

Sistema embarcado baseado em acelerômetro para monitoramento de mesa vibratória gravimétrica

Accelerometer-based embedded system for gravimetric vibrating table monitoring

Bruno de Souza Bezerra¹; Cauã Macêdo do Nascimento²; Fabricio Domingos da Silva³; Júlio Azevedo da Costa⁴; Moroni Neres Vieira⁵; Gabriell John Medeiros de Araujo⁶; Wagner de Oliveira⁷

Resumo

Este artigo documenta uma pesquisa desenvolvida dentro do programa EmbarcaTech com objetivo de projetar e construir um sistema embarcado para monitoramento de parâmetros de uma mesa vibratória gravimétrica, utilizada para separação de pequenas partículas de minério com densidade elevada. A mesa objeto desta pesquisa é utilizada pelo Centro de Tecnologia Mineral do IFRN para realização de estudos quantitativos que aferem a influência de parâmetros da mesa, principalmente a inclinação da plataforma móvel e a intensidade da vibração dela, no fator de recuperação do minério. O sistema embarcado foi projetado para resolver um problema da mesa gravimétrica, a ausência de mostradores para os parâmetros. A metodologia do trabalho se baseou no levantamento dos requisitos necessários ao sistema, por meio de consultas diretas aos profissionais da área de mineração do Centro, seguida de etapas de prototipagem eletrônica, integração de software, testes e validações. O sistema embarcado projetado tem como elemento de processamento um microcontrolador ESP-32 e como elemento sensor um chip MPU-6050, capaz de medir vetor aceleração nos três eixos. Os resultados parciais demonstraram a capacidade do sistema embarcado em medir a inclinação da mesa e criar um sistema de níveis para aferir a vibração da plataforma.

Palavras-chave: Mesa gravimétrica; Sistema embarcado; Sensor vibração; Sensor inclinação.

¹ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: brunnodesouzabezerra@gmail.com

² Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: caua.macedo.n@gmail.com

³ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: fabriciodomingos01@gmail.com

⁴ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: eng.julioazevedodacosta@gmail.com

⁵ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: moroni.neres@ifrn.edu.br

⁶ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: gabriell.araujo@ifrn.edu.br

⁷ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: wagner.oliveira@ifrn.edu.br

ABSTRACT

This article documents a research project developed within the EmbarcaTech program with the objective of designing and building an embedded system for monitoring the parameters of a gravimetric vibrating table, used for the separation of small high-density ore particles. The table studied in this research is used by the Centro de Tecnologia Mineral do IFRN to carry out quantitative studies that assess the influence of the table's parameters — mainly the inclination of the moving platform and the intensity of its vibration — on the ore recovery factor. The embedded system was designed to solve a limitation of the gravimetric table: the absence of parameter displays. The methodology of the work was based on surveying the system requirements through direct consultations with mining professionals at the Center, followed by stages of electronic prototyping, software integration, testing, and validation. The designed embedded system uses an ESP32 microcontroller as its processing element and an MPU-6050 chip as the sensing element, capable of measuring acceleration vectors along three axes. Partial results demonstrated the capability of the embedded system to measure the table's inclination and create a level-based system to assess the platform's vibration.

Keywords: Gravimetric table; Embedded system; Vibration sensor; Inclination sensor.

1 INTRODUÇÃO

O município de Currais Novos, Rio Grande do Norte, onde este trabalho se desenvolve, já foi reconhecido mundialmente pela mineração de scheelita (CaWO_4), fonte de tungstênio usado, pela indústria, para criação de ligas metálicas com características de elevada dureza e resistência às altas temperaturas. Historicamente, o início da exploração de scheelita data de 1943, com a descoberta das reservas da Mina Brejuí. Num cenário de Segunda Guerra Mundial e posterior Guerra Fria, o mercado para o tungstênio aquecido pelas demandas da indústria bélica alavancou o desenvolvimento local (Santos; Dantas, 2013).

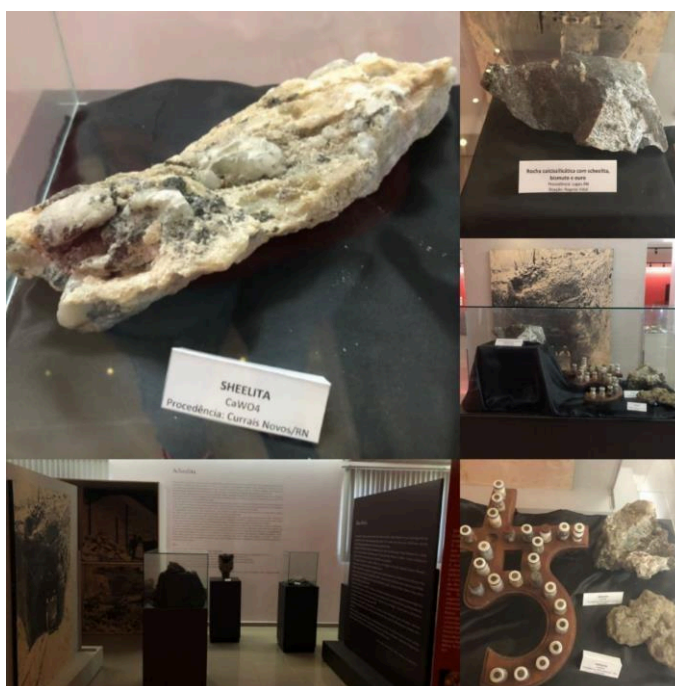
A mineração de scheelita no Rio Grande do Norte enfrentou um ponto de inflexão nas décadas seguintes. A partir dos anos 1980 e 1990, com a entrada da China no mercado global e o aumento exponencial de sua produção, houve uma queda drástica nos preços do tungstênio. Segundo Santos e Dantas (2013), essa oferta chinesa com custos reduzidos inviabilizou a produção em várias minas brasileiras, levando à paralisação de atividades e exigindo que mineradoras locais, como a Brejuí, buscassem alternativas como o turismo para sobreviver à crise. A própria Mina Brejuí mantém, em suas dependências, ainda hoje, o Museu Mineral Mário Moacyr Porto, que documenta a história da exploração do minério no município. O Museu de Minérios do Rio Grande do Norte também traz, no acervo, amostras de scheelita do município de Currais Novos, como mostra a Figura 1.

A relação entre o município de Currais Novos e a atividade mineradora transcende a mera dinâmica econômica. Durante o apogeu da mineração, a arrecadação proveniente da venda do mineral permitiu a construção de uma infraestrutura vital para a região. Conforme

destacam Santos e Dantas (2013), os lucros da exploração, especialmente sob a gestão da Mineração Tomaz Salustino S/A, foram convertidos em obras sociais, incluindo a construção de casas, igrejas, escolas e hospitais que servem à população até os dias atuais.

Contudo, o cenário atual exige novas estratégias. As indústrias de beneficiamento de scheelita no Brasil ainda apresentam baixa eficiência na lavra, ocasionando uma grande quantidade de rejeitos desperdiçados que poderiam ser reaproveitados (Santos; Dantas, 2013). A viabilidade econômica das plantas atuais depende, portanto, da eficiência operacional para recuperar o minério fino perdido. Maximizar essa recuperação tornou-se um imperativo para a manutenção da atividade no Seridó.

Figura 1 - Amostras de scheelita no Museu de Minérios do RN.



Fonte: Sara Suriel.

Nesse contexto de esgotamento de minérios de alto teor e de aumento na competitividade internacional, ocorre um movimento que busca maior eficiência nos meios de produção nas empresas de mineração locais. Essa busca se traduz na melhoria do maquinário. De início, esse maquinário foi concebido para atuar com baixo nível de instrumentalização, sendo sua utilização e regulação altamente dependentes da experiência empírica do seu utilizador. Mas, num cenário de concentração menor de minério e preço baixo, influenciado pelas tecnologias adotadas em outros países, as margens de erro se tornam muito pequenas.

Dessa forma, temos ajustes de parâmetros como taxa de alimentação, granulometria, pressão, vibração e velocidade de rotação sub-ótimos, que vão se acumulando ao longo da

linha de produção dos minérios e que resultam num desgaste prematuro dos componentes, maior consumo energético e, em geral, uma eficiência menor.

Máquinas expostas a sobrecargas, desalinhamentos ou condições fora de projeto podem apresentar falhas mecânicas recorrentes, paradas não programadas e redução significativa de sua vida útil, de forma que a falta de instrumentação adequada e de estratégias de controle torna os sistemas minerais altamente reativos, operando frequentemente em condições subótimas, guiadas mais pela correção de falhas do que pela otimização do processo (Dias, 2023).

A inserção de sensores e sistemas eletrônicos reduz a dependência em relação à percepção humana no processo industrial. Assim, é possível adquirir dados, implementar técnicas de manutenção preditiva e análise dos dados para um funcionamento otimizado do maquinário. Sendo possível, por exemplo, aplicar tecnologias recentes como Big Data e até mesmo o uso de Inteligência Artificial (Crepalde, 2017).

O objeto de estudo deste trabalho é uma mesa gravimétrica que realiza separação de minérios. O trabalho propõe a construção de um sistema de aquisição de dados, baseado em um sensor acelerômetro, capaz de extrair dados de vibração e inclinação da mesa. A partir do processamento digital dos dados, fornecer informações que possibilitem, aos operadores, obter parâmetros de controle ótimos para as características do minério a ser recuperado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As plantas de separação de minérios são essenciais à indústria mineradora, pois permitem separar, de maneira mais rápida e eficaz, minérios encontrados em pequenas proporções dentro de outros materiais com menor valor comercial. Algumas plantas se baseiam em processos puramente físicos, como é o caso da mesa gravimétrica, objeto deste estudo. Neste caso, dificilmente se consegue atingir pureza máxima. Mesmo assim, se consegue amostras com concentração muito elevada do minério alvo. Por isso, a separação é, por vezes, referida como um processo de enriquecimento de minério.

Entre os diversos métodos utilizados na separação de minério, a mesa gravimétrica destaca-se por sua capacidade de separar partículas muito pequenas com base na diferença de densidade, sem necessidade de produtos químicos.

2.1 Mesas gravimétricas

Mesa gravimétrica, mesa vibratória ou mesa de concentração dissimétrica são expressões que definem um mesmo equipamento. Uma estrutura com uma plataforma móvel

que vibra para separar grãos da agricultura ou minérios, a partir da diferença de densidade em relação a outras partículas. A plataforma móvel apresenta ranhuras lineares em alto relevo, responsáveis por direcionar as partículas mais pesadas (concentrado) para pontos pré determinados da estrutura. Além da plataforma móvel, as mesas gravimétricas necessitam de reservatório para entrada de polpa (mistura pastosa de minério e água), vias de controle para o fluxo da água injetada, calhas de captação e sistema de vibração, formado por um motor e conjunto de acoplamentos mecânicos que transformam o movimento de rotação do motor em vibração sobre a mesa.

A Figura 2 ilustra uma mesa gravimétrica, detalhando a plataforma móvel (em verde), o motor, sistema de acoplamento e base (em azul), sistemas de entrada de polpa, água e calhas de recolhimento (em cinza).

Figura 2 - Mesa gravimétrica.



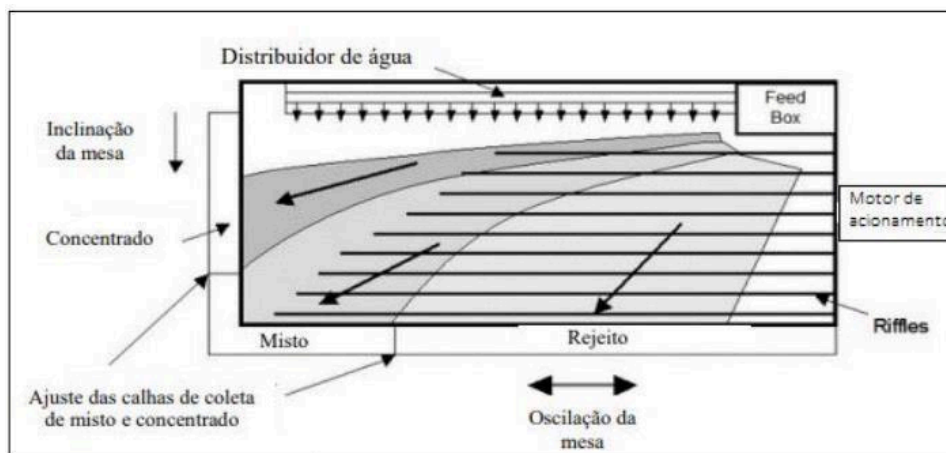
Fonte: Engendrar.

A compreensão sobre o funcionamento da mesa gravimétrica passa pela visualização do fluxo do material sobre a plataforma móvel. A Figura 3 ilustra uma vista superior da mesa gravimétrica. As estruturas da parte superior da imagem, distribuidor de água e *feed Box* são utilizados para injeção de água e polpa, respectivamente. A superfície da mesa apresenta ranhuras paralelas (*riffles*), que têm a função de criar zonas de turbulência na polpa de minério. Quando a mistura de água e polpa é alimentada na mesa, os minerais mais pesados deslizam pelas ranhuras, enquanto os minerais menos densos são carregados pela água para áreas de descarte. A figura destaca a zona de concentrado, com maior percentual de minério, a zona mista, com baixa concentração de minério, e a zona de rejeito, onde a concentração de minério é insuficiente para ser recuperada pelo método.

O limite entre as zonas de concentrado, mista e rejeito não são fixas, dependem da quantidade de água injetada, da vibração e ângulo de inclinação da mesa, da concentração de minério na polpa. As zonas sofrem deslocamentos e as calhas de recolhimento precisam ser

redirecionadas.

Figura 3 - Funcionamento da mesa gravimétrica.



Fonte: (Petrosa, 2019, p.31).

Existem mesas de diversos tamanhos e formatos, adequadas a diferentes volumes de processamento e características do minério. A altura das ranhuras (*riffles*) também é um fator importante. A mesa utilizada no CT Mineral, embora menor que as industriais, possui capacidade significativa e não pode ser considerada pequena, sendo suficiente para estudos e testes de separação eficientes.

2.2 CT-16W

O estudo é realizado sobre a mesa de concentração modelo CT-16W, cujas especificações técnicas exercem influência direta sobre o comportamento vibracional analisado. Segundo o manual de instruções do equipamento, a mesa possui dimensões externas de 977 mm de largura, 2.197 mm de comprimento e 1.179 mm de altura, com massa aproximada de 300 kg. A Figura 4 mostra a mesa do CT Mineral.

Figura 4 - Mesa gravimétrica da pesquisa.

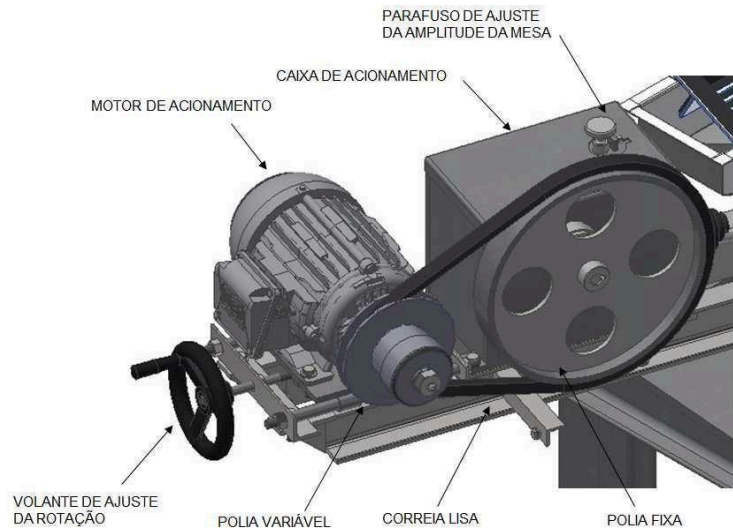


Fonte: Cedida pelo CT Mineral.

O sistema de acionamento é composto por um motor trifásico de 0,75 kW, alimentado em 220, 380 ou 440 V a 60 Hz. A plataforma móvel apresenta dimensões de 530 mm de largura e 1.270 mm de comprimento, sendo montada sobre um sistema mecânico que permite o ajuste do ângulo de inclinação da mesa entre 0° e 15°, a variação da amplitude do movimento excêntrico entre 9 mm e 20 mm e o controle da velocidade de oscilação por meio de polias, podendo atingir até 480 rotações por minuto. Esses parâmetros permitem modificar o regime de vibração da mesa e, conseqüentemente, influenciar o desempenho da separação mineral, o que reforça a importância do monitoramento vibracional desenvolvido neste trabalho (INBRAS, 2023).

Dentre os componentes de maior importância para alcançar os parâmetros corretos de separação de materiais em uma mesa vibratória é a manivela ou volante de ajuste da vibração, como é denominada tecnicamente no manual da mesa de concentração na mesa vibratória, como pode ser visualizado na Figura 5, ela é essencial para os ajustes operacionais. Esse ajuste é necessário para alterar a amplitude ou força de vibração, com o objetivo de parametrizar a distância da polia do volante do motor de acionamento e a polia do sistema da plataforma, dessa forma realiza-se o controle da intensidade de vibração.

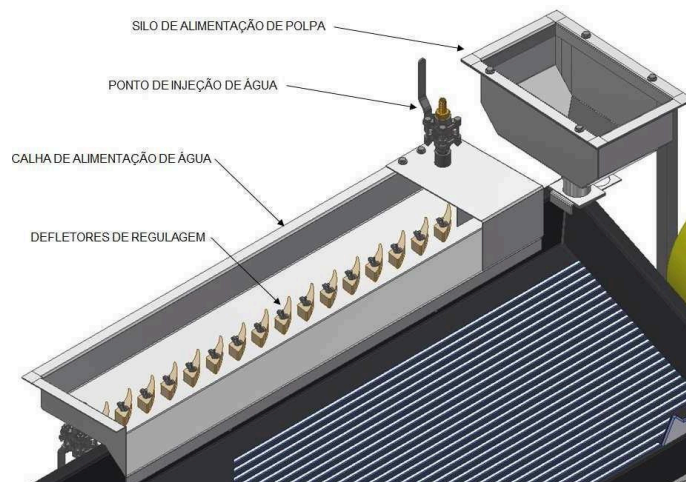
Figura 5 - Mecanismo de acionamento da mesa de concentração.



Fonte: (INBRAS, 2023, p.17).

Na mesa vibratória utilizada neste trabalho, é relevante citar que há um fluxo de entrada de água e materiais isolados entre si, o que é crucial neste processo, o silo de alimentação de polpa, como demonstrado na Figura 6, é separado da entrada de água, que, por sua vez, é direcionada para a calha de alimentação. Diante dessa separação, o sistema permite a regulação da quantidade de polpa e de água. O monitoramento do fluxo de água é importante para o processo e é descrito como trabalhos futuros utilizando um sensor de vazão de água.

Figura 6 - Sistema de alimentação da mesa.



Fonte: (INBRAS, 2023, p.19).

Na mesa do CT Mineral, a alimentação de água é feita por meio de tubulação de PVC de 1/2" direcionada a partir do teto. Uma válvula é usada para controlar a quantidade de água

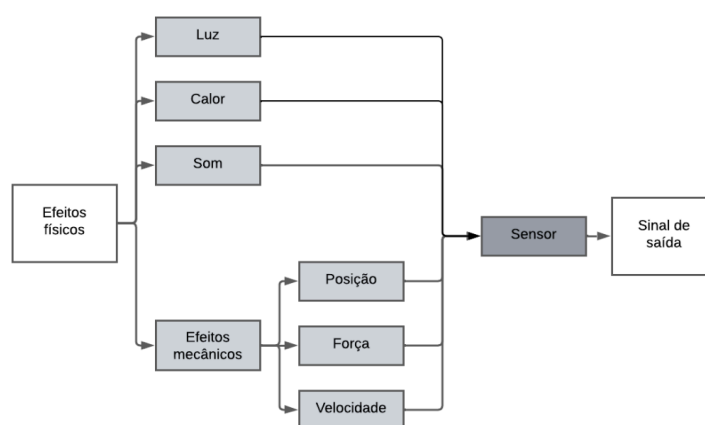
injetada no sistema. A distribuição da água sobre a plataforma móvel tem influência, também, na formação das zonas de concentrado, misto e rejeito. Por isso, a mesa dispõe de defletores reguláveis, que permitem ao operador direcionar mais fluxo de água para pontos que julgue importantes.

2.3 Sensores

A mesa CT-16W não apresenta escalas para parametrizar os aspectos mais importantes na recuperação do minério (vibração e ângulo de inclinação da plataforma móvel e quantidade de água injetada no sistema), dificultando ao operador retornar a uma configuração de ajuste previamente testada. Para estabelecer escalas confiáveis para variáveis é importante, primeiro, discutir sobre sensores que consigam medir as grandezas físicas desejadas.

Sensores são dispositivos sensíveis a fenômenos físicos, tais como luz, calor, som e grandezas mecânicas. Na instrumentação, quando esses dispositivos convertem a grandeza física detectada em um sinal elétrico interpretável por outros sistemas de controle, atuam como transdutores. Essa conversão é fundamental para permitir a inferência de dados e o monitoramento em aplicações industriais e tecnológicas (Thomazini; Albuquerque, 2013). Na Figura 7 a seguir, é um exemplo das formas de energia em um sensor.

Figura 7 - Classificação para os tipos de sensores.



Fonte: Barbosa, Silva e Silva (2025, p. 33).

Dentre a vasta gama de transdutores disponíveis, existe uma categoria específica projetada para monitorar não apenas o ambiente, mas a dinâmica dos próprios corpos físicos. Para aplicações que exigem o conhecimento da orientação espacial e do deslocamento de um objeto - como no caso deste projeto - , tornam-se necessários dispositivos capazes de quantificar grandezas cinemáticas com precisão, os sensores inerciais.

2.3.1 Sensores inerciais

Sensores inerciais são dispositivos transdutores que medem os parâmetros de movimento de um corpo - especificamente a aceleração linear e a velocidade angular - baseando-se no princípio da inércia. Diferente de outros sistemas de navegação, eles são autônomos (*self-contained*), ou seja, não dependem de referências externas como satélites ou transmissores de rádio para operar. Tecnicamente, a maioria desses sensores atuais baseiam-se em sistemas microeletromecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems* - MEMS), capazes de transformar a movimentação de massas microscópicas de silício em sinais elétricos interpretáveis, utilizados para medições de inclinação, impacto, vibração e navegação (Thomazini; Albuquerque, 2013; Kempe, 2011).

Os sensores inerciais fundamentam-se no princípio da inércia para detectar alterações no estado de movimento de um corpo. Diferentemente de dispositivos que medem velocidade constante, o acelerômetro afere a aceleração linear, ou seja, a taxa de variação da velocidade no tempo. Em sua arquitetura interna - predominantemente baseada na tecnologia MEMS - o dispositivo opera através de um sistema mecânico análogo a um conjunto massa-mola: uma massa de prova microscópica é suspensa por estruturas elásticas, e seu deslocamento relativo permite quantificar a força inercial aplicada e, conseqüentemente, a aceleração do sistema. Adicionalmente, o sensor detecta a aceleração da gravidade como um vetor constante (aceleração estática), o que viabiliza o desenvolvimento de sistemas de aferição de angulação e inclinação (inclinômetros) tomando o vetor gravitacional como referência.

2.3.2 MPU6050

O sensor MPU6050, segundo o fabricante (IVONSENSE), é um dispositivo de processamento de movimento 6 DOF (*six-degree-of-freedom* ou seis graus de liberdade), pois integra numa mesma pastilha de silício um acelerômetro e um giroscópio de 3 eixos cada, totalizando 6 eixos.

O MPU6050 possui escalas de medição programáveis, onde o usuário, por meio de registradores específicos, consegue estabelecer a aceleração e a velocidade angular máxima da aplicação. No caso do acelerômetro, as faixas de fundo de escala são $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$. Em aplicações submetidas a acelerações baixas, o MPU6050 deve ser configurado para $\pm 2g$, dessa forma, não consegue medir acelerações maiores que duas vezes a gravidade da Terra, em compensação, terá resolução melhor para acelerações menores. Já o giroscópio é configurado para suportar faixas de ± 250 a ± 2000 graus por segundo (DPS). A comunicação

do sensor com o microcontrolador é realizada através de um barramento I2C com frequência de 400 kHz.

Embora a Unidade de Medição Inercial (IMU) MPU6050 disponha de um giroscópio triaxial integrado, optou-se, nesta pesquisa, pela utilização exclusiva dos dados provenientes do acelerômetro. Esta decisão fundamenta-se na natureza cinemática da mesa vibratória, cujo princípio de operação baseia-se em movimentos de translação linear oscilatória e não em deslocamentos angulares dinâmicos.

Segundo Kempe (2011), giroscópios MEMS destinam-se à medição de velocidade angular (ω), grandeza que, no contexto ideal de uma mesa concentradora, tenderia a zero ou representaria apenas ruídos estruturais irrelevantes para o controle do processo. Ademais, para a aferição da inclinação estática da plataforma móvel - parâmetro crítico para a separação do minério - , o acelerômetro oferece maior robustez por utilizar o vetor gravidade como referência absoluta, isento dos erros de deriva (*drift*) cumulativa característicos da integração de sinais de giroscópios.

2.3.3 *Pitch e Roll*

No contexto da instrumentação de mesas vibratórias e superfícies de mineração, a determinação precisa da orientação espacial é realizada através dos Ângulos de Euler. Dentre os três graus de liberdade rotacionais possíveis, este projeto se baseia no monitoramento do *Pitch* (Arfagem) e do *Roll* (Rolagem), grandezas determinantes para a eficiência do fluxo de polpa na superfície de concentração.

- *Pitch* (θ): representa a rotação em torno do eixo transversal (eixo Y), indicando a inclinação longitudinal da mesa.
- *Roll* (ϕ): representa a rotação em torno do eixo longitudinal (eixo X), indicando o nivelamento lateral.

Ressalta-se que o presente estudo limita-se ao monitoramento dos ângulos de *Pitch* e *Roll*, desprezando-se a análise do ângulo de *Yaw* (Guinada). Esta exclusão justifica-se, primeiramente, pela natureza física do sensoriamento inercial via acelerômetro, que é incapaz de detectar rotações em torno do vetor gravitacional (eixo vertical) sem o auxílio de um magnetômetro (referência de bússola), componente ausente no módulo MPU-6050. Secundariamente, no contexto das mesas concentradoras, a orientação azimutal do equipamento (*Yaw*) é uma variável estática de instalação que não influencia a dinâmica de

separação de partículas, a qual é regida primariamente pelas inclinações da superfície em relação à gravidade.

A metodologia adotada para o cálculo desses ângulos baseia-se na decomposição vetorial da aceleração da gravidade (1g) projetada nos eixos ortogonais do sensor (A_x , A_y , A_z). A precisão desse método depende fundamentalmente da robustez trigonométrica do algoritmo empregado, uma vez que abordagens simplificadas que utilizam apenas dois eixos tendem a apresentar instabilidade numérica quando a inclinação do equipamento se acentua.

Para mitigar tais erros e garantir estabilidade numérica no microcontrolador, implementou-se o algoritmo descrito por Pedley (2013). As equações fundamentais, traduzidas para a linguagem C++ no *firmware* do dispositivo, são apresentadas a seguir:

$$Pitch(\theta) = \arctan2\left(-A_z, \sqrt{A_y^2 + A_x^2}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (1).$$

$$Roll(\phi) = \arctan2(A_y, A_x) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2).$$

Onde A_x , A_y , A_z são as componentes de aceleração medidas pelo sensor e **Arctan2** é a função arco-tangente de dois argumentos, que analisa os sinais dos catetos para determinar o quadrante correto do ângulo ($-\pi$ a $+\pi$).

A característica distintiva deste algoritmo é a utilização da raiz quadrada no denominador do cálculo do *Pitch*. Conforme detalha Pedley (2013), essa operação normaliza o vetor projeção no plano YZ, desacoplando matematicamente os eixos. Isso assegura que a leitura da inclinação longitudinal (θ) permaneça imune a variações laterais (ϕ), evitando o fenômeno de instabilidade cruzada.

A validade física desta abordagem é corroborada por Al-Jlailaty e Mansour (2020) em seu estudo sobre estimadores de atitude. Os autores classificam este método como uma Estimativa Determinística baseada na Gravidade, cuja premissa fundamental é a existência de uma "condição quase-estática". Ou seja, o algoritmo assume que a única força constante atuando sobre o acelerômetro é a gravidade.

Contudo, Al-Jlailaty e Mansour (2020) alertam que, em ambientes dinâmicos sujeitos a vibração externa - como é o caso da mesa concentradora - , a aceleração medida é a soma vetorial da gravidade mais o ruído mecânico, o que violaria a premissa do cálculo. Esta constatação teórica justifica a necessidade imperativa da filtragem digital discutida na seção 2.3.4. A aplicação do filtro passa-baixa de 44 Hz (MPU6050_BAND_44_HZ) atua removendo as componentes de alta frequência da vibração, restaurando artificialmente a

condição quase-estática exigida pelo modelo matemático e garantindo a confiabilidade dos dados de inclinação processados pelo algoritmo.

2.3.4 Filtragem de Sinais e Largura de Banda em MEMS

Conceitualmente, um filtro é um mecanismo seletivo utilizado para segregar componentes indesejados de um meio ou sinal. Segundo Corteletti (2012), filtros são entidades responsáveis pelo bloqueio de impurezas, permitindo apenas a passagem de elementos considerados úteis para o sistema. No contexto da eletrônica, essa definição aplica-se à manipulação de grandezas como tensão e frequência, visando a integridade da informação (Corteletti, 2012, p. 86).

No contexto específico de sensores MEMS, a filtragem é crucial devido à sensibilidade mecânica desses dispositivos a vibrações espúrias. A largura de banda (*bandwidth*) define a faixa de frequências que o sensor é capaz de capturar e transmitir. Kempe (2011) alerta que, em ambientes industriais, frequências elevadas de vibração (ruído mecânico) podem mascarar o sinal de interesse (como a gravidade), exigindo a limitação artificial dessa largura de banda.

Segundo Corteletti (2012, p. 86-87), os filtros eletrônicos são classificados em quatro categorias principais de acordo com sua resposta em frequência: Passa-Baixa (*Low-Pass*), Passa-Alta (*High-Pass*), Passa-Faixa (*Band-Pass*) e Rejeita-Faixa (*Band-Stop*). O filtro Passa-Baixa permite apenas a passagem de frequências inferiores a um valor de corte, atenuando as superiores. Inversamente, o Passa-Alta bloqueia as baixas frequências, permitindo o trânsito das altas. Já o filtro Passa-Faixa seleciona um intervalo específico de frequências para transmissão, enquanto o Rejeita-Faixa, em oposição, suprime ou atenua drasticamente essa banda específica.

Para a implementação deste projeto, utilizou-se o recurso de Filtro Passa-Baixa Digital (DLPF) integrado ao próprio hardware do sensor MPU-6050. Diferentemente de filtros analógicos externos, o DLPF processa o sinal digitalmente antes de enviá-lo ao microcontrolador.

A escolha da largura de banda de 44 Hz teve o objetivo de atenuar drasticamente os ruídos de alta frequência gerados pelos motores da mesa vibratória, garantindo que apenas os componentes de baixa frequência — relacionados à inclinação estática e à aceleração da gravidade — fossem processados e armazenados. Essa configuração oferece um compromisso ideal entre a estabilidade do sinal e a latência de resposta do sensor.

2.4 Microcontroladores

Conforme definidos por Tanenbaum e Struther (2017), os microcontroladores operam como computadores dedicados, integrados internamente a dispositivos eletrônicos, diferenciando-se funcionalmente dos computadores de propósito geral. A principal característica desses componentes é a sua arquitetura otimizada para a execução de tarefas de controle dedicadas, que combina baixo custo de produção com a integração nativa de periféricos de entrada e saída (E/S). Essa estrutura permite que sejam adaptados para executar tarefas específicas de controle em uma vasta gama de equipamentos, garantindo flexibilidade ao projeto.

2.4.1 ESP8266

O *ESP8266* é um *System-on-Chip (SoC)* de baixo custo desenvolvido pela *Espressif Systems*, projetado para fornecer conectividade *Wi-Fi* completa a sistemas embarcados. Embora tecnicamente classificado como um *SoC* devido à integração de rádio e processamento no mesmo silício, ele atua funcionalmente como um microcontrolador em aplicações de *IoT (Internet of Things)* (ESPRESSIF, 2023).

O *ESP8266* atende perfeitamente as características básicas de um microcontrolador, como arquitetura simples e E/S integradas. No entanto, seu diferencial reside na integração nativa do protocolo *TCP/IP*, permitindo que o dispositivo não apenas processe dados, mas também atue como um servidor ou cliente *web* sem a necessidade de módulos de rede externos.

O núcleo de processamento do *ESP8266* baseia-se no processador Tensilica L106 de 32 bits do tipo *RISC (Reduced Instruction Set Computer)*. Suas principais características técnicas, segundo o *datasheet* do fabricante (ESPRESSIF, 2023), incluem:

- Processamento: Clock padrão de 80 *MHz*, podendo operar a até 160 *MHz*.
- Memória: Tipicamente não possui memória flash interna para armazenamento de código (utiliza uma *flash SPI* externa, geralmente de 512 *KB* a 4 *MB*), mas possui *RAM* interna para instruções e dados.
- Conectividade: Suporte ao padrão *IEEE 802.11 b/g/n (Wi-Fi 2.4 GHz)*.
- Periféricos: Possui pinos de *GPIO (General Purpose Input/Output)*, interfaces *SPI*, *I2C*, *UART* e um conversor *Analógico-Digital (ADC)* de 10 bits (pino A0).

Frequentemente, o *ESP8266* é utilizado através de módulos de desenvolvimento como o *NodeMCU*. Esta placa de desenvolvimento facilita a prototipagem ao incorporar o *chip ESP8266* (geralmente encapsulado no módulo *ESP-12E*), um regulador de tensão de 3.3V e uma interface *USB-Serial*, permitindo a programação direta via porta *USB*. O uso do *NodeMCU* abstrai a complexidade do *hardware* de radiofrequência, tornando a implementação de projetos conectados mais acessível e rápida.

2.5 Sistemas embarcados

Um sistema embarcado (*embedded system*) pode ser definido como um sistema computacional projetado para desempenhar uma ou poucas funções dedicadas, frequentemente com restrições de tempo real, encapsulado dentro de um dispositivo mecânico ou elétrico maior. Diferentemente de computadores de propósito geral (como *desktops* ou *laptops*), que são projetados para executar uma vasta gama de *softwares* a critério do usuário, os sistemas embarcados são otimizados para uma tarefa específica, visando a redução de tamanho, custo e consumo de energia (Wolf, 2016).

A principal característica que distingue esses sistemas é o projeto conjunto de *hardware* e *software*. O *hardware* não é uma plataforma genérica, mas sim uma estrutura selecionada especificamente para atender aos requisitos da aplicação final, seja ela o controle de freios *ABS* de um veículo ou o monitoramento de uma mesa vibratória industrial.

2.5.1 Sistema em malha aberta

Na teoria de controle, a distinção fundamental entre sistemas reside na presença ou ausência de retroalimentação (*feedback*). Em um sistema de malha fechada, o controlador compara continuamente a saída atual com o valor desejado (*setpoint*), utilizando a diferença (sinal de erro) para ajustar a entrada e corrigir o processo. Em contrapartida, em um sistema de malha aberta, a ação de controle é executada sem a verificação do resultado final, ou seja, a saída não influencia a ação de controle.

Uma analogia clássica para ilustrar essa diferença é a comparação entre uma máquina de lavar e um sistema de climatização. A máquina de lavar opera em malha aberta, pois seus ciclos de lavagem seguem uma duração temporal fixa, independentemente do estado de limpeza das roupas. Já o ar-condicionado opera em malha fechada, utilizando um termostato para medir a temperatura ambiente e ajustar a potência do compressor até atingir o nível térmico programado (Ogata, 2010).

Conforme destaca Ogata (2010), em sistemas de malha aberta, a precisão depende exclusivamente da calibração inicial e da estabilidade dos componentes, uma vez que não há mecanismos automáticos para compensar distúrbios externos. Neste trabalho, o sensor MPU-6050 insere-se em uma arquitetura de monitoramento em malha aberta: sua função é fornecer dados de inclinação e vibração para a tomada de decisão do operador, sem atuar diretamente no controle automático dos motores da mesa.

3 METODOLOGIA

Essa é uma pesquisa aplicada, com o objetivo de construir um aparato tecnológico, um sistema embarcado, capaz de resolver um problema de um equipamento do setor de mineração. Ao mesmo tempo, é uma pesquisa com caráter exploratório, já que investiga as possibilidades e restrições no uso de acelerômetro para monitoramento de parâmetros de uma mesa gravimétrica.

A ferramenta está sendo desenvolvida em parceria com o Centro de Tecnologia Mineral (CT Mineral) do IFRN. Centro esse que realiza estudos quantitativos sobre a influência dos parâmetros da mesa gravimétrica (vibração e inclinação da plataforma) para otimizar o processo de recuperação de minérios.

A pesquisa iniciou com a análise de requisitos do sistema. Os profissionais do CT Mineral apresentaram o funcionamento da mesa gravimétrica, relatando que as principais dificuldades se relacionam com o fato de a mesa ser um equipamento totalmente mecânico, sem qualquer forma de retorno visual dos principais parâmetros de controle. Afirmaram também que a inclinação da mesa, o nível de vibração e a quantidade de água que entra no sistema, são os aspectos que mais interferem na recuperação dos minérios, e que eles são controlados por meio de manivelas e válvula, sem qualquer escala.

Os técnicos responsáveis pelo ajuste da máquina realizam todo o procedimento de forma manual, usando a experiência para determinar quando os parâmetros se aproximam de pontos ideais para a recuperação do minério. Os profissionais do CT Mineral relataram, ainda, que, naquele momento, os parâmetros da mesa estavam próximos do que acreditavam ser o ideal, mas que, por receio de não conseguir retornar à mesa aos mesmos parâmetros, evitavam fazer alterações no nível de vibração e na inclinação da mesa.

Como no CT Mineral, a mesa gravimétrica é usada para pesquisas quantitativas que correlacionam os parâmetros citados com a recuperação de minério. A ausência de escalas para os parâmetros dificulta os estudos realizados pelo Centro. Além de limitar o poder de exploração dentro das pesquisas realizadas pelo receio de, na alteração dos parâmetros para

procurar valores melhores, não conseguir retornar aos parâmetros bons encontrados anteriormente.

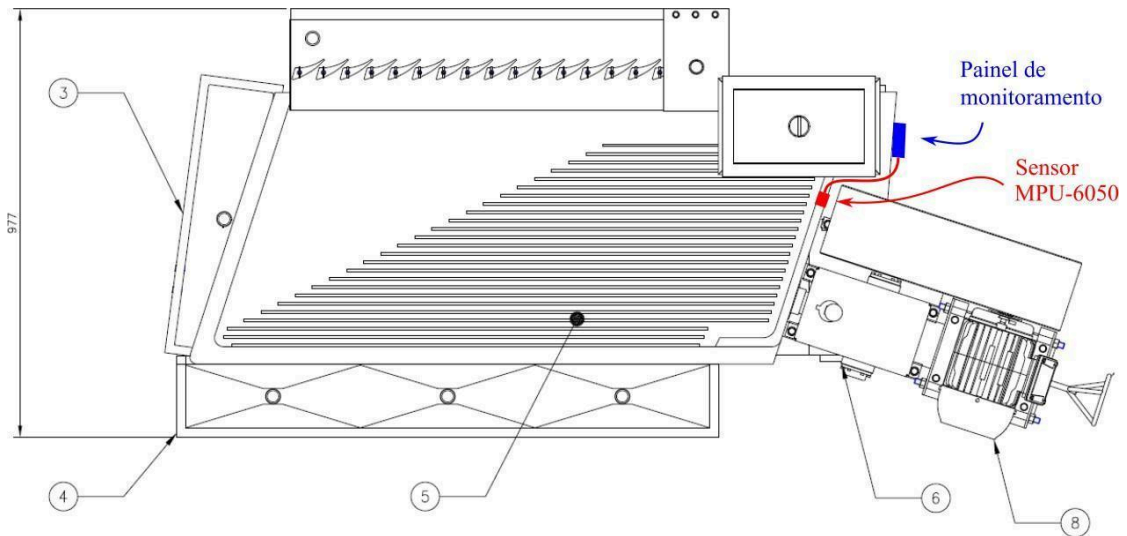
Por se tratar de um problema estritamente de visualização de variáveis físicas da planta, não fazendo parte da solução o controle do processo, o projeto do sistema embarcado se concentrou, inicialmente, na busca pelos sensores mais adequados. A literatura é repleta de trabalhos que provam a viabilidade dos sensores inerciais, como acelerômetros e giroscópios para caracterização de movimento. Sendo o acelerômetro mais adequado para aplicação descrita neste trabalho, uma vez que consegue reconhecer vetores de aceleração linear nos três eixos (X, Y e Z). Enquanto o giroscópio mede velocidade angular, sendo mais adequado para aplicações com revoluções completas (giros) em torno dos eixos.

Mesmo em repouso, o acelerômetro reconhece o vetor da aceleração gravitacional, sendo fácil calcular o ângulo de inclinação do sensor em relação à gravidade. Já a vibração necessita de estudo para verificar a eficácia do acelerômetro. Um aumento na vibração da plataforma pode significar uma ampliação apenas no deslocamento, mas a velocidade e a aceleração permanecem sem diferenças sensíveis. Contudo, como o deslocamento é a integral da velocidade e segunda integral da aceleração, métodos de cálculo e computação numérica podem ser utilizados, sobre os sinais de aceleração, para obter dados confiáveis que mostrem variações no deslocamento da plataforma.

Outro aspecto importante dos acelerômetros é o tamanho. Com o desenvolvimento de sensores MEMS (Sistemas eletromecânicos), o mercado dispõe de chips com área inferior a um quarto de centímetro quadrado que integram acelerômetro e giroscópio e medições nos três eixos. Os chips inerciais são tão pequenos que geralmente são comercializados soldados a pequenas placas de circuito. Nesse projeto, a placa selecionada foi a GY-521, que traz, *on-board*, um chip MPU6050 (acelerômetro e giroscópio).

O tamanho reduzido da placa GY-521 permite a instalação do sensor na borda da plataforma móvel, de forma a não interferir no fluxo da água, do minério e de outros sedimentos. Como o sistema embarcado projetado deve ser capaz de apresentar, ao operador, informações sobre a inclinação da plataforma e a vibração, é necessário algum microcontrolador para tratar os dados, além de um display para apresentar as informações. A Figura 8 ilustra uma vista superior para a mesa gravimétrica CT-16W, que foi modificada, incluindo os pontos de instalação sugeridos para o sensor acelerômetro, fixado à plataforma móvel, e os demais módulos do sistema embarcado fixados à estrutura da mesa (parte não móvel).

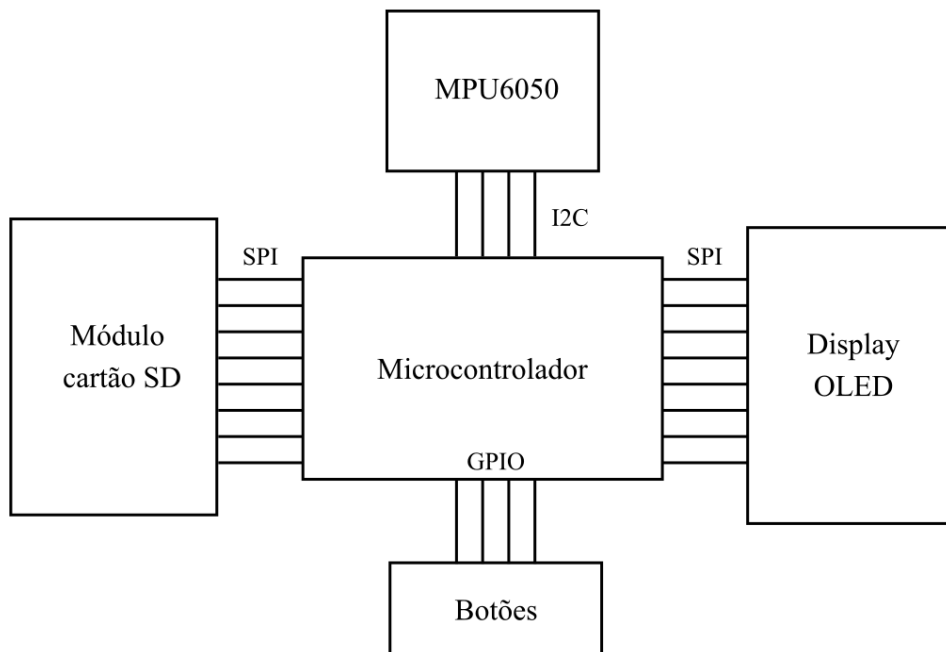
Figura 8 - Pontos de instalação do acelerômetro e painel de monitoramento.



Fonte: Adaptado de (INBRAS, 2024, p.1).

O sistema embarcado completo foi diagramado conforme a Figura 9, com um ESP8266 como microcontrolador, um sensor MPU6050, um display OLED (240 x 240), módulo para cartão micro SD e três botões para seleção das informações apresentadas no display.

Figura 9 - Diagrama do hardware projetado.



Fonte: Autoria própria.

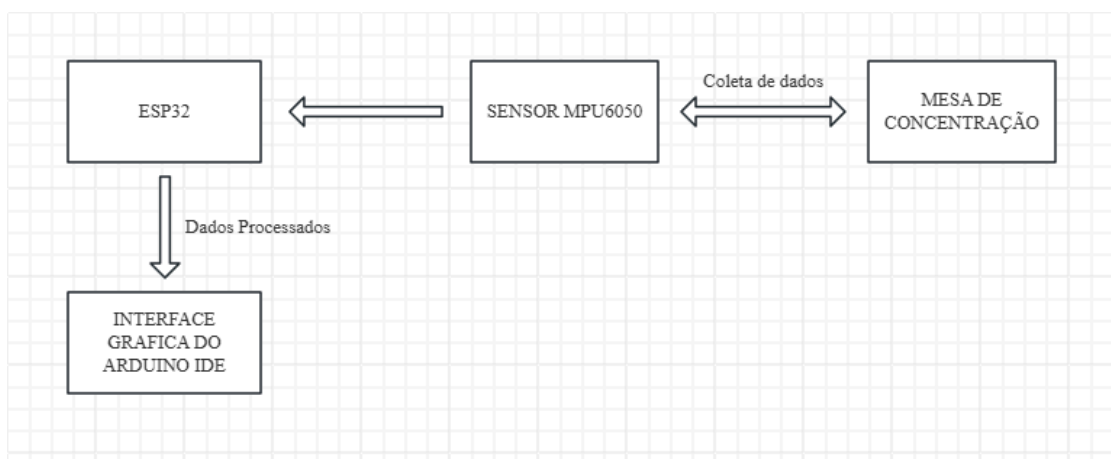
No estágio atual da pesquisa, foram realizados testes com acelerômetro fixado à plataforma móvel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes iniciais tinham como objetivo provar a capacidade do sensor acelerômetro em obter dados representativos para caracterizar tanto a intensidade do movimento vibratório, quanto a inclinação da plataforma. Para os testes, não havia necessidade de finalização do hardware completo proposto para o sistema embarcado, bastava que a comunicação entre microcontrolador e acelerômetro estivesse concretizada.

Os testes iniciais se concentraram no monitoramento dos dados de aceleração e inclinação da mesa (*pitch* e *roll*) com o microcontrolador recebendo os dados do sensor acelerômetro via protocolo I2C e encaminhando os dados coletados para um notebook por meio de comunicação serial. A Figura 10 mostra um fluxograma dos testes.

Figura 10 - Fluxograma dos testes.

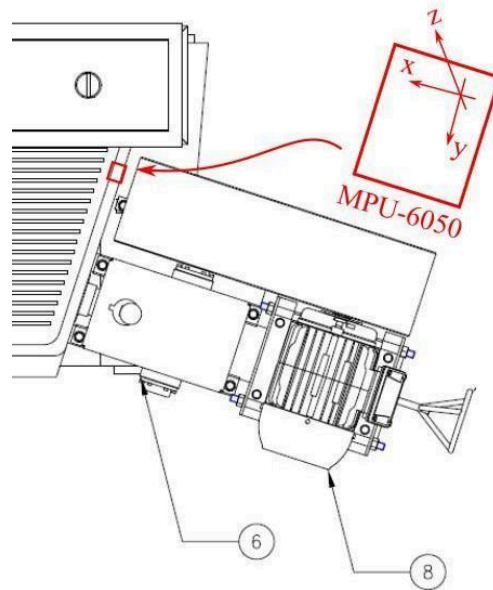


Fonte: Autoria própria.

Como a superfície da plataforma móvel da mesa não é absolutamente uniforme, existem diferenças de inclinação do centro em relação à borda. Por isso, antes dos testes de vibração, foram realizadas medições de inclinação (*pitch* e *roll*) em diversos pontos da plataforma. Foram constatados ângulos de inclinação entre 2 e 4 graus nos diversos pontos. Os resultados mostraram que não havia diferenças consideráveis na inclinação da parte central da plataforma, onde o minério é separado, para a borda, onde o sensor seria fixado posteriormente.

Para os testes de vibração, o sensor MPU6050 foi fixado no ponto de referência da Figura 8. Como as medições de aceleração fornecidas pelo sensor se referem aos três eixos (X, Y e Z), é importante identificar o posicionamento dos eixos em relação à plataforma, o que é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Eixos do acelerômetro em relação à plataforma.



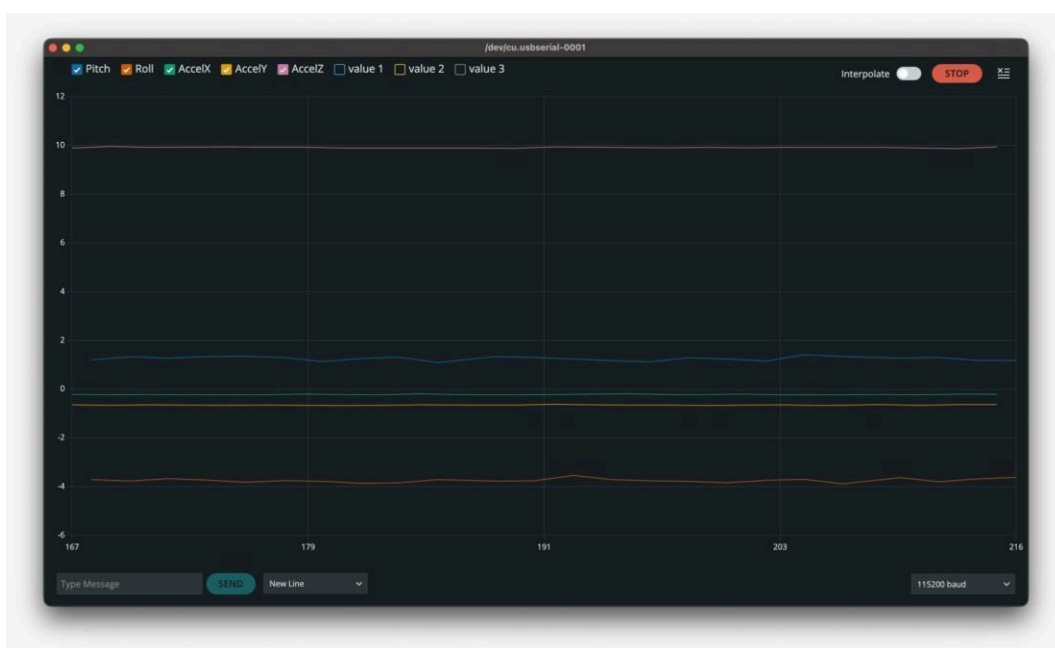
Fonte: Adaptado de (INBRAS, 2024, p.1).

A plataforma móvel não foi desenvolvida para realizar grandes deslocamentos, e sim para vibrar, ou seja, pouco deslocamento e movimento rápido (muita aceleração). Quando a máquina é ligada, nota-se claramente que o principal componente de movimento ocorre no sentido das ranhuras da mesa (linhas horizontais da Figura 8). Infelizmente, a borda da plataforma, onde o sensor foi instalado, não é perpendicular às ranhuras, o que significa que o principal movimento observável na mesa ocorre entre os eixos X e Y.

A vibração da mesa é muito intensa em virtude da potência do motor, fazendo com que, mesmo componentes fixos da mesa, como as pernas, sofram com vibração residual. Nesse cenário é propício acreditar que mesmo no eixo Z da plataforma móvel, que não aparenta movimento aparente, devem existir componentes de aceleração observáveis somente por meio do sensor.

O primeiro teste foi realizado com a máquina desligada para observar o comportamento em repouso dos cinco dados observados: **AccelX** (aceleração no eixo X); **AccelY** (aceleração em Y); **AccelZ** (aceleração em Z); **Pitch** (inclinação em torno do eixo Y) e **Roll** (inclinação em torno do eixo X). A Figura 12 sintetiza, no mesmo gráfico, todos os dados para situação de repouso da mesa.

Figura 12 - Dados de aceleração e inclinação com a mesa desligada.

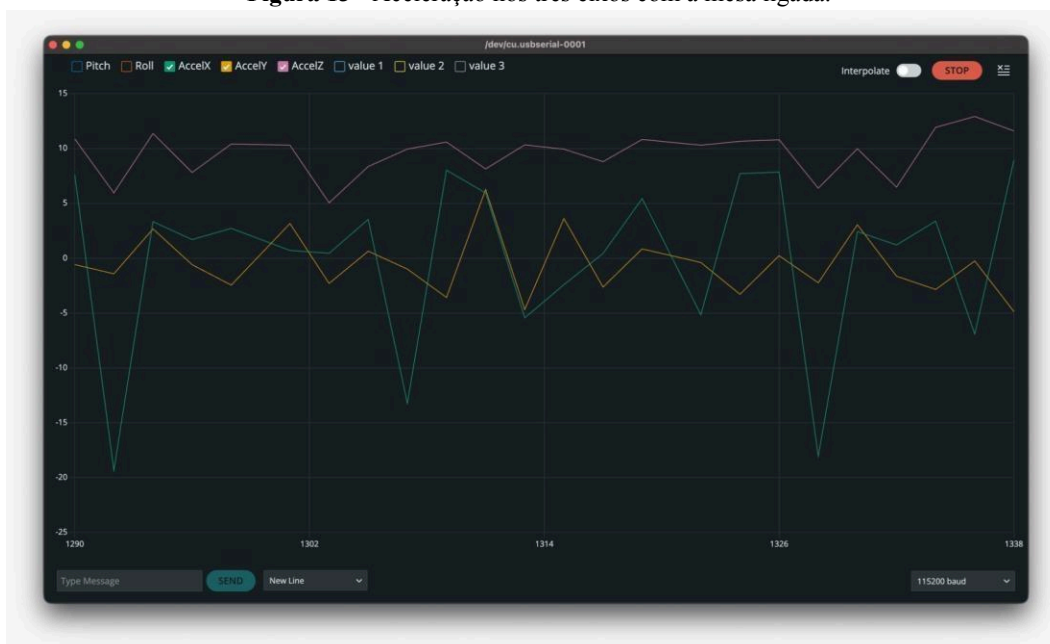


Fonte: Autoria própria.

As acelerações foram apresentadas em metros por segundo ao quadrado (m/s^2), sendo possível observar que **AcceIZ** retornou valores constantes próximos a 10, ou seja, detectou o vetor gravidade, que é de aproximadamente $9,8 m/s^2$ na Terra. Os dados de **AcceIX** e **AcceIY** também foram constantes e se aproximaram de zero. O fato de não estarem completamente zerados não indica problema no sensor, pois a própria plataforma móvel apresentava pequena inclinação durante os testes. De forma que parte muito pequena do vetor resultante da gravidade estava, também, nos eixo X e Y. Por fim, os ângulos de inclinação deram em torno de 1,5 graus para **Pitch** e 3,8 graus para **Roll**, reforçando que os ângulos **Pitch** e **Roll** não são dados obtidos diretamente nos registradores do sensor, eles são calculados a partir dos vetores de aceleração, necessitando que o sensor esteja em repouso para que outros vetores de aceleração não atrapalhem o reconhecimento do vetor gravidade.

Após os testes de repouso, foram realizados testes com a máquina ligada para aferir se a vibração provocava vetores de aceleração e desaceleração consideráveis nos três eixos. A Figura 13 apresenta os dados de aceleração nos três eixos com a máquina ligada.

Figura 13 - Aceleração nos três eixos com a mesa ligada.



Fonte: Autoria própria.

É possível observar que no eixo X, ao qual se esperava maiores variações, ocorreram variações periódicas de aceleração e desaceleração, com comportamento de aceleração mais prolongado com picos menores (sempre inferiores a 10 m/s^2) e desaceleração mais brusca (picos próximos de -20 m/s^2). A vibração também foi sentida no eixo Y, mas, como esperado, os picos de aceleração e desaceleração foram menores. A aceleração no eixo Z também foi muito característica, primeiro por ser o único gráfico que não se localiza em torno do zero, o que é explicado pelo fato de o componente da gravidade continuar existindo nesse eixo, o que eleva a origem do sinal para a região de $9,8 \text{ m/s}^2$. O impacto da vibração sobre a aceleração do eixo Z foi, até certo ponto, uma surpresa, já que visualmente não é possível observar o deslocamento vertical da plataforma.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes realizados com o acelerômetro mostram grande poder de caracterização para vibração, na plataforma móvel, nos três eixos, inclusive no eixo Z, onde o deslocamento é praticamente imperceptível. Os cálculos de inclinação da mesa, também baseados nos dados do acelerômetro, se mostram bastante condizentes. Contudo, como o cálculo de inclinação depende da observação do vetor gravidade, ao ligar a máquina, os dados de inclinação são corrompidos pelos outros vetores de aceleração. Essa limitação, entretanto, não impede a construção do sistema de monitoramento.

Os dados até o momento se referem ao comportamento da mesa em repouso ou para parâmetros fixos de vibração e de inclinação. Com a certificação e fixação permanente do sistema, será possível modificar os parâmetros, aferindo que o acoplamento mais próximo do motor de vibração, que aumenta a vibração da plataforma móvel, interfere nos picos de aceleração capturados pelo sensor a ponto de permitir a construção de uma escala de vibração.

REFERÊNCIAS

CREPALDE, Gustavo Henrique de Souza. A análise e o uso de Big Data nas atividades mineiras. Estudo de caso: processamento mineral de uma mina de ouro na Austrália. 2017.

Disponível em:

https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/813/1/MONOGRAFIA_AnáliseUsoBig.pdf .

Acesso em: 16/01/2026.

DIAS, Amanda Ribeiro Lutterback. Mineração 4.0: a evolução e os benefícios da indústria

4.0 no setor de mineração. 2023. Disponível em:

<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/21146/1/DIAS%2c%20A.R.L.pdf> . Acesso em:

16/01/2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP8266EX Datasheet. Xangai: Espressif Systems, 2023.

Disponível em: <https://www.espressif.com>. Acesso em: 13 Jan 2026.

INBRAS. Equipamentos Magnéticos e Vibratórios Ltda. Manual de instruções, operação e manutenção: mesa de concentração modelo CT-16W. Diadema: INBRAS-ERIEZ, [s.d.].

INBRAS. Mesa de concentração CT-16W. Diadema: INBRAS-ERIEZ, 2024.

PEDROSA, G. A. G. N. Recuperação dos minerais de ferro do subproduto originado na mina lagoa das flores, Itatiaiuçu-MG. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia de Minas.

Araxá-MG: CEFET-MG, 2019.

SANTOS, J. K. L. dos; DANTAS, E. J. de A. Contribuição da exploração de scheelita para o desenvolvimento de Currais Novos, RN. In: Anais do IX Congresso de iniciação científica do IFRN (IX CONGIC). Currais Novos: IFRN, 2013. p. 2287-2295. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/viewFile/1218/133>

SANTOS, Jeane Karla Leoncio dos; DANTAS, Eduardo Janser de Azevedo. Contribuição da exploração da scheelita para o desenvolvimento de Currais Novos, RN. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFRN (CONGIC), 9., 2013, Currais Novos. Anais [...].

Currais Novos: IFRN, 2013. p. 2287-2295. Disponível em:

<https://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/viewFile/1218/133>. Acesso em: 13 jan. 2026.

SURIEL, Sara. Amostra de Scheelita encontrada no Museu de Minérios do RN. [S. l.: s. n.], [s.d.]. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.desgeoeduorg.com.br/post/mina-breju%C3%AD-a-maior-mina-de-scheelita-da-am%C3%A9rica-do-sul>. Acesso em: 13 jan. 2026.

THOMAZINI, Daniel; DE ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga. Sensores industriais: fundamentos e aplicações. Saraiva Educação SA, 2020.