permanente no qual dentes rotativos operam em completo contato com o solo, foram obtidos para a análise no domínio da frequência através do espectrograma resultante.

Os solos foram inseridos em uma caixa de madeira com dimensões de 0,50 m x 0,50 m x 0,20 m preenchida até 0,15 m. As hastes rotativas do cultivador foram ajustadas para uma penetração de 50 mm. Foram realizados três testes para cada tipo de solo para investigar os níveis de vibração no cultivador gerados pela interação solo-ferramenta.

3 Resultados e Discussão

A coleta dos valores de aceleração no domínio do tempo proporcionou um primeiro aspecto das características vibracionais do equipamento na interação com o solo. No entanto,

por se tratar de vibrações “aleatórias” com o movimento de muitas frequências ao mesmo tempo, os valores de aceleração pelo tempo limitam a quantificar um ambiente de vibração, por não se obter um padrão vibracional, além das diferentes componentes de frequência e ruídos gerados, conforme pode-se observar na Figura 10.

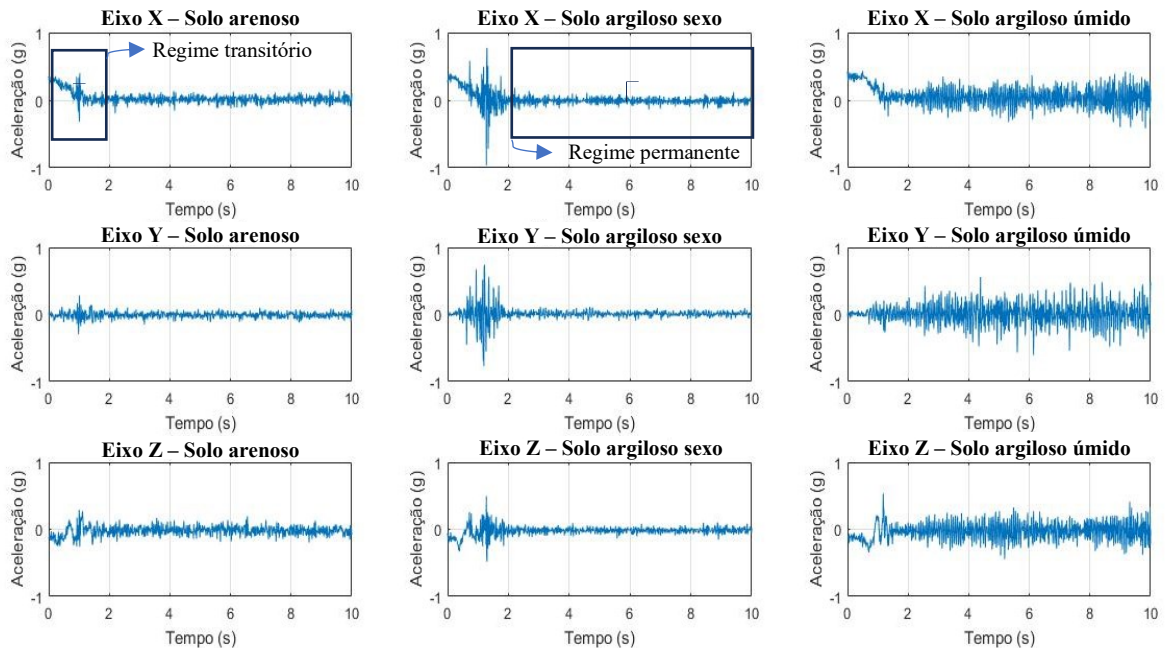


Figura 10: Aceleração das vibrações coletadas nos eixos x,y e z analisadas em função do tempo para areia, solo seco e solo úmido

Fonte: AUTOR

Como as características vibracionais mudaram com o tempo, devido ao mecanismo iniciar a operação a vazio até a penetração dos dentes rotativos no solo, foi realizada a desconstrução do sinal em componentes individuais de frequência em função da aceleração. Para obter uma compreensão mais aprofundada do perfil de vibração, a análise pelo espectrograma possibilitou a visualização do gráfico em superfície tridimensional. O eixo das abscissas foi caracterizado pelo tempo (s), o eixo das ordenadas frequência (Hz) e o eixo das cotas a amplitude do sinal, conforme apresentado na Figura 11, para as diferentes características de solo.

A amplitude do sinal no regime transitório foi característica para cada solo. A diferença da disposição das frequências dominantes em função do tempo tem como principal fator a diferença de umidade nos solos argilosos, que altera as características de resistência ao cisalhamento de acordo com Bugs (2015). Para o solo arenoso, partículas de areia são consideradas não coesivas, ou seja, não se mantêm unidas a outras partículas (E-DISCIPLINAS

USP, 2023), como pode ser observado pelo perfil de vibração da ferramenta em contato com a areia, que se assemelha a vibração natural do próprio mecanismo. Portanto, propriedades e características dos solos arenosos diferem das dos solos argilosos, que apresentam propriedades coesivas e adesivas na presença de umidade suficiente (AIKINS, K.A.; UCGUL, M.; BARR, J.B.; AWUAH, E.; ANTILLE, D.L.; JENSEN, T.A., 2023).

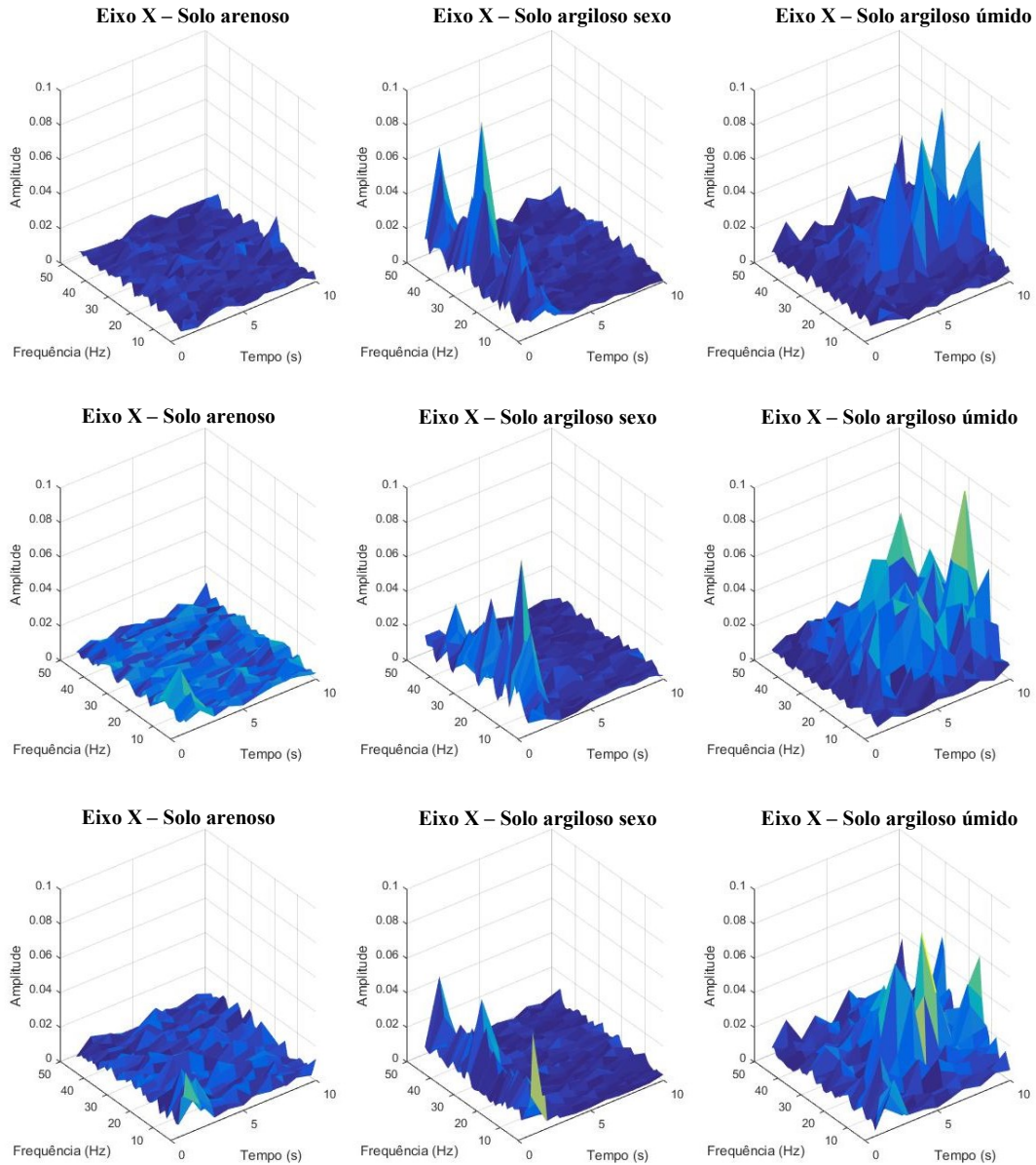


Figura 11: Espectrograma tridimensional da aceleração para os eixos x, y e z para areia, solo seco e solo úmido

Fonte: AUTOR

Os picos gerados no momento de choque, intervalo entre 0 e 2 segundos, se destacaram no solo seco devido à maior resistência do solo ao cisalhamento, gerando maior concentração

de energia distribuída ao longo do período transitório em todos os eixos X,Y e Z para romper a camada superficial, caracterizada como consistência seca (EMBRAPA, 2018). No período em regime permanente, com os dentes rotativos a uma profundidade de trabalho de 50 mm, a areia e o solo seco não caracterizam concentrações específicas de energia em frequências dominantes, devido a diminuição da densidade aparente, mudança de posição nas três dimensões e troca relativa de posições das partículas soltas do solo argiloso seco, como é definida a perturbação do solo por ferramentas, por Wang et al. (2023).

Para o solo úmido observou-se maior amplitude no perfil vibracional do cultivador após o período transitório, devido ao primeiro momento de interação apresentar menor resistência de cisalhamento por conta da maior concentração de água, que aumenta as características de plasticidade e pegajosidade de solos argilosos (E-DISCIPLINAS USP, 2023), caracterizada como consistência molhada (EMBRAPA, 2018). Durante os 10 segundos da coleta dos valores vibracionais de interação, o solo úmido destacou com maiores amplitudes de vibração no regime permanente por causa da maior aderência do solo aos dentes, analisada após a realização do experimento. O acúmulo de solo causa desequilíbrio dos dentes rotativos e consequentemente o aumento da aceleração em todos os eixos.

4 Conclusão

Comparando os perfis de vibração gerados pela interação solo-ferramenta, as características vibracionais de cada solo mudam no processo transitório e permanente. Ao analisar apenas um dos regimes, foi mais difícil de reconhecer o perfil vibracional, pois solos secos resultam em maior energia no período transitório para romper a camada com maior resistência ao cisalhamento. Porém, após esse primeiro processo, o mecanismo opera sem muitas variações vibracionais, se assemelhando ao perfil vibracional da areia. Solos com maior percentagem de água tem menor resistência de penetração pelos dentes rotativos. Contudo, resultam em maiores distúrbios vibracionais no regime permanente, atingindo os maiores picos de aceleração no final do processo, quando o solo tem maior aderência aos dentes do cultivador.

As vibrações mecânicas do cultivador para reconhecimento dos solos pelo espectrograma se mostraram promissoras utilizando um sistema de baixo custo e de fácil operacionalização. Mesmo estando em fase inicial de estudos, a coleta e identificação dos perfis

de cada solo podem possibilitar a realização de um controle adaptativo na velocidade e no tempo de operação pelo mecanismo de forma autônoma, para melhorar a eficiência no processo de capina em um mesmo cultivo com diferentes condições de solo.

Referências Bibliográficas

AHMAD, M. T. B. Development of Automated Mechanical Intra-Row Weeder for Vegetable Crops. 2012. 118 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Iowa State University, Ames, Iowa, 2012.

AIKINS, K.A.; UCGUL, M.; BARR, J.B.; AWUAH, E.; ANTILLE, D.L.; JENSEN, T.A.; DESBIOLLES, J.M.A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. *Agriculture* 2023, 13, 541. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>>. Acesso em 5 de abril de 2023.

AMER, M. H. Diseño y desarrollo de um cultivador. Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales Grado en Ingeniería Mecánica. 215 f. Trabajo de conclusão de curso – Universitat Jaume, Castellón, 2018.

ANALOG DEVICES. Data Sheet ADXL345. One Analog Way, Wilmington, 10 de maio de 2022. Disponível em: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>. Acesso em: 21, out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, p. 8. 2016.

BALLESTRIN, R. V. F. Redes de sensores sem fio de baixo custo para caracterização de vibrações em transporte de cargas críticas. 58 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BEAGLEBOARD.ORG. SeedStudio BeagleBone Green Wireless. Disponível em: <https://beagleboard.org/green-wireless>. Acesso em: 21, out. 2022.

BOWMAN, Greg. STEEL IN THE FIELD: a farmers guide to weed management tools. Beltsville, Maryland: Sustainable Agriculture Network, 2002.

BUGS, C. A. L. Avaliação da influência da variação da umidade na resistência ao cisalhamento de solos. 2015. 113 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. Brasília, 2018. 356p.

E-DISCIPLINAS USP. Arquitetura e Propriedades Físicas do Solo. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2749790/mod_resource/content/1/Apostila_LSN_310_%20F%C3%ADsica%20do%20Solo.pdf>. Acesso em 5 de abril de 2023.

FIGUEIREDO, L. J., GAFANIZ, A. R., LOPES, G. S.; PEREIRA, R. Aplicações de Acelerômetros. Monografia (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2007.

FRONZA, D.; HAMANN, J. J. Implantação de pomares. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico; Rede e-Tec Brasil, 2014.

GRIEPENTROG, H.W., NORREMARK, M., NIELSEN, J. Autonomous intra-row rotor weeding based on GPS. In CIGR World Congress, 7. Bonn, Germany. International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, 2006.

GUZMÁN, D. Comparación del ángulo de fricción crítico con el ángulo de reposo. Análisis de la influencia de algunos factores en la determinación del ángulo de reposo. 2008. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Bogotá. 2008.

HANLY, S. H. Figure 16: A simple 60 Hz sine wave is shown with the amplitude, peak-to-peak, RMS, frequency, and period identified. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318827258_Shock_Vibration_Testing_Overview_e-Book/figures?lo=1> Acesso em 21 de outubro de 2022.

KNEZEVIC, S.Z.. The Concept of Critical Period of Weed Control. Cooperative Extension, University of Nebraska, Integrated Weed Management, 2002.

KSHETRI, SAFAL. Study of soil-tine interaction for the application of automated mechanical weeder. 2020. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Agricultural And Biosystems Engineering, Iowa State University, Ames, 2020.

KUMAR, S. P.; TEWARI, W.K.; CHANDEL, A. K.; MEHTA, C.; NARE, B.; CHETHAN C.; MUNDHADA, K.; SHRIVASTAVA, P.; GUPTA, C.; HOTA, S. A fuzzy logic algorithm

derived mechatronic concept prototype for crop damage avoidance during eco-friendly eradication of intra-row weeds. *Artificial intelligence in agriculture*, 2020.

LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 856p.

MARATHON MOTORS. Motores IP55 premium IR3 TerraMAX. Disponível em: <https://www.regalrexnord.com.br/uploads/6zdk9494qhgrwehp25ru.pdf>. Acesso em 21 de outubro de 2022.

MATHWORKS. Fast Fourier transform. Help Center. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>. Acesso em 23 de outubro de 2022.

MERFIELD, CN (2016). Robotic weeding's false dawn? Ten requirements for fully autonomous mechanical weed management. *Weed Research* 56, 340– 344.

MÜLLER, Dominik; FIMBINGER, Eric; BRAND, Clemens. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis. *Powder Technology*, v. 383, p. 598-605, 2021.

OLIVEIRA, M. F. de; BRIGHENTI, A. M. *Controle de plantas daninhas: métodos físico, mecânico, cultural, biológico e alelopatia*. Brasília, DF: Embrapa, 2018.196p

PARK, J; MACKAY, S. *Data acquisition for Instrumentation and Control System*. 425 f. Los Angeles, CA, USA: Elsevier, 2003.

PEREIRA, R. B. O. *Implementação por sistemas embarcados de protótipo parametrizável para coleta de dados microclimáticos Georreferenciados*. 157 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

PERUZZI, A., GINANNI, M., RAFFAELLI, M., FONTANELLI, M. Physical weed control in organic fennel cultivated in the Fucino Valley (South Italy). *Proceedings of the 7th Workshop of the EWRS Working Group on Physical and Cultural Weed Control*. Salem, Germany, 2007

PINTO, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo, Oficina de Textos, 2000. 247p.

PUTNAM, W., KNAPP, R. B. *Input/Data Acquisition System Design for Human Computer Interfacing*. 1996.

RIBEIRO, G. S. *Emulação de uma unidade de medições inerciais para testes Hardware-in-the-Loop*. 100 f. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RUIZ, HUGO A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2005 Apr;29(2):297–300.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200015>>. Acesso em 23 de outubro de 2022.

SANTOS, THALES C. Classificação das condições de solo com base nas vibrações provenientes da interação solo-ferramenta de um cultivador mecânico autônomo. 39 f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2022

SOUZA, R. S. J. Análise computacional por elementos discretos da interação solo-ferramenta de um cultivador mecânico. 2022. 26f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

TEZ, S.; AKIN, T. Fabrication of a sandwich type three axis capacitive MEMS accelerometer. Sensors. 4 f. IEEE SENSORS, 2013.

VILLIBOR, GEICE. P.; STEWARD, BRIAN. L.; LUECKE, GREG. R.; QUEIROZ, DANIEL. M.; Vibrations levels assessment of a robotic intra-row weeder using low-cost data acquisition system. ASABE Annual International Meeting, Paper Number: 1700652, 2017.

WANG, X.; FANG, W.; HAN, D.; CHEN, X. Review of the Research on Soil Disturbance by Tools. Appl. Sci. 2023, 13, 338. <https://doi.org/10.3390/app13010338>

WEG. CFW500 Inversor de Frequência. Grupo WEG - Unidade Automação, Jaraguá do Su, dez. de 2013. Disponível em: <https://catalogo.mksreduutores.com.br/Asset/Inversor-de-Frequencia-WEG---CFW500.pdf>. Acesso em: 21, out. 2022.

ZONTA, G. R. Funcionamento do Acelerômetro. Trabalho de Instrumentação Eletrônica - Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Professor Eduardo Parente. Disponível em:

<<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/giorgio/Funcionamento.htm> > Acesso em: 10 de Junho de 2023.