

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FÍSICA

CAMILA ISABEL DE SOUZA BUENO

**Metodologia aplicada ao monitoramento e análise
de vibrações do piso em áreas críticas das linhas de
luz do Sirius.**

SÃO CARLOS

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FÍSICA

CAMILA ISABEL DE SOUZA BUENO

**Metodologia aplicada ao monitoramento e análise de vibrações
do piso em áreas críticas das linhas de luz do Sirius.**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título/grau de bacharel em Engenharia Física.
Orientação: Prof. Dr. Adenilson José Chiquito

SÃO CARLOS

2025

Aos meus pais, Silas e Elisia, que foram as estrelas que me ouviram e me ajudaram a realizar meu sonho.

Agradecimentos

Essa foi, sem dúvidas, a parte mais difícil de escrever neste trabalho de conclusão de curso. Não pela falta de pessoas, às quais sou eternamente grata, mas pelo medo de esquecer uma única pessoa sequer.

Começo, então, pela mais importante de todas: Deus. Sem Ele, nada seria possível.

Agora começa a parte difícil. Agradeço aos meus pais, que entraram de cabeça nesta graduação; à minha irmã Amanda, que me apoiou de tantas formas; às minhas avós Vicentina, que esteve comigo literalmente desde o primeiro dia e não me deixou desistir, e Gedalva, por todo incentivo; ao meu avô Antônio Augusto, que me acompanhou todos os dias da minha vida de cursinho, mas que infelizmente não me viu entrando na universidade e foi o primeiro a acreditar em mim; e ao meu avô David, que nunca me conheceu, mas criou um homem que se tornou o melhor pai do mundo. Agradeço também aos meus tios e primos, que me apoiaram em cada etapa, torceram por mim do começo ao fim e compraram todas as rifas do meu projeto de extensão – vocês são incríveis. Aos meus queridos animais de apoio: Lully, Oliver e Lua. Aos meus amigos, os que já estavam comigo antes desta caminhada e os que conheci durante a universidade. Eu gostaria de citar o nome de cada um, mas, felizmente, seria uma lista longa demais, o que só me mostra o quão sortuda eu sou. Obrigada por cuidarem de mim.

Ao meu professor Fernando, que não deixou que eu desistisse no meu segundo semestre da faculdade e me apoiou, incentivou e ajudou em todas as minhas etapas.

Quero também agradecer às pessoas que fizeram com que este trabalho final não fosse um fardo para mim: meu orientador, o professor doutor Adenilson, mais conhecido como Chiquito. Obrigada por aceitar me orientar, por aceitar as condições malucas do meu fim de graduação e os prazos apertados, pelos conselhos que levarei por toda a vida e por ser um professor tão incrível. Meu co-orientador Rafael Claudiano, que me acompanhou em todas as etapas deste projeto; minha parceira de medições e análises, Adriana; e meu supervisor de estágio, Gustavo Rodrigues, o melhor chefe de todos e ao professor Artino, por toda ajuda, suporte e por aceitar compor minha banca.

Muitas pessoas foram importantes nesta minha jornada, e algumas delas não estão mais entre nós, mas, quando vocês olharem para o meu diploma e virem meu nome nele, saibam que toda vez que eu olhar para ele, verei o nome de cada uma delas.

Tu, porém, vai até ao fim.

— Daniel 12:13

Resumo

As vibrações mecânicas estão presentes em diversas situações do cotidiano, e compreender esse fenômeno é fundamental para o estudo de sistemas físicos e de engenharia. As vibrações podem ser definidas como movimentos oscilatórios de um sistema mecânico em torno de um ponto de equilíbrio, podendo ter diferentes origens, direções e intensidades, o que pode gerar consequências relevantes para o desempenho e a estabilidade de equipamentos sensíveis.

No acelerador de elétrons Sirius, onde são conduzidas pesquisas que abrangem escalas micrométricas e nanométricas, a precisão e a estabilidade do feixe em cada linha de luz são essenciais. Qualquer interferência, mesmo que de pequena magnitude, pode comprometer a qualidade das medições e análises experimentais.

Com o intuito de compreender e monitorar essas interferências, foi desenvolvida uma metodologia de medição e análise das vibrações nos pisos do anel de armazenamento, no hall experimental, nos pisos especiais e nas mesas de granito do Sirius. Os resultados mostraram que o piso do anel apresenta estabilidade e homogeneidade adequadas, mesmo diante de interferências externas, e que há um desacoplamento eficiente entre o piso do anel e o hall experimental. Além disso, observou-se que as mesas de granito são mais sensíveis a baixas frequências, reforçando a importância do monitoramento contínuo.

Palavras-chave: Vibrações mecânicas. Análise de vibrações. Estabilidade estrutural. Aceleradores de partículas.

Abstract

Mechanical vibrations are present in various everyday situations, and understanding this phenomenon is essential for the study of physical and engineering systems. Vibrations can be defined as oscillatory motions of a mechanical system around an equilibrium point and may have different origins, directions, and intensities, which can lead to significant consequences for the performance and stability of sensitive equipment.

At the Sirius electron accelerator, where research is conducted on micrometric and nanometric scales, beam precision and stability in each beamline are crucial. Any interference, even of small magnitude, can compromise the quality of measurements and experimental analyses.

To understand and monitor these interferences, a methodology for measuring and analyzing vibrations on the floors of the storage ring, the experimental hall, special floors, and granite tables of Sirius was developed. The results showed that the ring floor presents adequate stability and homogeneity, even in the presence of external disturbances, and that there is effective decoupling between the ring floor and the experimental hall. Furthermore, it was observed that the granite tables are more sensitive to low frequencies, reinforcing the importance of continuous vibration monitoring.

Keywords: Mechanical vibrations. Vibration analysis. Structural stability. Particle accelerators.

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|--------------|--|
| CNPEM | Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais |
| LNLS | Laboratório Nacional de Luz Síncrotron |
| CNB | Linha de Luz CARNAÚBA |
| IMB | Linha de Luz IMBUIA |
| CAT | Linha de Luz CATERETÊ |
| EMA | Linha de Luz EMA |
| MNC | Linha de Luz MANACÁ |
| SAB | Linha de Luz SABIÁ |
| MGN | Linha de Luz MÓGNO |
| IPE | Linha de Luz IPÊ |
| PNR | Linha de Luz PAINEIRA |
| CED | Linha de Luz CEDRO |
| CAX | Linha de Luz CARCARÁ-X |
| M3 | Espelho 3 (Mirror 3) |
| M6 | Espelho 6 (Mirror 6) |
| M7 | Espelho 7 (Mirror 7) |
| PEEM | Microscopia de Emissão de Fotoelétrons (Photoemission Electron Microscopy) |
| RMS | Raiz Média Quadrada (Root Mean Square) |
| PSD | Densidade Espectral de Potência (Power Spectral Density) |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform) |
| DAQ | Aquisição de dados (Data Acquisition) |

Sumário

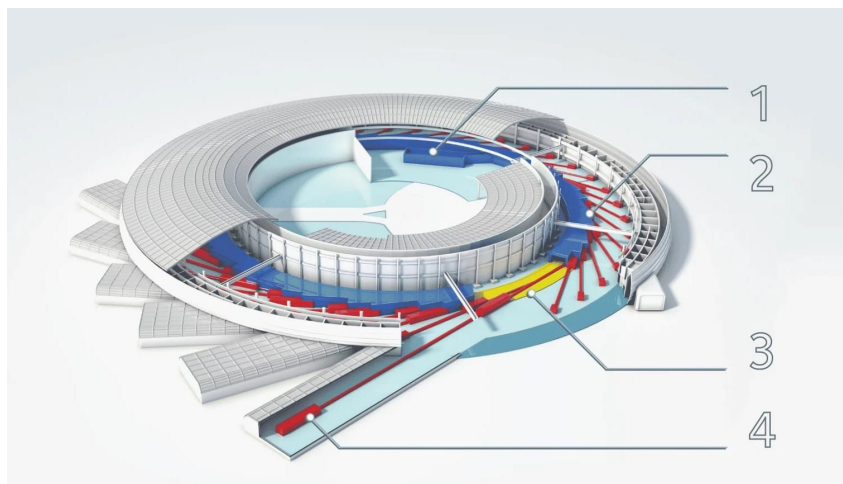
| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Objetivos | 16 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1 | Vibrações | 17 |
| 2.1.1 | Vibrações no Sirius | 21 |
| 2.1.2 | Vibrações em Outros Aceleradores de Partículas | 23 |
| 2.2 | Análise de sinais | 24 |
| 2.2.1 | Transformada Rápida de Fourier (FFT) | 25 |
| 2.2.2 | Densidade Espectral de Potência (PSD) | 27 |
| 2.2.3 | Raiz Quadrada Média (RMS) | 28 |
| 3 | METODOLOGIA | 31 |
| 3.1 | Equipamentos de Medição | 31 |
| 3.2 | Roteiro de medições | 32 |
| 3.3 | Tratamento dos Dados | 36 |
| 4 | RESULTADOS | 39 |
| 4.1 | Piso do Anel | 40 |
| 4.1.1 | Ponto 32 | 40 |
| 4.1.2 | Ponto 45 | 43 |
| 4.1.3 | Ponto 52 | 46 |
| 4.2 | Piso do Hall Experimental | 50 |
| 4.2.1 | Ponto 33 | 50 |
| 4.2.2 | Ponto 46 | 53 |
| 4.2.3 | Ponto 51 | 56 |
| 4.3 | Pisos especiais e mesas de granito | 59 |
| 4.3.1 | Ponto 47 | 60 |
| 4.3.2 | Ponto 48 | 63 |
| 5 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 67 |
| 5.1 | Análise da Estabilidade e Homogeneidade do Piso do Anel | 67 |
| 5.2 | Análise do Desacoplamento Entre o Piso do Anel e o Piso do Hall Experimental | 68 |
| 5.3 | Análise Entre o Piso Especial e a Mesa de Granito | 69 |
| 5.4 | Análise da Metodologia Empregada | 70 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 73 |
| | APÊNDICES | 75 |
| | APÊNDICE A – FREQUÊNCIAS OBTIDAS PARA OS PONTOS DE INTERESSE | 77 |
| | REFERÊNCIAS | 87 |

1 Introdução

Inaugurado em 2018 e localizado no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais e no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, o Sirius é um acelerador de partículas de quarta geração do tipo luz síncrotron, ou seja, ele produz radiação eletromagnética de forma controlada que é utilizada para analisar a estrutura e composição da matéria (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), 2025)

Figura 1 – Diagrama Sirius.



Representação esquemática do percurso da luz síncrotron: (1) geração de elétrons; (2) aceleração no BOOSTER; (3) emissão no anel de armazenamento; e (4) envio às linhas de luz. Fonte: (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), 2025).

Na figura 1 apresenta-se um diagrama ilustrando o percurso da radiação síncrotron até alcançar uma cabana experimental. Inicialmente, elétrons são gerados em um acelerador linear (LINAC) por meio do efeito termoiônico, em um equipamento chamado canhão de elétrons (1). Em seguida, esses elétrons são direcionados ao acelerador injetor (BOOSTER), onde passam por sucessivos segmentos de trajetória essencialmente retilínea. Ao longo desses segmentos, os elétrons são continuamente defletidos por eletroímãs, de modo que a combinação desses trechos produz uma trajetória efetivamente circular. Durante esse processo, os elétrons são acelerados por campos elétricos e magnéticos, completando aproximadamente 600 mil voltas por segundo e tendo sua energia incrementada a cada novo estágio, até atingirem velocidades muito próximas à da luz (2).

Quando alcançam a energia nominal, da ordem de 3 GeV, os elétrons são transferidos para o anel principal, ou anel de armazenamento, no qual são mantidos em uma trajetória circular estável por longos períodos, novamente controlada por sistemas magnéticos de orientação. Cada deflexão imposta aos elétrons — isto é, cada correção magnética que ajusta sua trajetória linear local ao percurso circular global — resulta na emissão de radiação eletromagnética na direção

tangencial ao movimento, abrangendo o espectro do infravermelho aos raios X duros. Essa radiação caracteriza a luz síncrotron (3).

Por fim, conforme indicado em (4), a luz síncrotron é conduzida às estações experimentais, ou linhas de luz, que operam de forma análoga a microscópios avançados, realizando a condensação, focalização e incidência controlada dessa radiação sobre as amostras de interesse. A maneira como essa radiação é absorvida, espalhada ou refletida fornece informações fundamentais sobre as propriedades estruturais e eletrônicas do material investigado.

No Sirius, cada linha de luz faz uma filtragem do espectro eletromagnético gerado, operando em condições únicas para cada experimento, além de suportar 40 linhas de luz operando simultaneamente. Atualmente o Sirius conta com dez linhas de luz habilitadas para receberem propostas de pesquisas.

Para garantir uma operação adequada, as especificações de cada linha de luz devem ser seguidas com precisão: algumas exigem um feixe com resolução na ordem de micrômetros, outras na de nanômetros. Portanto, qualquer perturbação no meio de propagação pode comprometer os resultados obtidos.

Desa forma, a estabilidade do feixe é um pré-requisito essencial, e o monitoramento das perturbações torna-se indispensável. Quando falamos de perturbações, as vibrações se destacam como uma das principais fontes. Este trabalho tem como objetivo investigar como essas vibrações se manifestam no solo e em mesas de granito ao longo das linhas de luz em operação, avaliando diferentes pontos de medição e verificando se o desempenho observado atende às exigências específicas de cada linha.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal validar a metodologia de aquisição, tratamento e análise dos dados de vibração do solo –abrangendo o piso do anel e o piso do hall experimental–, bem como das mesas de granito utilizadas nos sistemas de espelhos e PEEM do Sirius.

Além disso, busca estabelecer uma rotina sistemática de monitoramento e processamento dessas vibrações, identificando possíveis pontos de atenção e subsidiando o diagnóstico das fontes de perturbação, com vistas à atenuação ou mitigação desses efeitos.

2 Fundamentação Teórica

De acordo com (BARTOLINI et al., 2008), uma das principais fontes de instabilidade do feixe está relacionada com vibrações, que varrem um amplo espectro de frequências e podem chegar a centenas de Hertz. Ainda segundo BARTOLINI et al., essas vibrações são transmitidas através das vigas de sustentação e podem ser amplificadas por ressonância estrutural.

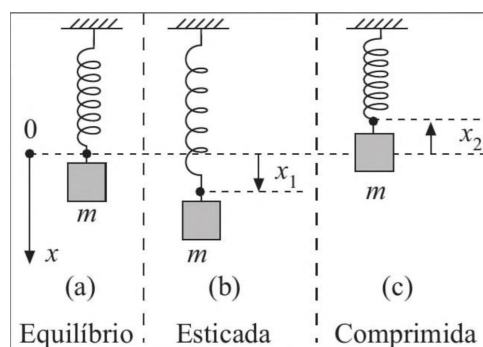
Considerando o impacto dessas vibrações no desempenho do acelerador, torna-se essencial compreender os fenômenos associados à propagação e análise de vibrações. Dessa forma, o presente capítulo aborda princípios de vibrações bem como conceitos fundamentais de análise de sinais, além de apresentar estudos realizados previamente no Sirius e metodologias empregadas em outros aceleradores de partículas.

2.1 Vibrações

Segundo (LAGE, 2020), vibrações podem ser classificadas como uma oscilação em torno de um ponto de equilíbrio. Já segundo (CHU et al., 2024) vibrações são relativa a um ponto de referência, causadas por uma força, podendo ser aleatórias ou periódicas.

O exemplo mais simples para explicar vibrações é através do oscilador harmônico, que pode ser exemplificado por um sistema massa e mola, como o exemplificado na figura 2, que mostra um sistema com uma massa m suspensa verticalmente por uma mola.

Figura 2 – Sistema Massa e Mola.



Representação das posições de uma mola-massa: (a) posição de equilíbrio; (b) mola esticada com deslocamento $x_1 > 0$; e (c) mola comprimida com $x_2 < 0$. Fonte: (NUSSENZVEIG, 2002).

Na figura 2, podemos observar que existe uma posição de equilíbrio estável, (a), onde a força elástica equilibra o peso da massa. Quando a mola é esticada, (b), ocorre um deslocamento $x_1 > 0$ em relação ao ponto de equilíbrio $x = 0$, e quando comprimida, (c), $x_2 < 0$ (NUSSENZ-

VEIG, 2002). A força restauradora que atua sobre a massa é proporcional ao deslocamento e pode ser expressa pela equação

$$F(x) = -kx, \quad (2.1)$$

onde k é a constante elástica da mola. Aplicando a segunda lei de Newton, obtém-se a equação do movimento:

$$m\ddot{x} = -kx, \quad (2.2)$$

ou, de forma equivalente,

$$\ddot{x} = -\omega^2 x, \quad (2.3)$$

sendo a frequência angular

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (2.4)$$

Esse tipo de sistema é denominado oscilador harmônico simples e, para pequenas perturbações em torno da posição de equilíbrio, qualquer sistema com um único grau de liberdade deve obedecer, de forma aproximada, à equação de movimento descrita por 2.3.

O movimento de um oscilador harmônico é conhecido como *movimento harmônico simples* (MHS), e sua solução geral é expressa pela equação 2.5:

$$x(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t), \quad (2.5)$$

onde a e b são constantes determinadas pelas condições iniciais do sistema.

A solução da equação 2.5 representa um movimento periódico, isto é, que se repete em intervalos de tempo iguais. A forma mais intuitiva de visualizar esse comportamento é por meio do gráfico da posição em função do tempo, mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Representação do movimento harmônico simples.

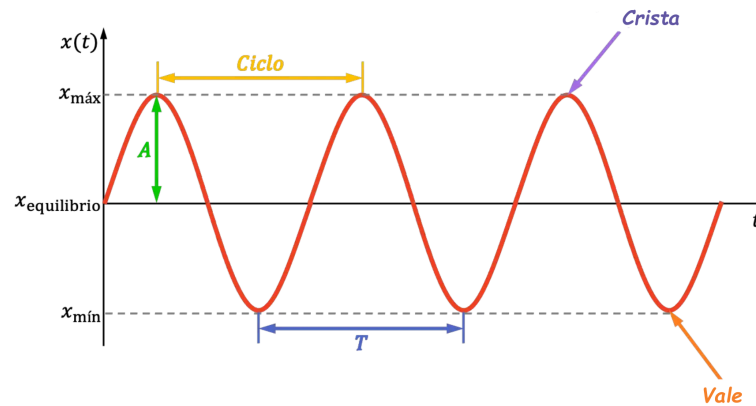


Gráfico da posição em função do tempo para um oscilador harmônico simples, mostrando a oscilação em torno da posição de equilíbrio $x = 0$, com amplitude A , período T , e destacando as cristas e vales que caracterizam o movimento periódico. Fonte: (REYNOLDS, 2023), adaptada.

Na figura, podemos observar que o movimento oscila em torno da posição de equilíbrio $x = 0$, com amplitude A , que representa o deslocamento máximo da massa. O intervalo de tempo necessário para completar uma oscilação completa é o período T . O trecho correspondente a uma repetição completa do movimento é denominado ciclo.

Cada ponto máximo da curva é chamado de crista, enquanto cada ponto mínimo é o vale. Assim, o movimento do oscilador harmônico simples pode ser entendido como uma sequência de ciclos periódicos que se repetem indefinidamente, caracterizados pela frequência angular natural $\omega = \sqrt{k/m}$.

A equação 2.5 também pode ser reescrita de forma equivalente como

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.6)$$

onde A é a amplitude do movimento e φ é a fase inicial, que depende das condições iniciais.

Uma vibração harmônica é, portanto, caracterizada por sua amplitude A , que indica o valor máximo de afastamento da posição de equilíbrio; por seu período T , que é o tempo decorrido entre duas amplitudes consecutivas; e por sua frequência f , dada pelo inverso do período, cuja unidade de medida no SI é o Hertz –Hz–. A frequência então é dada pela equação 2.7,

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.7)$$

Para osciladores harmônicos sujeito à forças externas, a equação 2.3 pode ser reescrita na forma:

$$m\ddot{x} = -kx + f(t) \quad (2.8)$$

Uma forma mais simples de representar um oscilador harmônico sujeito à forças externas é utilizando variáveis complexas. Definindo $z(t)$ como:

$$z(t) \equiv x(t) + \frac{i}{\omega_0} \dot{x}(t), \quad (2.9)$$

A equação de movimento 2.8 é equivalente à equação complexa:

$$\frac{dz}{dt} + i\omega_0 z = \frac{i}{m\omega_0} f(t), \quad (2.10)$$

onde $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ é a frequência natural do sistema (LAGE, 2020).

Quando o oscilador é submetido a uma força periódica do tipo $f(t) = f_0 \cos(\omega t)$, a solução particular, na ausência de amortecimento, é dada por:

$$x_{\text{part}}(t) = \frac{f_0/m}{\omega_0^2 - \omega^2} \cos(\omega t), \quad (2.11)$$

Note que, no limite onde $\omega \rightarrow \omega_0$, o denominador tende a zero e a amplitude tende ao infinito. Tal fenômeno é conhecido como ressonância.

Sabemos que, em sistemas reais, há energia dissipada por atrito, calor e outras formas. Em sistemas oscilantes, essas perdas de energia são consideradas amortecedores pois elas reduzem a amplitude das oscilações gradativamente. Esse efeito pode ser descrito adicionando um termo proporcional à velocidade na equação do movimento

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{f(t)}{m}, \quad (2.12)$$

onde γ representa a taxa de amortecimento.

Para a excitação harmônica $f(t) = f_0 \cos(\omega t)$ a resposta estacionária pode ser escrita usando uma amplitude complexa a tal que $x(t) = \text{Re}\{a e^{i\omega t}\}$ com

$$a(\omega) = \frac{f_0/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\gamma\omega}, \quad (2.13)$$

sendo a amplitude física observada dada por $|a(\omega)|$.

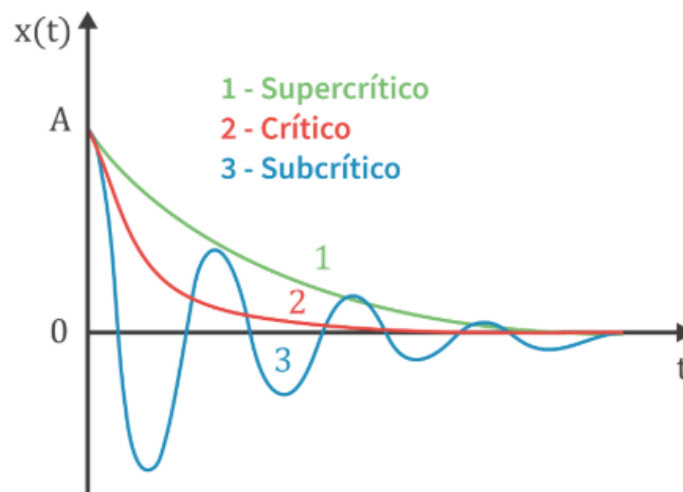
Para o oscilador livre amortecido, ou seja, $f = 0$, a solução geral é

$$x(t) = A e^{-\gamma t} \cos(\omega_d t + \varphi), \quad (2.14)$$

onde $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ é a frequência amortecida.

A figura 4 mostra a evolução temporal para os diferentes regimes de amortecimento. Quando $\gamma > \omega_0$, o decaimento da amplitude decai de maneira muito rápida, esse é o regime com um amortecimento supercrítico (1). Quando $\gamma = \omega_0$ temos o que chamamos de amortecimento crítico (2) em que o sistema retorna à posição de equilíbrio no menor tempo possível sem oscilar e, para $\gamma < \omega_0$, o amortecimento subcrítico, com a amplitude decaindo de forma mais lenta ao longo do tempo (3).

Figura 4 – Evolução temporal sob diferentes regimes de amortecimento.



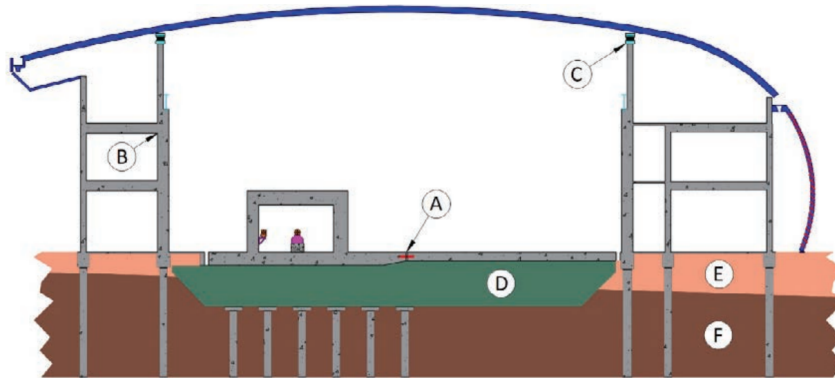
Evolução temporal da amplitude em um oscilador harmônico amortecido, destacando os três regimes: (1) supercrítico ($\gamma > \omega_0$), com decaimento rápido; (2) crítico ($\gamma = \omega_0$), que retorna ao equilíbrio no menor tempo sem oscilar; e (3) subcrítico ($\gamma < \omega_0$), com decaimento mais lento. Fonte: [DOESITY](#).

2.1.1 Vibrações no Sirius

Para entender melhor as vibrações no Sirius, é necessário primeiro entender sobre sua estrutura.

Por se tratar de um laboratório onde as análises feitas exigem estabilidade do feixe para análises em escalas nanométricas, o prédio do Sirius foi construído de forma a atenuar ao máximo as perturbações externas além de segmentar o piso em porções isoladas por juntas de dilatação para evitar a propagação das vibrações entre eles. Dessa forma, o piso do prédio é dividido entre o piso do anel, que é o piso próprio do túnel do anel, e o piso do hall experimental, que é repartido em 20 porções diferentes. Há ainda pisos especiais para as cabanas experimentais que exigem alta estabilidade e linhas de luz que se estendem para fora da circunferência do prédio. (RODRIGUES et al., 2019)

Figura 5 – Corte transversal do edifício Sirius.



Representação esquemática das lajes estruturais do Sirius: (A) junta especial que desacopla as lajes; (B) pilares de concreto fundidos às lajes para maior rigidez; (C) coxins de borracha sob a estrutura do telhado para isolamento de vibrações; (D) camada de solo-cimento que sustenta as lajes; (E) camada de aterro compactado; e (F) solo natural de base. Fonte: (RODRIGUES et al., 2019).

O projeto estrutural, representado pela figura 5, apresenta as lajes de concreto do Sirius, sendo uma de 0,9m sob o túnel do *booster* e outra de 0,6m no hall experimental, desacopladas por uma junta especial (A). Ambas são suportadas por uma camada de solo-cimento (D), que se assenta sobre o solo natural (F) e um sistema de estacas, com uma camada de aterro compactado (E) completando a base. Para garantir estabilidade, os pilares de concreto são fundidos, como um único bloco, com as lajes dos pisos (B), aumentando a rigidez, enquanto a estrutura do telhado é montada sobre coxins de borracha (C) para isolar vibrações do vento.

Ao longo de toda etapa de construção do prédio, foram realizadas medidas de vibrações para validar as características do projeto estrutural apresentado previamente. Os testes foram conduzidos para avaliar a estabilidade do piso, estabilidade relativa, coerência e robustez.

Dessa forma, desde maio de 2018, 32 pontos foram monitorados, periodicamente, obtendo-se, assim, informações sobre a evolução temporal das perturbações ao longo do edifício, conforme instalação de novos equipamentos, como, por exemplo, máquinas de alto vácuo, controladores e unidades de energia para o linac e booster. Os pontos foram distribuídos pelo piso do anel de armazenamento, no hall experimental, nos pisos interno e externo, e nos pisos isolados das estações experimentais. As aquisições de dados foram efetuadas nas direções vertical e horizontal.

Para a realização dos testes, foram utilizados um acelerômetro sísmico Wilcoxon 731A em conjunto com a DAQ NI USB-4431 de 24 bits, que são equipamentos com baixo ruído de fundo, abrangendo um espectro de frequências de 0,5 Hz até 450 Hz. Além disso, para mitigar perturbações indesejadas, todas as medidas foram tomadas à noite, garantindo que os resultados obtidos fossem somente do prédio, sem interferência humana.

Após a coleta dos dados, obteve-se, por fim, as curvas de deslocamento RMS, integrados de 2 Hz a 450 Hz. Para os pisos de anel e hall experimental obteve-se um valor de 6 nm em maio

de 2018, observando um aumento em junho de 2019 onde, para os mesmos pontos, os valores de RMS ficaram entre 11 nm e 13 nm. o aumento observado foi atribuído às instalações dos novos sistemas e equipamentos, já mencionados anteriormente (RODRIGUES et al., 2019).

Além disso, também foram conduzidos testes de vibrações ao longo de uma única linha de luz. Com uma energia entre 2,05 e 15 keV e duas estações experimentais —sub-microsonda TARUMÃ e a nanosonda SAPOTI—, a linha de luz CARNAÚBA é, atualmente, a linha mais extensa do laboratório, com, aproximadamente, 145 metros de distância entre a fonte de luz e o local [Laboratório Nacional de Luz Síncrotron \(LNLS\)](#).

Por ser uma linha muito extensa, e com o tamanho do feixe coerente variando de 500 a 30 nm, a CARNAÚBA exige critérios de estabilidade rígidos.

No estudo realizado, foram empregadas três abordagens metodológicas principais para avaliação de vibrações. As análises modais utilizaram um acelerômetro modal triaxial Kistler 8762A5 e um martelo de impacto instrumentado PCB Instruments 086C03. A estabilidade absoluta do piso e dos componentes foi avaliada com acelerômetros sísmicos Wilcoxon 731 e amplificadores de potência P31. Para as medições de estabilidade relativa de longa distância, geofones Lennartz Eletronic LE-3Dilite foram utilizados em conjunto com os acelerômetros sísmicos, todos sincronizados com precisão nanométrica pelo protocolo White Rabbit, desenvolvido pelo CERN, utilizando fibras ópticas para transmissão dos pulsos de sincronização entre as estações. Todas as aquisições de dados foram realizadas com uma placa de aquisição NI USB-4431 (BUENO et al., 2021).

Houve também tentativas de um estudo de longa duração, porém foram relatadas certas dificuldades no que tange à alimentação dos sensores e armazenamento de dados.

2.1.2 Vibrações em Outros Aceleradores de Partículas

Por exigirem muito da estabilidade do sistema como um todo, análise e monitoramento de vibrações fazem parte da rotina de qualquer acelerador de partículas.

Por exemplo, o LHC —em inglês: Large Hadron Collider— possui um sistema de monitoramento que conta com três estações de coletas ao longo do prédio e um monitoramento contínuo, utilizando um sensor juntamente com um sismógrafo cobrindo, assim, um maior espectro de frequências. Uma DAQ é conectada ao sistema para aquisição desses dados.

Os dados coletados são armazenados em uma rede interna e também integrados à redes externas de monitoramento sísmico, como a GSN, uma rede sismográfica global, e a *Swiss Seismological Network*, sendo compartilhadas no formato de arquivo SEED. Somente os sinais no domínio do tempo e suas respectivas densidades espectrais de potência (PSD) são armazenados (CHARRONDIERE et al., 2018).

Já para o colisor SuperKEKB, testes foram conduzidos em um detector utilizando dois

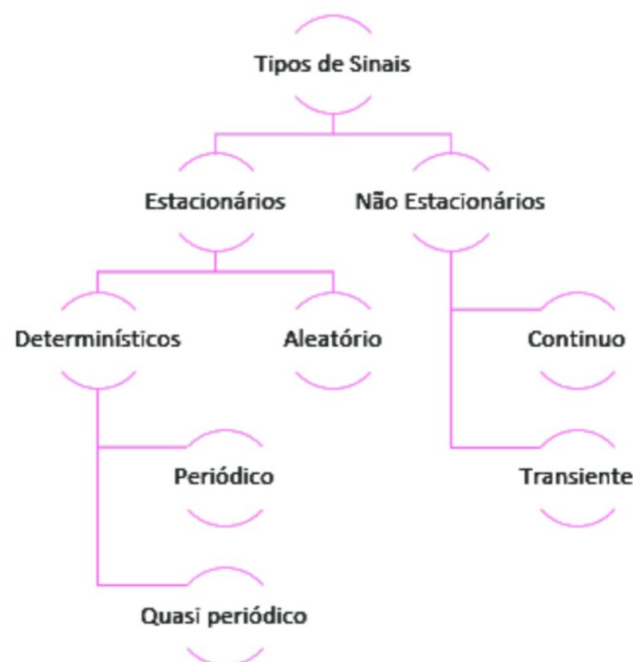
sensores no piso e dois sensores no equipamento em questão, especificamente nos suportes dos criostatos do sistema de foco final. Esta configuração, implementada em ambos os lados do detector Belle II, permitiu monitorar simultaneamente as vibrações do solo e da estrutura mecânica crítica.

Os dados foram adquiridos em regime contínuo a uma frequência de amostragem de 250 Hz. A aquisição é realizada por um sistema CompactRIO da National Instruments juntamente de sensores sísmicos triaxiais do tipo geofone e, para reduzir o volume de dados, dos sinais, que são gravados continuamente, apenas 10 minutos de aquisição são armazenados por hora (SERLUCA et al., 2022).

2.2 Análise de sinais

Quando falamos de um estudo de vibrações, é importante compreender os tipos de sinais gerados e como eles variam com o tempo e com a frequência. As vibrações são sinais de caráter aleatório que carregam informações sobre o ambiente em que se propagam, sendo sua análise essencial para avaliar estabilidade, identificar frequências de ressonância e realizar manutenção preditiva. De acordo com (ENSUS, 2025), podemos classificar os tipos de sinais gerados em dois grandes grupo: Estacionários e Não Estacionários, que se ramificam em outros tipos de sinais, como pode ser visto na figura 6.

Figura 6 – Tipos de Sinais.



Classificação dos tipos de sinais de vibração em estacionários e não estacionários, com suas respectivas subdivisões determinísticas, aleatórias, transientes e contínuas. Adaptado de (ENSUS, 2025).

Sinais estacionários mantêm suas características, tais como, por exemplo, a distribuição da frequência, não se alteram ao longo do tempo. Em sinais não estacionários, o comportamento do sinal muda com o tempo.

Dessa forma, os sinais estacionários podem ser classificados como determinísticos, quando seguem um padrão previsível, ou aleatórios, quando apresentam variações imprevisíveis ao longo do tempo. Já os sinais não estacionários podem ser contínuos, quando suas características evoluem gradualmente, ou transientes, quando ocorrem de forma breve e pontual. Compreender essas distinções é fundamental para uma análise vibracional precisa e para a correta identificação das fontes de vibração.

2.2.1 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Em análises como a do presente trabalho, os dados coletados são obtidos em função do tempo, entretanto, ao mantê-los no domínio do tempo, deixamos de obter informações importantes e portanto, é necessário realizar uma mudança de domínio. A transformada de Fourier é uma técnica matemática que converte sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência e a transformada de Fourier $X(f)$ de um sinal $x(t)$ é dada pela equação 2.15 (ARRUDA; HUALLPA, 2008),

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt, \quad (2.15)$$

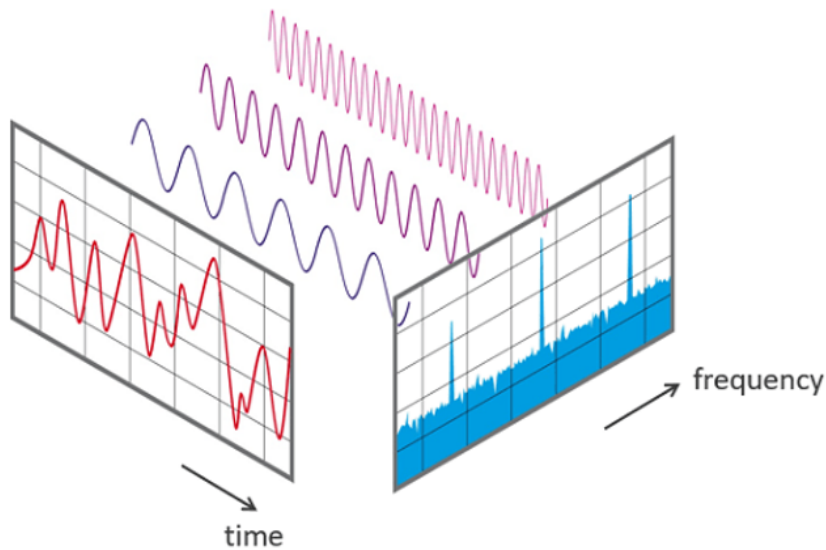
onde $X(f)$ é a representação do sinal no domínio da frequência, $x(t)$ é o sinal no domínio do tempo, f representa a frequência em hertz, e o termo exponencial $e^{-i2\pi ft}$ corresponde à função base complexa usada para decompor o sinal em suas componentes senoidais.

A transformada de Fourier decompõe um sinal em uma soma infinita de senos e cossenos, cada uma com determinada amplitude, para formar o domínio da frequência, como está ilustrado na figura 7. (ENSUS, 2025)

A transformada de Fourier rápida (FFT) é uma ferramenta computacional que não atua sobre o conjunto de dados de uma vez, mas sim de forma recursiva, discretizando a equação 2.15, calculando a transformada para elementos individuais e, em passos subsequentes, combina esses resultados de forma eficiente para derivar a transformada de pares e, depois, de agrupamentos ainda maiores até que a Transformada de Fourier do sinal como um todo seja reconstruída, oferecendo uma enorme economia computacional para o processamento de grandes massas de dados (ARRUDA; HUALLPA, 2008).

Apesar de precisa, a transformada de Fourier possui um erro induzido causado pelo fato de todo dado analisado ser finito no tempo, gerando um "vazamento" de um frequência ao longo de todo o espectro, distorcendo os resultados. Esse erro é conhecido como *leakage* (Siemens PLM, 2019).

Figura 7 – Visão geral de uma FFT.

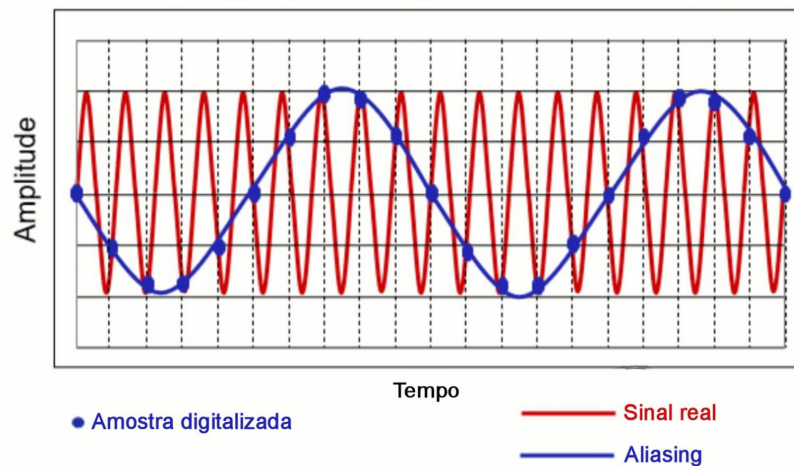


Visão geral da transformada rápida de Fourier onde o gráfico em azul mostra o comportamento no tempo e, em azul, na frequência. Fonte: (MACHBASE, 2024).

Pra contornar esse erro, o sinal é dividido em janelas de tempo τ , que se sobrepõem por uma certa porcentagem do seu tamanho por um processo conhecido como *overlapping*, e em cada uma delas pode ser aplicado o janelamento por meio de uma multiplicação. Há diversos tipos de janelas que podem ser aplicadas e, para o presente trabalho, foi utilizada a janela *Hanning*, devido à sua eficiência em minimizar as discontinuidades nas extremidades das janelas do sinal, sem comprometer de forma relevante a resolução (ARRUDA; HUALLPA, 2008). A janela *Hanning* é descrita pela equação 2.16.

$$p(t) = \begin{cases} 0, & t < -\frac{\tau}{2} \\ \cos^2\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), & -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & t > \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (2.16)$$

Há ainda um segundo erro a ser considerado, dessa vez associado à captação do sinal, conhecido como *Aliasing*. Tal erro se dá pela distorção causada pela diferença entre a frequência com que os dados são coletados e a frequência real dos sinais, que ocorre quando a taxa de amostragem digital não é suficiente para capturar as variações de um sinal analógico, o que pode levar a uma representação incorreta, como ilustrado na figura 8 (DISW, 2019).

Figura 8 – Representação de um sinal real e um sinal *Aliasing*.

Diferença entre o sinal real e o Representação de um sinal real, em vermelho e um sinal *Aliasing*, em azul, Fonte: (DISW, 2019), adaptado.

Para evitar esse tipo de erro, é necessário respeitar a condição imposta pelo Teorema de Nyquist, que estabelece que a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, o dobro da maior frequência presente no sinal. Esse teorema garante que o sinal possa ser reconstruído corretamente, sem sobreposição de espectros ou distorções (DISW, 2019).

A Transformada Rápida de Fourier gera o espectro médio de frequências presentes em um sinal durante toda a aquisição, sendo indicada para sinais estacionários ou quando se busca a média de energia em cada frequência, entretanto, a FFT por si só nem sempre é suficiente para uma análise completa, principalmente se objeto de estudo em questão está submetido a carregamentos aleatórios. Dessa forma, faz-se necessário o uso de outras ferramentas de análise.

2.2.2 Densidade Espectral de Potência (PSD)

A Densidade Espectral de Potência, também conhecida como PSD (Power Spectral Density), é uma ferramenta estatística que descreve como a potência de um sinal de vibração aleatória está distribuída em função da frequência. A partir do espectro gerado pela FFT, a equação 2.17 calcula uma medida estatística que determina o conteúdo energético presente em cada frequência (ARRUDA; HUALLPA, 2008),

$$S_{xx}(f) = |X(f)|^2 = \bar{X} \cdot X, \quad (2.17)$$

onde \bar{X} representa seu conjugado complexo.

Como forma de atenuar o ruído presente na estimativa da PSD, à custa de uma pequena perda de resolução no domínio da frequência, adotado-se um método conhecido como Método de

Welch. Nesta técnica, o sinal é inicialmente segmentado em janelas, que podem ser sobrepostas. Após o cálculo da PSD para cada um desses segmentos janelados, o resultado final é obtido pela média desses espectros individuais. Esta média é então normalizada pela frequência de aquisição do sinal e por um fator $\frac{U}{L}$, onde L denota o comprimento de cada janela e o fator U é calculado pela seguinte expressão:

$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} W^2(j). \quad (2.18)$$

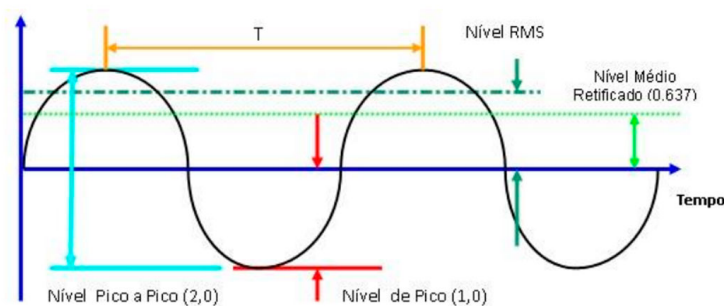
A PSD é, portanto, uma das principais ferramentas de análise de sinais, pois permite identificar a distribuição energética do movimento vibratório ao longo das diferentes frequências. A partir dessa distribuição, é possível calcular medidas globais do sinal, como a Raiz Quadrada Média (RMS), que quantifica a intensidade total do movimento vibratório em uma única métrica.

2.2.3 Raiz Quadrada Média (RMS)

A Raiz Quadrada Média, também conhecida como RMS, é um dado estatístico que representa a intensidade total do movimento vibratório, considerando tanto as amplitudes quanto as frequências de todos os componentes que formam o sinal.

Na figura 9 temos uma representação com um exemplo numérico apresentando os níveis de pico a pico, RMS e nível médio retificado, que é o valor médio absoluto de um sinal.

Figura 9 – Representação de uma onda senoidal e suas medições.



Características de uma Onda Senoidal: Níveis de Pico, Pico a Pico, RMS e Médio Retificado, com exemplo numérico. Fonte: (Engfaz, 2025).

Para medir, especificamente, o desvio efetivo em relação a um valor de referência, como a média, é calculado o que chamamos de amplitude de deslocamento RMS. O deslocamento RMS é obtido a partir da integral da PSD na frequência, em termos de deslocamento, fornecendo uma média estatística da amplitude do deslocamento em determinada frequência. Essa é integral

é calculada de modo cumulativo e inverso, o que permite visualizar diretamente a contribuição energética de cada componente de uma frequência e de todas as superiores a ela, e é expressa pela equação 2.19 (SERLUCA et al., 2022),

$$x_{\text{rms}}(f_{\text{min}}) = \sqrt{\int_{f_{\text{min}}}^{\infty} S_{xx}(f) df}. \quad (2.19)$$

Portando, a RMS é uma ferramenta que possibilita não apenas quantificar a intensidade total do movimento, mas também identificar quais faixas de frequência contribuem de forma mais significativa para o comportamento vibratório do sistema, fornecendo uma visão completa do perfil energético do sinal.

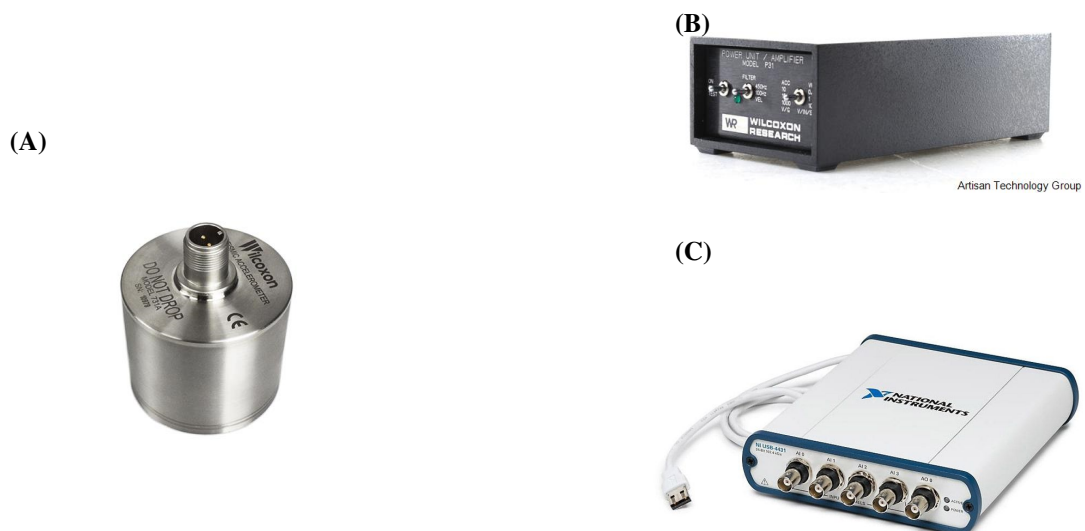
3 Metodologia

Para garantir a confiabilidade e replicabilidade de resultados, criar uma metodologia, com uma rotina de coleta e análise de dados, é um passo de fundamental. Para o presente trabalho, primeiro utilizou-se uma metodologia já empregada anteriormente porém sentiu-se a necessidade de revisão e aprimoramento do método. Dessa forma, realizou-se um estudo dos pontos a serem medidos e, foi-se ajustando os parâmetros de aquisição conforme a necessidade.

3.1 Equipamentos de Medição

Para a coleta de dados, foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico Wilcoxon 731A, item A da figura 10, que possui uma faixa de frequências de 2Hz até 450Hz e uma sensibilidade de 10V/g. Para a amplificação do sinal do acelerômetro, utilizou-se um amplificador correspondente Wilcoxon P31, item B da figura 10, com um ganho (ACC) de 1000 V/g, escolhido empiricamente em medições anteriores e, portanto, para estabelecer um padrão, continuou-se com utilizando tal ganho. Para a aquisição de dados, foi utilizada uma DAQ (Data Acquisition), da National Instruments, NI DAQ USB-4431, item C da figura 10, conectada à um notebook.

Figura 10 – Equipamentos utilizados para aquisição dos dados.

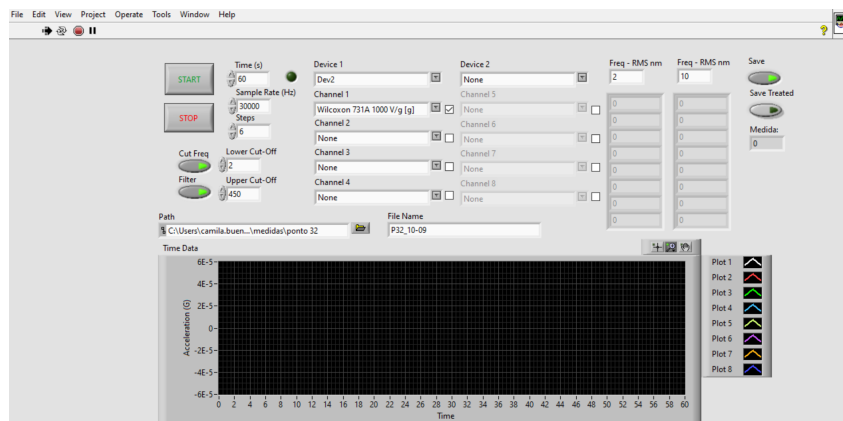


Equipamentos utilizados nas medições onde: (A) Acelerômetro Wilcoxon 731A; (B) Amplificador Wilcoxon P31; (C) NI DAQ USB-4431.

Fonte: Adaptado de ([DigiKey Electronics, 2025](#); [Artisan Technology Group, 2025](#); [AMC – Analytik & Messtechnik GmbH Chemnitz, 2025](#)).

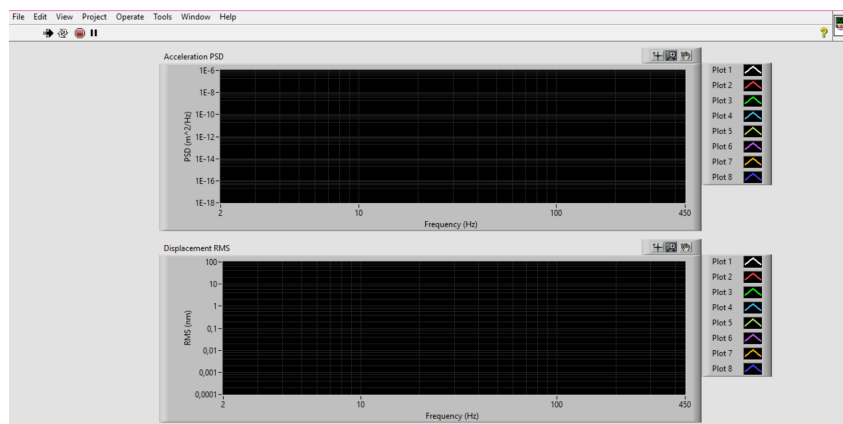
A interface de aquisição foi feita através de diagramas de blocos no software NI LabView 2019 SP1. Na figura 11 é possível visualizar a interface principal do programa, já com os parâmetros de aquisição utilizados. Pode-se ver também que, na figura 11, temos um espaço que gera um gráfico "Time Data" e na figura 12 temos os gráficos "Acceleration PSD" e "Displacement RMS", que são utilizados para validar a medida logo após sua aquisição. Todo o tratamento de dados foi através de códigos em python no MATLAB R2022a, disponíveis no repositório do LNLS, e no Spyder 6, desenvolvido recentemente para melhor representação visual dos valores de RMS médio ao longo das semanas.

Figura 11 – Interface do programa LabView para aquisição de dados.



Interface de aquisição de dados feita com o LabView. Parte 1 — Configuração dos parâmetros de aquisição e visualização da curva Time Data. Fonte: Diagrama disponível no repositório do LNLS.

Figura 12 – Interface do programa LabView para aquisição de dados - Parte 2.



Interface de aquisição de dados feita com o LabView. Parte 2 — Visualização das curvas de PSD e RMS. Fonte: Diagrama disponível no repositório do LNLS.

3.2 Roteiro de medições

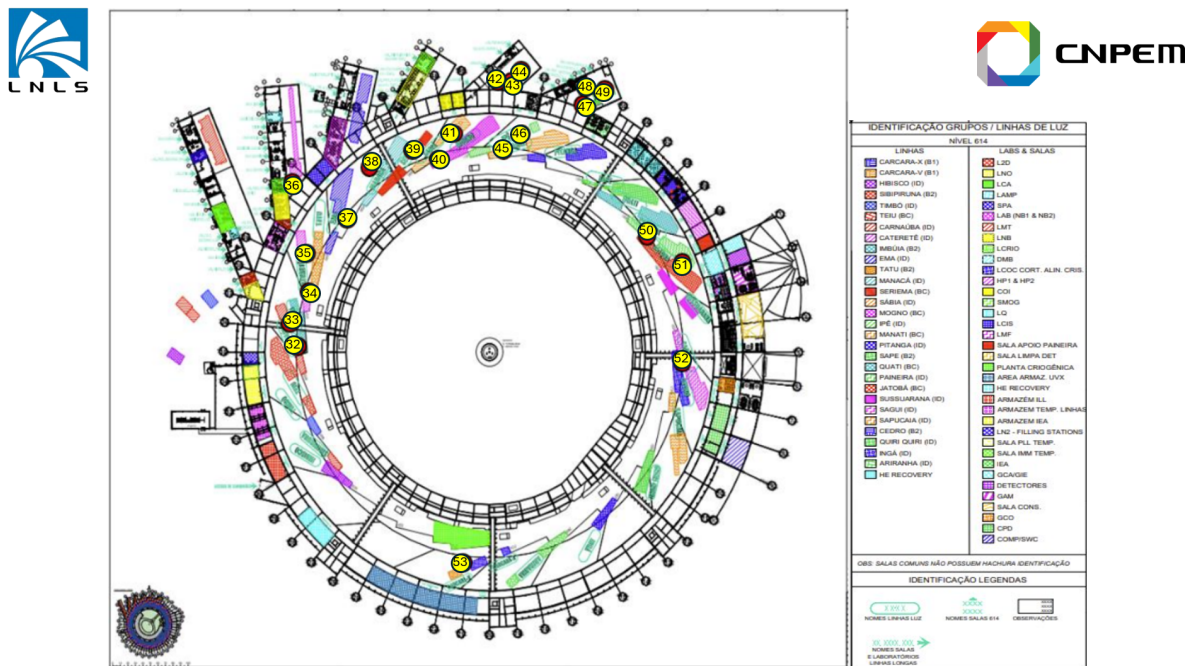
A priori, foram mantido todos os pontos de medição já estabelecidos previamente, separando-os em pontos externos e pontos internos, sendo os pontos internos àqueles dentro das

cabanas experimentais, e os pontos externos divididos em: piso do anel, piso do hall experimental e pontos especiais como: piso especial, mesas de granito dos espelhos e PEEM, obtendo um total de 53 pontos.

Para as medidas realizadas nos pontos internos, era necessário que a coleta de dados acontecesse somente em dias de estudos de máquina, pois nesses dias, especificamente, não havia feixe dentro das cabanas experimentais e, portanto, era seguro a realização das medições, além disso, era necessário comunicação interna com a linha de luz e, com isso em mente, decidiu-se que, à princípio, as medições seriam feitas somente nos pontos externos.

Após dois meses de medições e tratamentos de dados dos pontos externos, chegou-se a conclusão de que as medidas dos pontos internos não seriam tão relevantes assim para o estudo. Tal conclusão será melhor abordada na discussão dos resultados. O mapa com a localização dos pontos externos pode ser visualizado na figura 13 e as especificações podem ser verificadas na tabela 1.

Figura 13 – Mapa dos Pontos de Medições Externos.



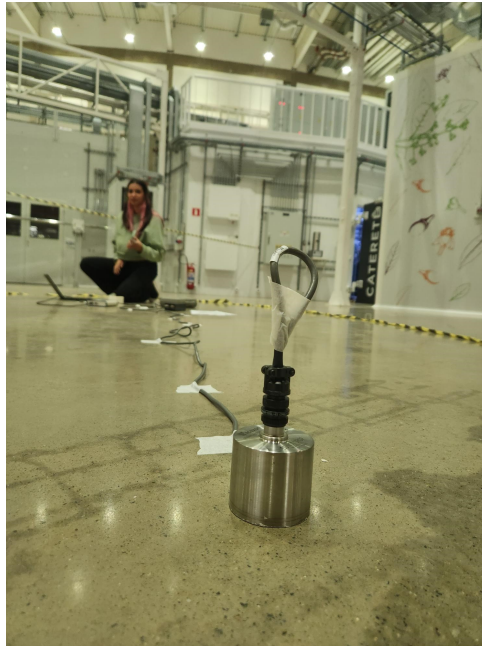
Mapa do Sirius com cada ponto de medição externo indicado em amarelo. Fonte: Repositório LNSL.

| Pontos | Linha | Descrição |
|---------------|--------------|---------------------------|
| 32 | CNB/IMB | Piso do anel |
| 33 | CNB/IMB | Piso do hall experimental |
| 34 | CAT | Piso do anel |
| 35 | CAT | Piso do hall experimental |
| 36 | CAT | Piso especial |
| 37 | EMA/MNC | Piso do anel |
| 38 | EMA/MNC | Piso do hall experimental |
| 39 | MNC | Piso do hall experimental |
| 40 | SAB/MGN | Piso do anel |
| 41 | SAB/MGN | Piso do hall experimental |
| 42 | SAB | M3 |
| 43 | SAB | Piso especial |
| 44 | SAB | PEEM |
| 45 | IPE | Piso do anel |
| 46 | IPE | Piso do hall experimental |
| 47 | IPE | M6 |
| 48 | IPE | Piso especial |
| 49 | IPE | M7 |
| 50 | PNR | Piso do anel |
| 51 | PNR | Piso do hall experimental |
| 52 | CED | Piso do anel |
| 53 | CAX | Piso do hall experimental |

Tabela 1 – Descrição dos pontos de análise

Com os pontos definidos, manteve-se a rotina de medições todas às segundas-feiras para manter o padrão de medição. Para a coleta de dados, foi montado a seguinte configuração: o acelerômetro foi fixado no local da medição utilizando cera de abelha e conectado ao seu respectivo amplificador através de um cabo MIL-C-5015, que foi fixado ao chão com fita adesiva para garantir a estabilidade do fio durante as medições, como pode ser visto na figura 14. O terminal de saída do amplificador foi conectado no terminal de entrada da DAQ pelo cabo BNC e, por fim, o terminal de saída da DAQ foi conectado na entrada USB do notebook, utilizando um cabo USB, sempre conectando os cabos exatamente nos mesmos terminais tanto na DAQ quanto no notebook, para minimizar os erros na aquisição dos dados. Os pontos exatos onde o acelerômetro foi colocado, foram marcados com fita adesiva no chão com o número de identificação do ponto de medição, dessa forma, garantiu-se que todas as medidas foram realizadas no mesmo local.

Figura 14 – Configuração de Fixação do Acelerômetro.



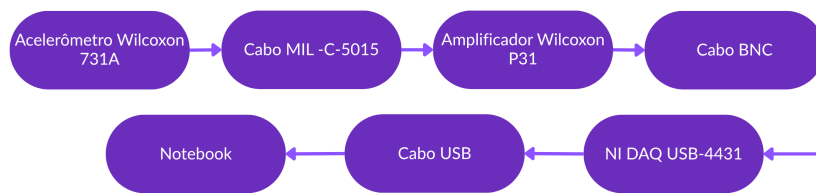
Configuração do acelerômetro fixado no ponto de medição, conectado ao amplificador, que por sua vez se conecta à DAQ, com saída da DAQ ligada ao notebook via USB. Fonte: Autoral.

Inicialmente, utilizou-se a mesma configuração de aquisição já pré-estabelecida, tomando 5 medições de 120 segundos cada a uma taxa de aquisição de 10000Hz, levando em consideração que a primeira coleta de dados sempre deve ser descartada por motivos de estabilização da DAQ, notou-se que, mesmo com um intervalo de tempo de coleta relativamente longo, o número de medições feitas que de fato seriam analisadas, não eram suficiente. Além disso, o tempo de coleta era relativamente longo, o que demandava demais do notebook, fazendo-se necessárias diversas pausas nas medições para recarregar a bateria e, com isso, fazer medições em todos os pontos em um único dia tornou-se um desafio. Para contornar essas dificuldades, aumentou-se o número de medições para 6 medidas por ponto, diminuiu-se o tempo por medida, para 60 segundos e aumentou-se a taxa de aquisição para 30 KHz. Notou-se um aumento no número de pontos medidos por dia porém ainda demandava muito da bateria do notebook.

Por fim, para a solução do problema, optou-se pelo uso de um nobreak (Eaton 9130). Todas as medições foram feitas com o notebook desconectado do nobreak para mitigar frequências relacionadas à eletricidade que não estivessem relacionadas ao ponto em si. O set up de aquisição de dados pode ser conferido no diagrama da figura 15.

Com as novas configurações de aquisição e setup de aquisição, foi possível estabelecer uma rotina de medições.

Figura 15 – Diagrama do setup utilizado nas medições.



Fonte: Autoral.

3.3 Tratamento dos Dados

Com as medições feitas, o tratamento de dados foi feito através de códigos no Matlab e no spyder 6 e, utilizando os parâmetros mostrados na tabela 2, foi possível obter as curvas de FFT, PSD e RMS.

Tabela 2 – Parâmetros de aquisição e processamento do sinal de vibração

| Parâmetro | Valor |
|------------------------------|-----------|
| Tempo de aquisição | 60 s |
| Taxa de aquisição | 30 000 Hz |
| Número de aquisições | 5 |
| Frequência de corte inferior | 2 Hz |
| Frequência de corte superior | 450 Hz |
| Janela | Hanning |
| Tamanho da janela | 10 s |
| Overlapping | 60% |

Uma vez obtido os gráficos, foram coletados os valores do RMS cumulativo em 2Hz, pois é onde se encontra o deslocamento máximo na região de interesse e feita uma média por ponto. Identificados os picos com maiores destaques na PSD, foram coletadas suas respectivas frequências, mostrando a contribuição de cada frequência em determinado ponto e sua evolução ao longo do tempo. Os resultados foram separados por pontos e todos os gráficos e tabelas foram organizados em apresentações de PowerPoint organizadas por mês e, no final, uma apresentação somente com os gráficos, também separados por pontos, contendo todas as medidas já feitas, para melhor visualização da evolução temporal.

Também foi feito, utilizando um código no spyder 6, um programa que utiliza os valores de frequências obtidas na análise da PSD e identifica quais dessas frequências são harmônicas de uma outra frequência.

Também utilizando a ferramenta spyder 6, foi gerado um código que lê os valores de RMS médio e produz um gráfico que mostra a variação do RMS cumulativo ao longo do tempo.

Por fim, utilizando planilhas do Excel, também separando por ponto, foram colocadas

todas as frequências coletadas na PSD, comparando-as com as frequências coletadas no mesmo ponto, porém em dias diferentes, observando-se assim quais frequências eram mais presentes no ponto em questão e quais delas desapareciam e reapareciam subitamente, tentando assim estabelecer alguma conexão dessas frequências com os equipamentos presentes em torno do ponto de medição, uma vez que todos os equipamentos foram identificados para estudos posteriores de diagnóstico.

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia descrita anteriormente. Para fins de organização e comparação, os dados foram agrupados em três categorias: Piso do Anel, Piso do Hall Experimental e Pisos Especiais. Em cada categoria, são dispostas as curvas de FFT, RMS e PSD referentes aos pontos selecionados, geradas a partir das medições realizadas nos dias 18/08/2025 e 25/08/2025.

Também são exibidas as frequências de maior destaque identificadas ao longo do tempo, determinadas por meio da PSD, utilizando um sistema de cores que diferencia a relevância relativa de cada frequência: vermelho para as de maior destaque, laranja para destaque intermediário e preto para as menos relevantes. Por fim, apresentam-se tabelas contendo os valores máximo, mínimo e médio do RMS cumulativo de cada ponto, além de uma curva temporal que representa a evolução do RMS cumulativo médio ao longo das medições.

Como pode ser visto na tabela 1, foram coletadas medidas de vinte e dois pontos numerados de 32 a 53. Dos vinte e dois pontos, sete deles são classificados como piso do anel, oito são piso do hall experimental, três deles são pisos especiais de linhas que possuem um comprimento maior que a circunferência do Sirius e quatro deles são medidas feitas no granito que sustenta componentes ópticos, como espelhos, e PEEM para microscopia de fotoemissão de elétrons.

Figura 16 – Dias e pontos em que foram realizadas medições.

| Dia | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 |
|------------|------------|----|------------|----|----|------------|------------|----|----------------------------|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|------------|----|----|----|
| 16/06/2025 | | | Loc Antiga | | | Loc Antiga | Loc Antiga | | Loc Antiga / Anel / Deslig | | | | | | | | | | | | | |
| 23/06/2025 | Loc Antiga | | | | | | | | | | | | | Loc Antiga | | | | | Loc Antiga | | | |
| 30/06/2025 | | | | | | Loc Antiga | Loc Antiga | | Loc Antiga | | | | | Loc Antiga | | | | | | | | |
| 07/07/2025 | Loc Antiga | | Loc Antiga | | | Loc Antiga | Loc Antiga | | Loc Antiga | | | | | | | | | | | | | |
| 14/07/2025 | | | | | | | Loc Antiga | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11/08/2025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18/08/2025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25/08/2025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01/09/2025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10/09/2025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15/09/2025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06/10/2025 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Distribuição dos dias e pontos onde as medições foram realizadas. Fonte: Autoral.

A figura 16 apresenta uma planilha contendo todos os pontos de medições e os dias em que essas medições foram feitas. Em rosa, temos todas as medidas válidas, ou seja, as que servem como dados para análises e, em cinza, temos medidas que foram realizadas, porém descartadas

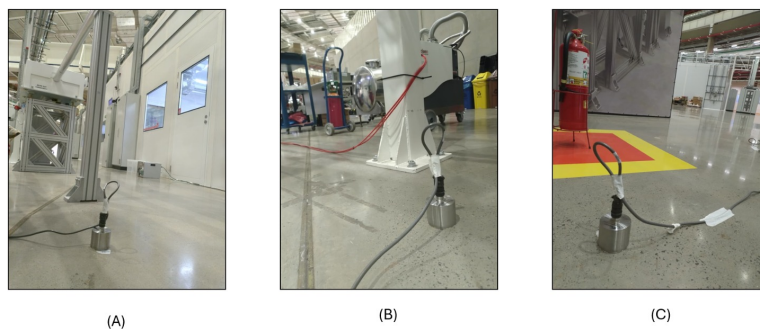
por terem sido realizadas no piso errado, sinalizadas como "loc antiga"— referente a "localização antiga"— e finalmente, medidas que não foram feitas por falta de tempo.

Note que dia 25 de agosto não foi um dia de estudo de maquina, mas, como os pontos de medições são externos, não houve problemas na tomada de dados em dia de feixe ativo para as cabanas experimentais.

4.1 Piso do Anel

O piso do anel do Sirius foi construído para ser um piso homogêneo portanto, essa seção será dedicada a analisar a homogeneidade do piso. Como o presente trabalho não tem como foco uma análise detalhada do piso do anel especificamente, e pela quantidade de dados, limitaremos essa análise a apenas 3 pontos do anel levando em consideração suas distâncias.

Figura 17 – Pontos 32, 45 e 52 do piso do anel.



Pontos de medição no piso do anel onde: (A) Ponto 32, (B) ponto 45 e (C) ponto 52. Fonte: Autoral.

4.1.1 Ponto 32

O primeiro ponto do piso do anel é o ponto 32, localizado no eixo 35 e desse piso saem as linhas de luz Carnaúba e Imbuia.

Como pode ser visto na figura 16, o primeiro dia de medidas válidas para o ponto 32 foi no dia 11 de agosto. No dia 05 de agosto houve um problema com um dipolo dentro do túnel e, por esse motivo, o feixe teve que ser desligado e, portanto, nesse dia, que deveria ser um dia de estudo de máquina, o feixe ainda não havia sido reativado.

As figuras 18, 19 e 20 apresentam, respectivamente, os gráficos de FFT, RMS cumulativo e PSD obtidos a partir das medidas tomadas no dia 11 de agosto.

As figuras 21, 22 e 23 mostram as mesmas análises para o dia 25 de agosto, permitindo observar possíveis variações no comportamento vibracional ao longo do tempo.

Figura 18 – FFT ponto 32 dia 11/08.

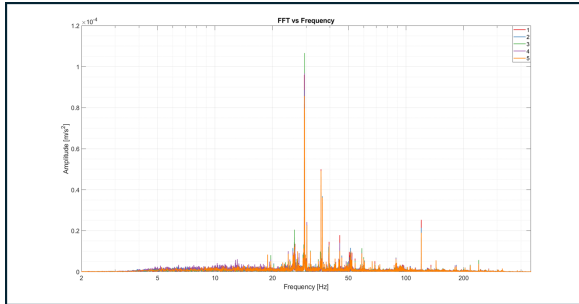


Figura 19 – RMS ponto 32 dia 11/08.

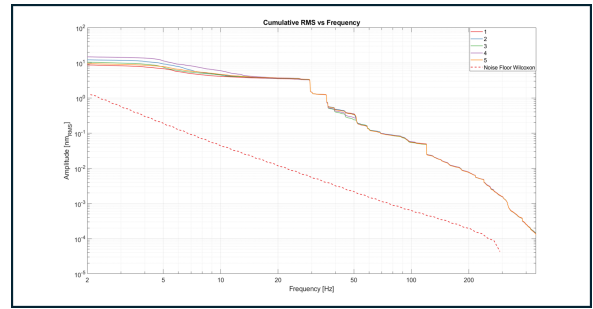
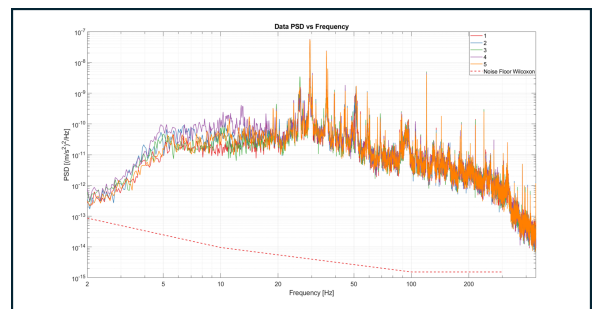


Figura 20 – PSD ponto 32 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 22 – RMS ponto 32 dia 25/08.

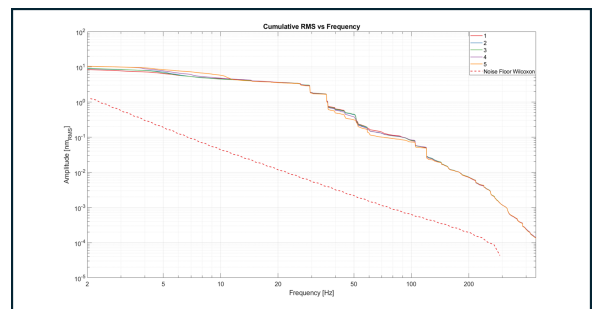


Figura 21 – FFT ponto 32 dia 25/08.

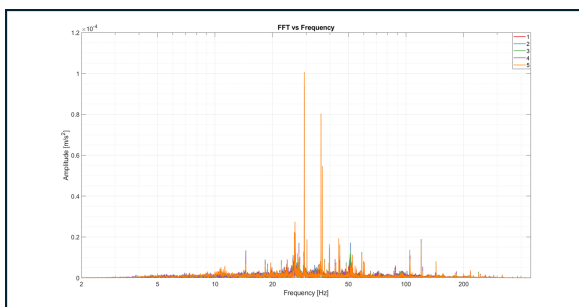
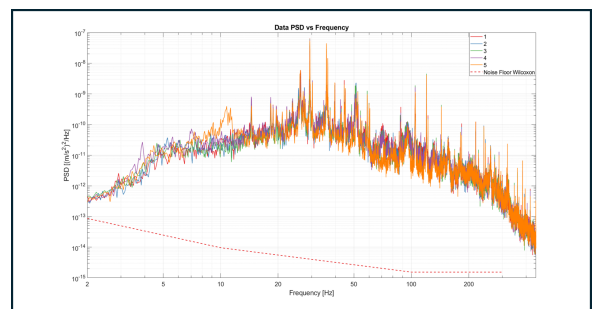


Figura 23 – PSD ponto 32 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

A figura 24 mostra as frequências de maior destaque para o ponto 32 e sua evolução ao longo do tempo: a cor vermelha representa maior amplitude, laranja representa uma amplitude moderada e preto representa baixa amplitude. Todos os valores de frequência identificados para o ponto 32 podem ser conferidos na figura 84 presente no apêndice A.

Figura 24 – Frequências de destaque do ponto 32.

| 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 3,89 | 4,86 | | | 4,18 |
| | | 11,27 | | | | 11,27 |
| | | | | | | 12,36 |
| | | 14,48 | | | 14,99 | 14,42 |
| | | | | | 17,22 | 16,82 |
| 18,83 | | 18,82 | 18,82 | | | |
| 19,63 | | 19,57 | 19,57 | 19,57 | 19,57 | 19,91 |
| 24,66 | | | 24,55 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| | 25,29 | 25,63 | | 25,52 | | |
| 26,04 | 26,21 | 26,26 | 26,21 | 26,44 | 26,21 | 26,15 |
| 29,41 | 29,41 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,41 | 29,35 |
| 30,27 | 29,98 | 30,27 | 30,27 | 30,27 | 30,27 | 30,16 |
| 35,88 | 35,88 | 35,88 | 35,88 | 35,87 | 35,88 | 35,88 |
| 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,51 |
| 38,17 | | | 37,48 | 37,48 | 37,48 | |
| 39,54 | 39,77 | 39,71 | 39,77 | 39,71 | 39,88 | 40,34 |
| 42,51 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | | | 42,45 |
| 44,98 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 |
| | 45,09 | 45,03 | 45,15 | 44,98 | | 45,49 |
| 46,12 | | | 46,12 | 46,12 | | |
| | | | | 47,84 | 47,89 | 48,07 |
| | | 48,64 | | 48,64 | 48,63 | 48,27 |
| | 50,35 | | 50,01 | 50,01 | | |
| 51,38 | | 51,33 | | | 51,21 | |
| | | 52,41 | 52,41 | 52,41 | 52,41 | |
| 54,13 | | 54,13 | 54,07 | 54,24 | | |
| 58,71 | 58,71 | 58,65 | | 58,65 | 58,36 | |
| 60,02 | | 59,97 | 60,02 | 60,08 | | 59,51 |
| 66,43 | | 60,6 | | 60,6 | 60,6 | |
| | | | 97,49 | | 97,66 | |
| 88,58 | 88,23 | 88,06 | 88,75 | 88,81 | 88,86 | 88,92 |
| | | | 90,12 | | | |
| 105 | 104,66 | 104,71 | 104,71 | 104,71 | 104,77 | 104,77 |
| | | | | | | 106,72 |
| | | | 107,69 | | | |
| 112,09 | | 112,21 | 111,98 | 112,03 | 112,09 | |
| 120,11 | 120,05 | 119,93 | 119,99 | 120,16 | 120,11 | 119,99 |
| | 122,22 | 122,28 | 122,45 | 122,57 | 122,57 | 122,62 |
| 135,04 | | 134,98 | 135,33 | 134,98 | | |
| 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 |
| | | 155,98 | 156,15 | 155,41 | 155,92 | |
| 180,7 | | 180,76 | 180,64 | 180,59 | 180,47 | 181,05 |
| 183,05 | | 183,51 | 183,33 | 183,33 | 183,44 | 183,56 |
| 216,64 | | 217,44 | 217,67 | 217,04 | 216,75 | |
| | | 224,99 | | | | |
| 240,21 | 239,87 | 240,1 | 239,98 | 240,33 | 240,38 | 239,98 |
| | 244,5 | 244,62 | 244,9 | 245,13 | 245,14 | 245,25 |
| | | 260,29 | 259,84 | 260,12 | 260,47 | 260,75 |
| 271 | | | | | | |
| | | 273,68 | 273,17 | | | 274,49 |
| | | 288,16 | 288,1 | 288,11 | | |
| 303,04 | | 303,04 | | 300,41 | | |
| 319,12 | 319 | 319,06 | 319,12 | 318,66 | 319,63 | |
| | | 360,14 | 360,2 | 360,43 | 360,43 | 359,86 |
| 382,23 | 383,03 | 382,92 | 382,63 | 382,52 | 384,81 | 382,46 |
| | | | | 404,95 | 404,55 | 404,49 |
| | | 420,11 | | 420,11 | 420,06 | 420,57 |

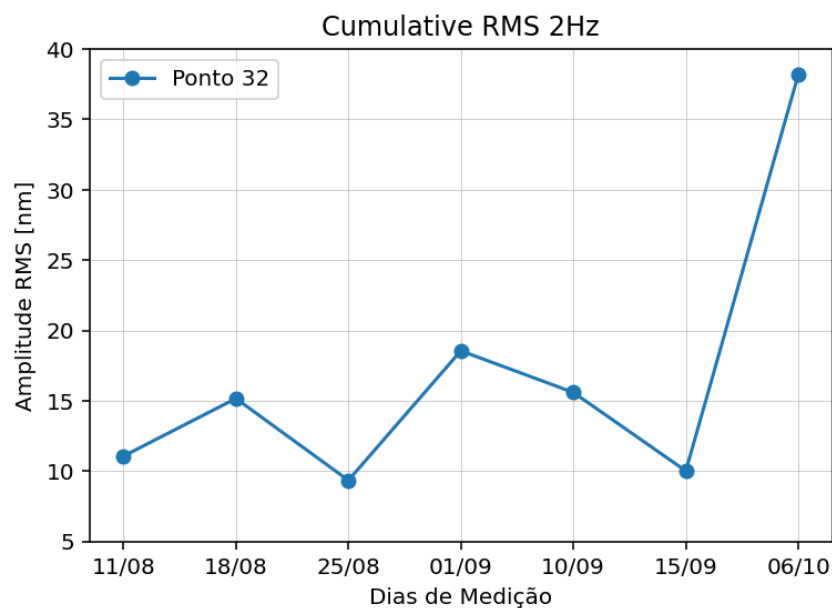
Fonte: Autoral.

O valores do RMS cumulativo máximo, mínimo e médio ao longo do tempo para o ponto 32 podem ser vistos na tabela 3 e a curva da figura 25 mostra a variação do RMS cumulativo médio, em 2 Hz, ao longo do tempo.

Tabela 3 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 32 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 11/08/25 | 14,72 | 8,67 | 11,06 |
| 18/08/25 | 20,81 | 9,81 | 15,16 |
| 25/08/25 | 10,31 | 8,29 | 9,34 |
| 01/09/25 | 26,69 | 14,21 | 18,55 |
| 10/09/25 | 13,54 | 11,74 | 12,59 |
| 15/09/25 | 14,23 | 8,09 | 10,01 |
| 06/10/25 | 47,38 | 28,17 | 38,18 |

Figura 25 – RMS cumulativo médio do ponto 32.



Fonte: Autoral.

4.1.2 Ponto 45

O ponto 45, situado no eixo 40, é o ponto intermediário entre o primeiro ponto do piso do anel e o ponto mais distante e seu piso é referente à linha de luz IPÊ. A primeira avaliação experimental foi feita no dia 14 de julho, como pode ser visto na figura 16.

As figuras 26, 27 e 28 apresentam as curvas de FFT, RMS e PSD, respectivamente, coletados no dia 11 de agosto.

E as figuras 29, 30 e 31 apresentam as curvas de FFT, RMS e PSD, respectivamente, coletados no dia 25 de agosto.

Figura 26 – FFT ponto 45 dia 11/08.

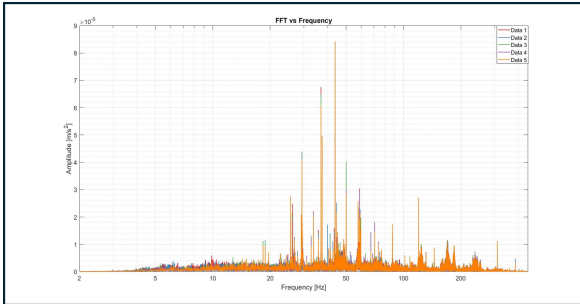


Figura 27 – RMS ponto 45 dia 11/08.

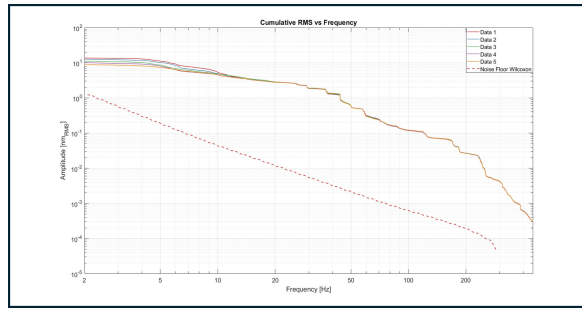
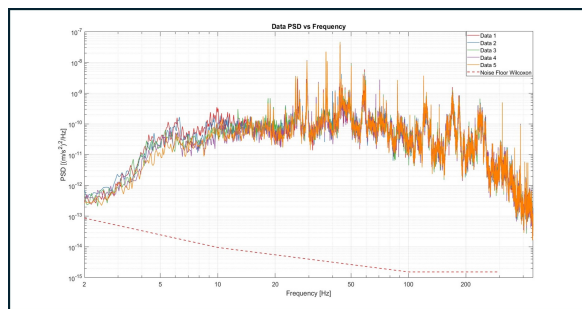


Figura 28 – PSD ponto 45 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 30 – RMS ponto 45 dia 25/08.

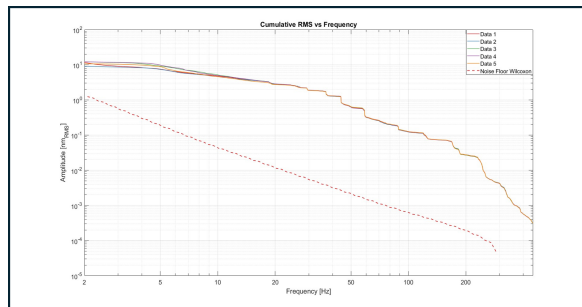


Figura 29 – FFT ponto 45 dia 25/08.

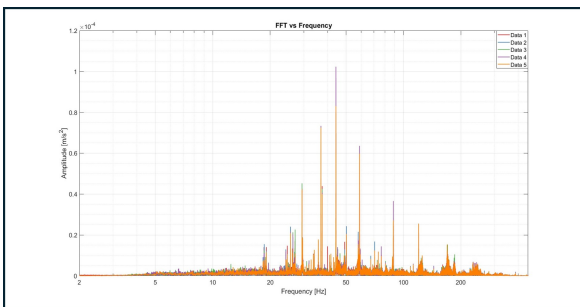
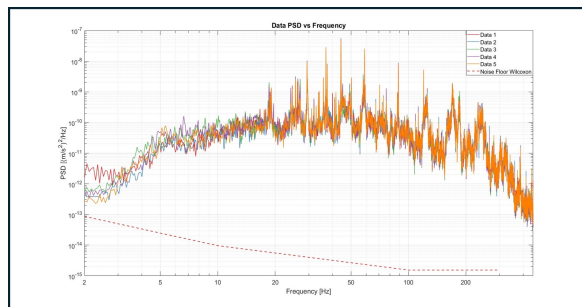


Figura 31 – PSD ponto 45 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

A figura 32 contém os dados das frequências que aparecem com maior destaque no ponto 45 desde sua primeira medição, seguindo o mesmo esquema de cores mencionado anteriormente. Todas as frequências já coletadas para esse ponto podem ser vistas na figura 88 no apêndice A.

Figura 32 – Frequências de destaque do ponto 45.

| 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | | | | 17,51 |
| | 18,37 | 18,35 | | 18,43 | | 18,48 | 18,48 |
| 18,82 | 18,83 | 18,63 | 18,6 | | 18,59 | | |
| | | 19,08 | 19,05 | 18,99 | 19,05 | 19 | 19 |
| 19,57 | 19,57 | 19,6 | 19,63 | 19,57 | | 19,57 | |
| 24,15 | | 24,03 | 24,1 | 24,03 | 23,92 | 23,86 | |
| | 24,78 | | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | |
| | 26,09 | 26,26 | 26,33 | 26,21 | 26,09 | | |
| 26,83 | 26,78 | | | 26,72 | 26,78 | 26,55 | 26,61 |
| | | 27,06 | 27,07 | | | | |
| 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,47 | 29,35 | 29,64 |
| 32,84 | 32,79 | 32,78 | | 32,79 | | 32,79 | |
| 33,76 | 33,7 | 33,7 | | 33,7 | | | 33,64 |
| | | 34,05 | 34,05 | 34,05 | 34,05 | 34,05 | |
| 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,76 | 35,82 | 35,82 | 35,82 |
| 36,96 | 36,96 | 36,91 | 36,91 | 36,91 | 36,96 | 36,96 | 36,96 |
| 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 |
| | | 40,97 | | 41,03 | 41,14 | 40,51 | 40,91 |
| 41,48 | 41,26 | 41,6 | | | | 41,31 | 41,6 |
| 43,94 | 43,77 | | | 43,49 | 43,54 | 43,83 | |
| 44,69 | 44,52 | 44,17 | 44,23 | 44,17 | 44,23 | 44,52 | 44,23 |
| | | 45,09 | 45,2 | | 45,09 | 45,09 | 44,86 |
| | | 46,46 | | | 46,52 | 46,46 | |
| | | 49,49 | | | 49,21 | 49,09 | |
| | | | | 49,95 | 49,95 | | |
| 50,12 | 50,07 | 50,12 | 50,18 | | | 50,01 | 50,12 |
| 57,85 | | 57,85 | 57,85 | 57,96 | 57,91 | 57,96 | |
| 58,82 | 58,82 | 58,82 | 58,82 | 58,82 | 58,76 | 58,76 | 58,76 |
| | | | | | | 59,22 | 60,7 |
| | | 67,4 | | 67,35 | 67,35 | 67,35 | 67,29 |
| 70,66 | 70,67 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,67 | 70,61 |
| | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,93 | 73,87 |
| 76,5 | | 76,45 | 76,45 | | 76,45 | 76,45 | |
| | | | | 86,98 | | 87,09 | |
| 87,89 | 87,55 | 88,29 | 88,46 | | 87,89 | 87,72 | 88,4 |
| | | | | 101,34 | | | 101,62 |
| 119,99 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 120,11 | 119,99 | 119,99 | 119,93 |
| | | | | | 123,48 | 123,94 | 124,85 |
| 125,2 | | 125,43 | 125,48 | | | | |
| 170 | 169,89 | 170,63 | 170,17 | 169,14 | 170,8 | 170,29 | 170,12 |
| 184,31 | 184,42 | 185,05 | 185,45 | 185,51 | 185,05 | 184,99 | 185,11 |
| 238,4 | 237,01 | 237,86 | | 238,5 | 238,67 | 237,58 | 238,44 |

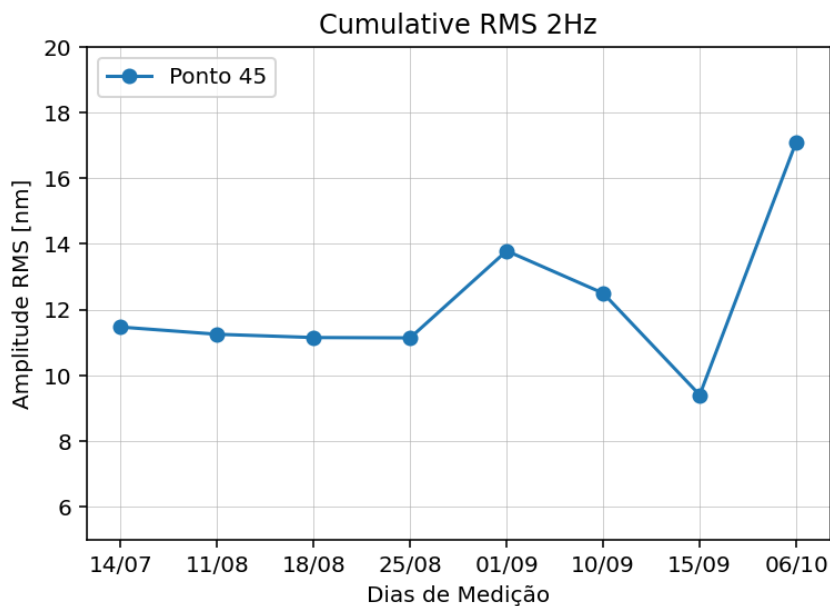
Fonte: Autoral.

A tabela 4 mostra os valores de RMS culmulativo máximo, mínimo e médio do ponto 45 desde seu primeiro dia de coleta até o presente momento, evidenciando a variação do piso ao longo do tempo. A figura 33 ilustra a evolução temporal do comportamento do RMS médio.

Tabela 4 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 45 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 14/07/25 | 9,21 | 8,53 | 11,47 |
| 11/08/25 | 13,66 | 8,91 | 11,25 |
| 18/08/25 | 12,23 | 10,44 | 11,15 |
| 25/08/25 | 12,19 | 9,10 | 11,14 |
| 01/09/25 | 16,91 | 9,63 | 13,79 |
| 10/09/25 | 15,33 | 9,19 | 12,50 |
| 15/09/25 | 11,64 | 8,38 | 9,40 |
| 06/10/25 | 33,95 | 9,15 | 17,11 |

Figura 33 – RMS cumulativo médio do ponto 45.



Fonte: Autoral.

4.1.3 Ponto 52

Situado no eixo 4, o ponto 52 é o ponto mais distante do ponto 32 e corresponde à linha de luz CEDRO. A primeira medição foi realizada no dia 23 de junho, depois de um período de duas semanas seguidas sem medições e retomando à medidas constantes no dia 14 de agosto conforme indicado na figura 16.

As figuras 34, 35 e 36 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos das análises de FFT, RMS e PSD referentes ao dia 11 de agosto.

As figuras 37, 38 e 39 mostram as mesmas análises para o dia 25 de agosto, permitindo observar possíveis variações no comportamento vibracional ao longo do tempo.

Figura 34 – FFT ponto 52 dia 11/08.

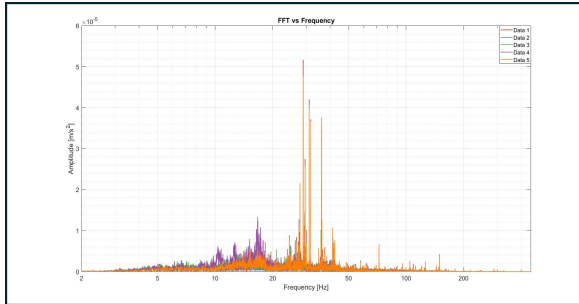


Figura 35 – RMS ponto 52 dia 11/08.

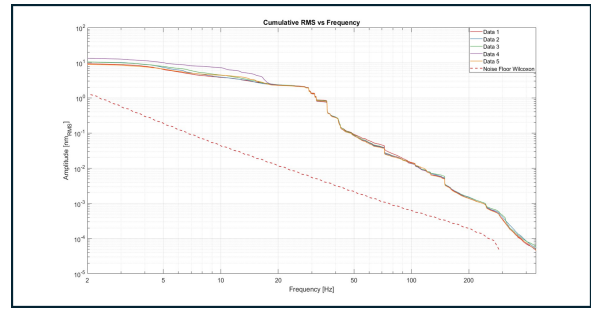
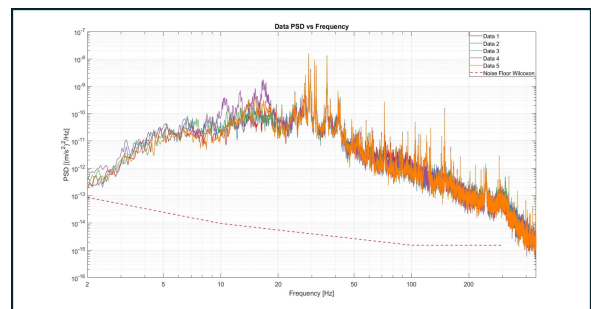


Figura 36 – PSD ponto 52 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 37 – FFT ponto 52 dia 25/08.

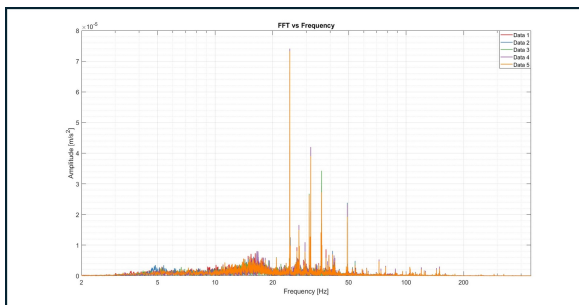


Figura 38 – RMS ponto 52 dia 25/08.

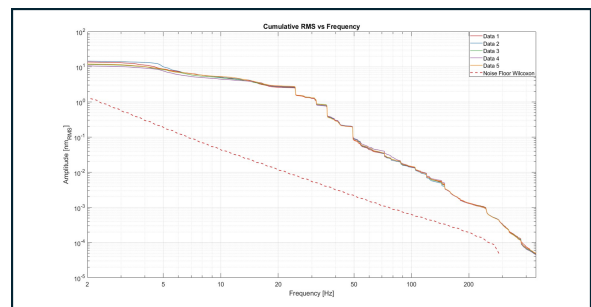
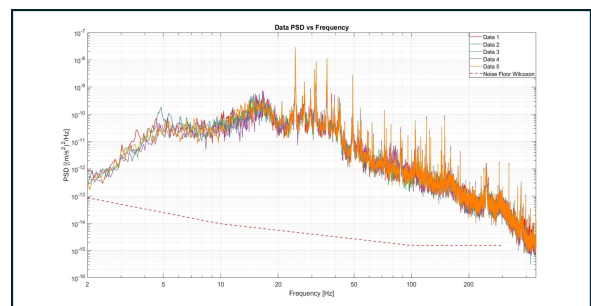


Figura 39 – PSD ponto 52 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

A figura 40 reúne as frequências predominantes identificadas no ponto 52 desde o início das medições, destacando os valores mais significativos segundo o mesmo padrão cromático adotado anteriormente. Todas as frequências registradas para esse ponto estão disponíveis na figura 91 no apêndice A.

Figura 40 – Frequências de destaque do ponto 52.

| 23/06/2025 | 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 24,6 | | 24,49 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| 26,78 | 26,72 | 26,72 | 26,49 | | 26,72 | 26,72 | 26,78 | |
| 27,47 | | 27,47 | 27,81 | 27,47 | 27,47 | 27,47 | | |
| 27,75 | 27,81 | 27,81 | | | 27,75 | 27,81 | 27,75 | |
| 29,13 | 29,13 | 28,9 | | | | | | |
| 29,53 | | 29,59 | 29,64 | 29,53 | 29,53 | 29,58 | 29,52 | |
| | | 30,04 | | | | | 29,98 | |
| 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 |
| 31,7 | 31,7 | 31,7 | 31,64 | 31,64 | 31,64 | 31,64 | 31,64 | |
| 34,9 | | | | | | 34,85 | 34,85 | |
| 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | |
| 37,82 | | 37,54 | | | 37,82 | | 37,82 | |
| 41,2 | 41,26 | 41,2 | 41,2 | 41,2 | 41,26 | 41,2 | 41,2 | |
| 42,4 | | 42,34 | 42,34 | | 42,34 | | | |
| | | | | | | | | 46,29 |
| 49,55 | | | | 49,21 | 49,21 | 49,21 | 49,21 | |
| 54,02 | 54,47 | | 53,96 | 54,02 | 54,02 | 54,47 | 54,47 | |
| | | 57,79 | | | | 57,96 | 58,02 | 57,79 |
| 62,08 | 62,08 | | 62,14 | 62,14 | 62,14 | 62,14 | 62,14 | |
| | | | | | | | | 71,3 |
| 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | |
| | | | | 73,81 | 73,81 | 73,81 | 73,81 | |
| | | | 79,54 | 78,16 | | | | |
| | | | 87,78 | 87,78 | | 87,83 | 87,83 | |
| | | 95,79 | 95,9 | 95,84 | 95,9 | 95,79 | 95,79 | 96,19 |
| 104,66 | 104,71 | 104,49 | 104,6 | 104,54 | 104,6 | 104,6 | 104,48 | |
| 119,99 | 120,16 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 120,11 | 119,99 | 120,05 | 119,99 |
| 126 | 125,99 | 126,11 | 126,17 | | 126,23 | 126,28 | 126,28 | |
| | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | |
| 149,35 | 149,35 | 149,35 | 149,34 | 149,35 | 149,35 | 149,35 | 149,35 | |
| | | | | | 254,57 | | | |
| 288,33 | 288,33 | 288,33 | 288,33 | 288,33 | 288,28 | 288,28 | 288,33 | 288,33 |

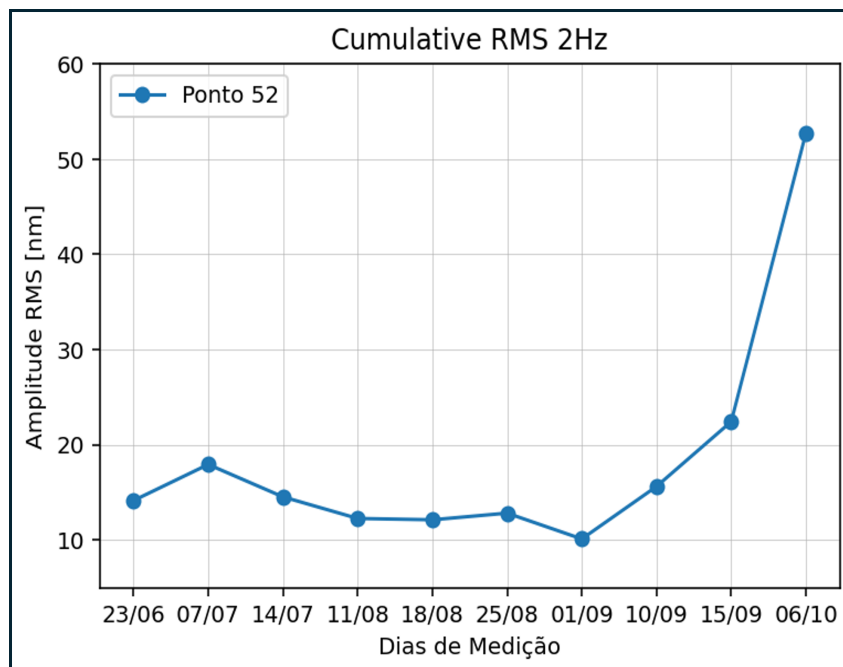
Fonte: Autoral.

A tabela 5 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de RMS cumulativo do ponto 52, considerando todas as medições desde a primeira coleta. Esses dados permitem avaliar a estabilidade e a evolução do comportamento dinâmico do piso ao longo do tempo, cuja ilustração da variação temporal do valor médio do RMS cumulativo pode ser observada na figura 41.

Tabela 5 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 52 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 23/06/25 | 12,65 | 10,84 | 11,93 |
| 14/07/25 | 10,21 | 8,90 | 9,62 |
| 11/08/25 | 13,42 | 9,03 | 10,58 |
| 18/08/25 | 15,30 | 10,03 | 12,01 |
| 25/08/25 | 14,45 | 10,64 | 12,47 |
| 01/09/25 | 15,03 | 14,59 | 15,34 |
| 10/09/25 | 23,22 | 12,73 | 15,62 |
| 15/09/25 | 25,49 | 20,27 | 22,43 |
| 06/10/25 | 57,56 | 48,33 | 52,74 |

Figura 41 – RMS cumulativo médio do ponto 52.

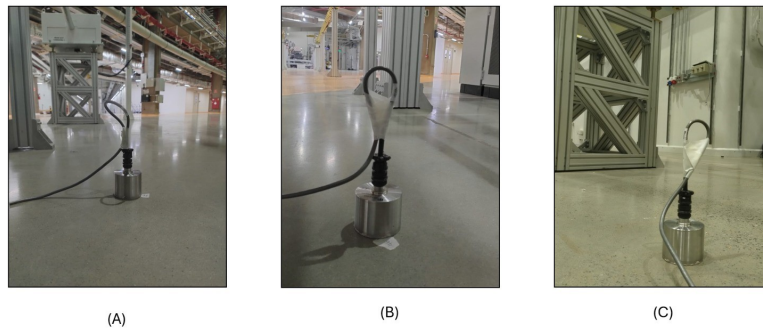


Fonte: Autoral.

4.2 Piso do Hall Experimental

Como dito anteriormente, o piso do hall experimental do Sirius é desacoplado do piso do anel. Nesta seção, os pontos do hall experimental analisados serão os respectivos pisos do hall experimental próximos aos pontos analisados na subseção 4.1.

Figura 42 – Pontos 33, 46 e 51 do piso do hall experimental.



Pontos de medição no piso do hall experimental onde: (A) Ponto 33, (B) ponto 46 e (C) ponto 51. Fonte: Autoral.

4.2.1 Ponto 33

O ponto 33 está localizado no eixo 37 e é o ponto do hall experimental mais próximo do ponto 32, localizado no piso do anel. É o piso onde se encontram as cabanas experimentais das linhas de luz IMBUÍIA e CARNAUBA.

As figuras 43, 44 e 45 apresentam, respectivamente, as curvas de FFT, RMS e PSD geradas com os dados coletados no dia 11 de agosto.

As figuras 46, 47 e 48 apresentam, respectivamente, as curvas de FFT, RMS e PSD geradas com os dados coletados no dia 25 de agosto.

Figura 43 – FFT ponto 33 dia 11/08.

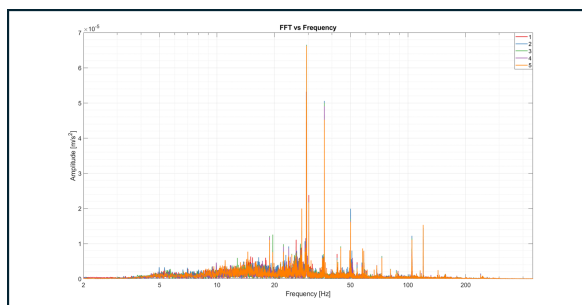


Figura 44 – RMS ponto 33 dia 11/08.

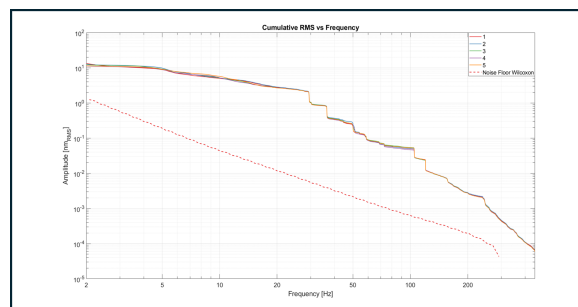
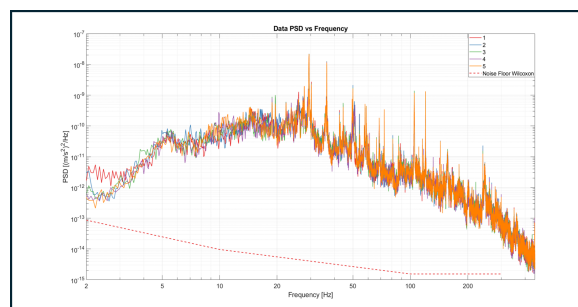


Figura 45 – PSD ponto 33 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 46 – FFT ponto 33 dia 25/08.

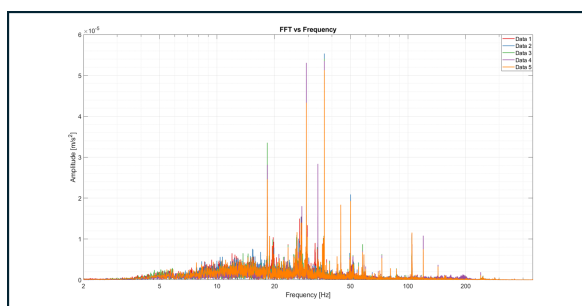


Figura 47 – RMS ponto 33 dia 25/08.

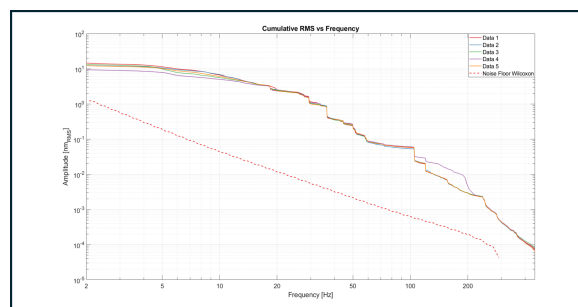
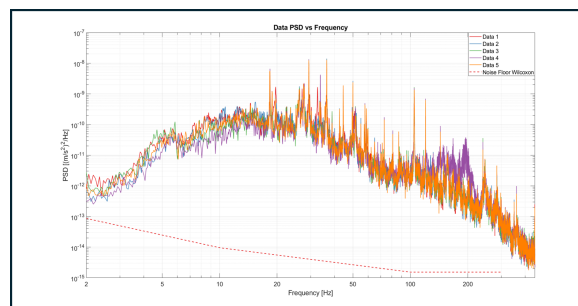


Figura 48 – PSD ponto 33 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

As frequências de maior destaque podem ser conferidas na figura 49, que segue o esquema de cores padrão adotado. Todas as frequências para o ponto 33 podem ser conferidas na figura 85 do apêndice A.

Figura 49 – Frequências de destaque do ponto 33.

| 16/06/2025 | 07/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | 5,84 | 5,77 | | | 12,13 |
| | | | | 15,33 | | | 15,34 | 15,96 |
| | | | | | | | 17,74 | 16,98 |
| 18,84 | 18,82 | 18,82 | 18,83 | 18,88 | 18,82 | | 18,54 | 18,88 |
| 19,53 | 19,57 | 19,57 | 19,57 | 19,68 | 19,63 | 19,57 | 19,57 | 19,57 |
| 20,68 | | | | | | | 21,34 | |
| 22,20 | | 22,32 | | 22,54 | | | 22,25 | 22,54 |
| 24,72 | 24,71 | | | | | 24,38 | 24,6 | 24,2 |
| | | 25,98 | | | | | | |
| | | | 26,26 | 26,21 | | | 26,21 | |
| | | | 26,61 | 27,06 | 26,72 | | | |
| 27,85 | | 27,75 | 27,75 | 27,81 | 27,75 | 27,69 | 27,52 | 27,12 |
| 29,37 | 29,35 | 29,41 | 29,41 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 |
| | | 30,27 | | | | 30,16 | 29,7 | 30,61 |
| | | | | 32,62 | 31,99 | | | 32,96 |
| | | | | 33,76 | | 33,47 | | 33,93 |
| 36,47 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,51 |
| | | | | 38,85 | | 38,85 | 38,85 | 39,48 |
| 40,05 | | | | | | | | |
| 42,57 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | | 42,46 | |
| 44,48 | 44,46 | 44,4 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 |
| 46,92 | | | | | | | | 47,2 |
| | | | | | | | | 47,95 |
| 49,44 | 49,38 | | 49,32 | | | | | |
| | | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 |
| | | 51,21 | 51,16 | 51,56 | 51,96 | | 51,21 | 52,19 |
| 54,09 | 54,07 | 54,07 | | 55,05 | 53,9 | | 55,56 | 53,22 |
| 57,83 | | 57,85 | 57,85 | 57,79 | 57,79 | 57,79 | 57,62 | |
| | | 58,65 | 58,65 | 58,76 | 58,76 | 58,82 | 58,82 | |
| 59,97 | | | 60,02 | | | 60,02 | | |
| | | | | 65 | 64,77 | | 64,32 | |
| 66,45 | | 66,43 | | 67,46 | | 67,01 | | |
| | | 68,61 | 68,55 | | | | | |
| 72,94 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | |
| | | 80,91 | | 80,91 | 80,91 | 80,91 | | |
| 87,97 | | 86,8 | 88,29 | 86,92 | 86,92 | 86,92 | 86,86 | |
| | | | | | 100,13 | | 102,88 | |
| 104,52 | | 104,83 | 104,77 | 104,71 | 104,77 | 104,83 | 104,89 | 104,77 |
| | | | | | | | | 106,43 |
| 120,01 | 120,05 | 119,99 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 119,99 | 119,93 |
| 143,89 | | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 |
| | | 156,9 | 155,41 | 156,15 | 157,18 | 149,4 | 149,4 | 149,4 |
| | | 240,1 | 240,1 | 240,15 | 240,15 | 240,1 | 239,98 | 239,75 |
| | | 245,99 | 245,71 | 246,22 | 246,62 | 246,22 | 246,05 | 246,28 |
| | | | 285,42 | 284,1 | | 284,67 | 285,07 | |
| | | | | 349,96 | | | 349,85 | 349,96 |
| | | | 360,15 | 360,2 | | 360,15 | 359,97 | 359,63 |

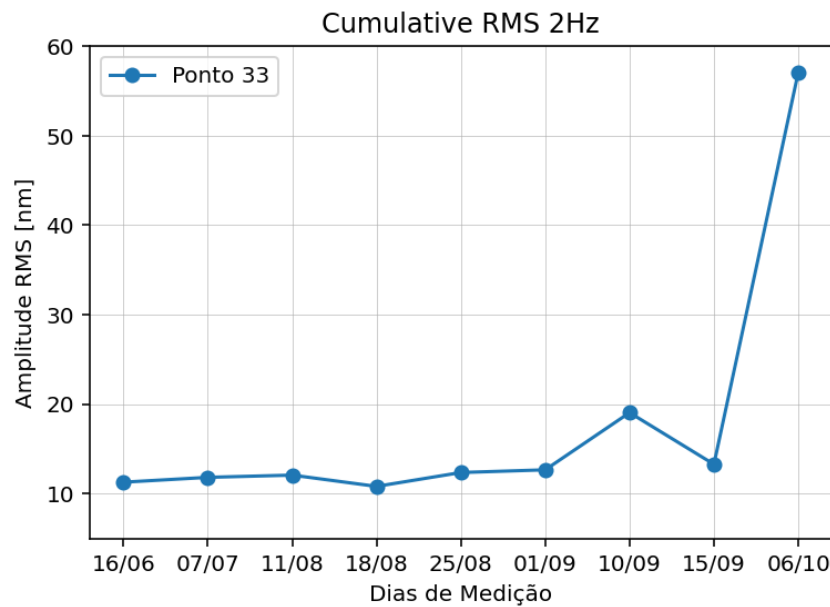
Fonte: Autoral.

Os valores de RMS cumulativo máximo, mínimo médio, ao longo do tempo, podem ser conferidos na tabela 6 e a figura 50 apresenta a curva gerada com os valores do RMS médio obtido ao longo do tempo.

Tabela 6 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 33 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 16/06/25 | 12,49 | 10,64 | 11,28 |
| 07/07/25 | 12,68 | 11,07 | 11,82 |
| 11/08/25 | 13,08 | 11,17 | 12,07 |
| 18/08/25 | 12,40 | 9,63 | 10,81 |
| 25/08/25 | 14,50 | 9,39 | 12,36 |
| 01/09/25 | 15,03 | 10,74 | 12,66 |
| 10/09/25 | 21,35 | 14,56 | 19,05 |
| 15/09/25 | 21,05 | 10,03 | 13,28 |
| 06/10/25 | 74,49 | 34,20 | 57,07 |

Figura 50 – RMS cumulativo médio do ponto 33.



Fonte: Autoral.

4.2.2 Ponto 46

Para o ponto intermediário, o ponto 46 é o correspondente do ponto 45 e está localizado no eixo 52. Esse é o ponto do piso do hall experimental onde está localizada a cabana experimental da linha de luz IPÊ.

As curvas de FFT, RMS e PSD do dia 11 de agosto podem ser conferidas, respectivamente, nas figuras 51, 52 e 53.

Para o dia 25 de agosto, as curvas de FFT, RMS e PSD estão dispostas, respectivamente, nas imagens 54, 55 e 56.

Figura 51 – FFT ponto 46 dia 11/08.

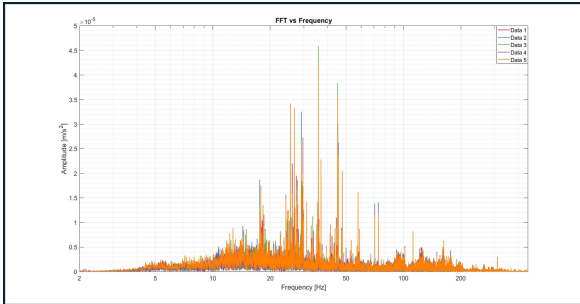


Figura 52 – RMS ponto 46 dia 11/08.

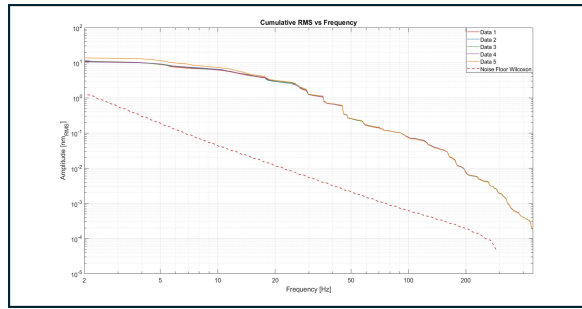
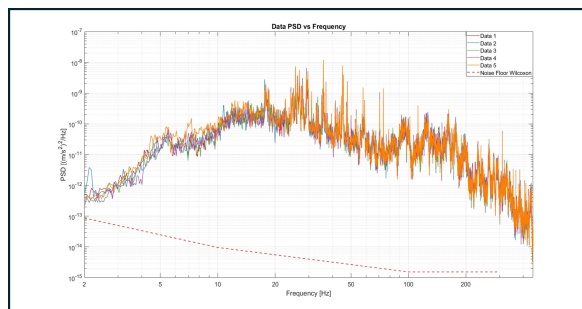


Figura 53 – PSD ponto 46 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 55 – RMS ponto 46 dia 25/08.

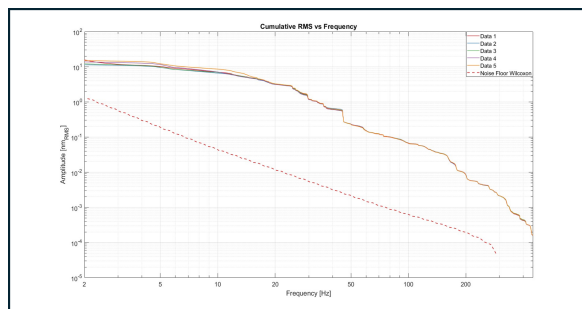


Figura 54 – FFT ponto 46 dia 25/08.

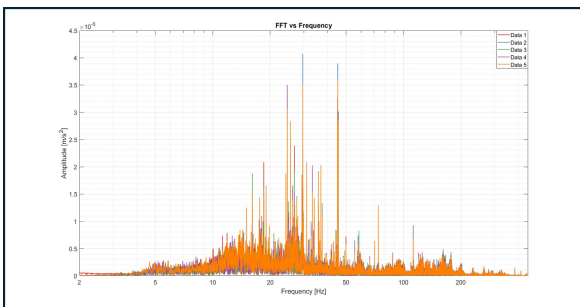
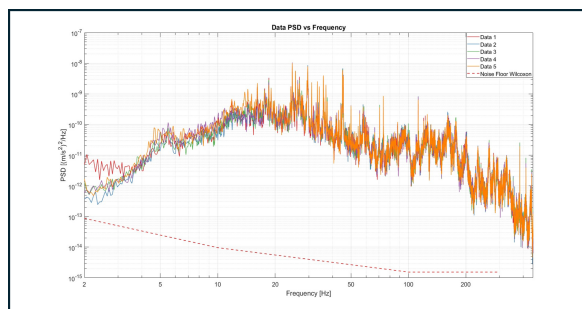


Figura 56 – PSD ponto 46 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

As frequências de destaque, para o ponto 46, podem ser conferidas na figura 57. Todas as frequências observadas nesse ponto estão apresentadas na figura 89, no apêndice A.

Figura 57 – Frequências de destaque do ponto 46.

| 23/06/2025 | 30/06/2025 | 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 16,3 | 16,08 | | | | 16,14 | | | 16,48 | |
| | | | | | | | | 16,99 | |
| 17,62 | 17,62 | | 17,62 | 17,51 | 17,62 | 17,57 | 17,62 | 17,57 | 17,51 |
| 17,91 | 17,91 | 17,91 | 17,85 | | | | | | |
| | 18,54 | | 18,54 | 18,54 | 18,54 | | 18,42 | 18,54 | 18,54 |
| 19,05 | | | | 19,11 | 19,05 | | | 19,05 | |
| | | | | | | | | 21,91 | |
| 22,67 | 22,6 | | 22,6 | | | 22,88 | 22,94 | | 22,54 |
| | | | | 23,52 | | | | 23,34 | |
| 24,2 | | 24,15 | 24,2 | 24,2 | | 24,2 | 24,15 | 24,2 | |
| 24,55 | 24,66 | | 24,89 | 24,89 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| 25,52 | 25,52 | 25,58 | 25,57 | 25,52 | 25,58 | 25,52 | 25,52 | 25,52 | 25,58 |
| 26,32 | 26,32 | | 26,15 | 26,26 | 26,26 | | 26,03 | 26,15 | |
| 26,84 | 26,84 | 26,83 | 26,78 | 26,78 | 26,78 | 26,61 | 26,72 | 26,72 | 26,78 |
| | | | | | | | 27,45 | 27,46 | 27,46 |
| 27,75 | 27,75 | 27,58 | 27,81 | 27,92 | | | 27,78 | | |
| | 29,35 | 29,18 | 29,12 | | | | | | |
| 29,64 | 29,64 | 29,35 | 29,69 | 29,64 | 29,64 | 29,64 | 29,52 | 29,64 | 29,64 |
| | | | | | | | 30,15 | 30,15 | |
| 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 |
| | | 32,84 | | | | | | 32,79 | 32,73 |
| | | | 33,47 | | 33,3 | 33,7 | 33,64 | | |
| | | | | 34,05 | 34,05 | 34,05 | 34,05 | 34,05 | |
| | | 35,13 | 35,08 | | | | 35,08 | | 35,02 |
| 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,88 |
| 36,91 | 36,91 | 36,96 | 36,96 | 36,9 | 36,91 | 36,9 | 36,91 | 36,96 | |
| | | | | 37,48 | 37,48 | | 37,48 | 37,54 | 37,48 |
| | | | | | | 42,11 | 42,17 | 42,23 | 41,88 |
| | | | | | | | 43,49 | 43,83 | |
| | 44,52 | 44,63 | | | | | | 44,29 | |
| 45,32 | 45,32 | | 45,15 | 45,26 | 45,26 | 45,2 | 45,15 | 45,2 | |
| | | | | 45,55 | 45,55 | 45,55 | 45,55 | 45,55 | 45,55 |
| | | | | 47,03 | | | | | |
| | | 47,66 | 47,77 | | | | 47,45 | | |
| 57,74 | 57,79 | | 57,79 | 57,79 | 57,79 | 57,68 | 57,96 | 57,73 | |
| | | | 58,82 | | | 58,25 | | 58,54 | 58,54 |
| 59,57 | 59,17 | | | | | | | | |
| 62,37 | | | | | | | | | |
| 70,61 | 70,67 | 70,67 | 70,67 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,67 | 70,61 |
| 73,76 | 73,81 | 73,87 | 73,87 | 73,81 | 73,81 | 73,87 | 73,87 | 73,93 | 73,93 |
| | | | 112,15 | 112,32 | 112,38 | 112,1 | 112,04 | 112,21 | |
| | 125,83 | 125,08 | | 125,71 | 125,37 | | 123,37 | 124,13 | |

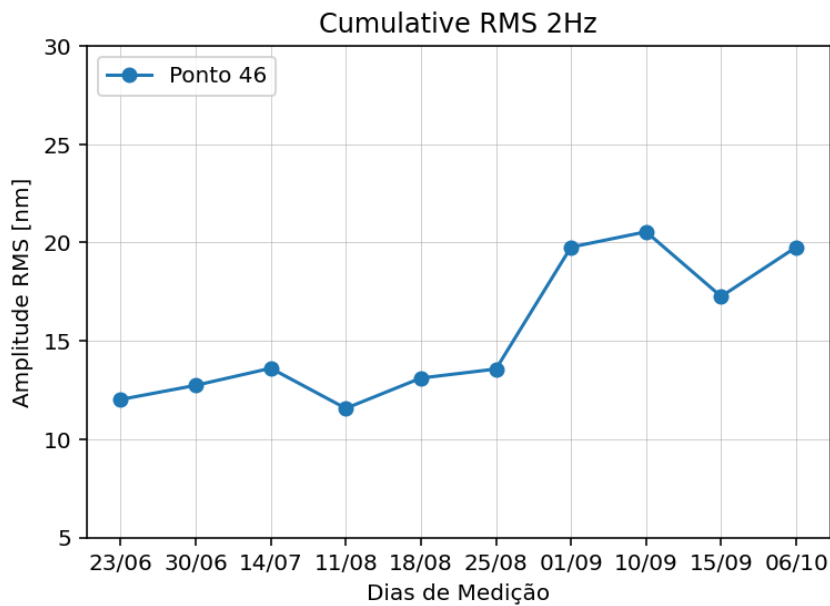
Fonte: Autoral.

Os valores de RMS cumulativo máximo, mínimo e médio estão apresentados na tabela 7 e a figura 58 apresenta a curva gerada a partir dos valores de RMS cumulativo médio ao longo do tempo.

Tabela 7 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 46 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 23/06/25 | 12,55 | 11,65 | 12,02 |
| 30/06/25 | 14,08 | 11,55 | 12,74 |
| 14/07/25 | 14,28 | 12,85 | 13,61 |
| 11/08/25 | 13,75 | 10,60 | 11,57 |
| 18/08/25 | 14,58 | 12,12 | 13,11 |
| 25/08/25 | 15,51 | 11,41 | 13,57 |
| 01/09/25 | 32,20 | 11,92 | 19,77 |
| 10/09/25 | 24,52 | 16,20 | 20,55 |
| 15/09/25 | 20,54 | 14,19 | 17,26 |
| 06/10/25 | 32,20 | 11,92 | 19,77 |

Figura 58 – RMS cumulativo médio do ponto 46.



Fonte: Autoral.

4.2.3 Ponto 51

Não há nenhum ponto de coleta para o piso do hall experimental correspondente ao ponto do piso do anel 52. Entretanto, o ponto 51 foi posicionado em um local muito próximo à esse piso correspondente ao ponto 52 e, por essa razão, há um certo sentido em analisá-lo. Localizado no eixo 59, esse ponto abriga a cabana experimental da linha de luz PAINEIRA e teve sua primeira medida tomada no dia 23/06, como pode ser visto na figura 16.

Os gráficos de FFT, RMS e PSD contendo os dados do dia 11 de agosto podem ser conferidos, em ordem, nas figuras 59, 60 e 61.

Para o dia 26 de agosto, os gráficos de FFT, RMS e PSD estão dispostos, em ordem, nas figuras 62, 63 e 64.

Figura 59 – FFT ponto 51 dia 11/08.

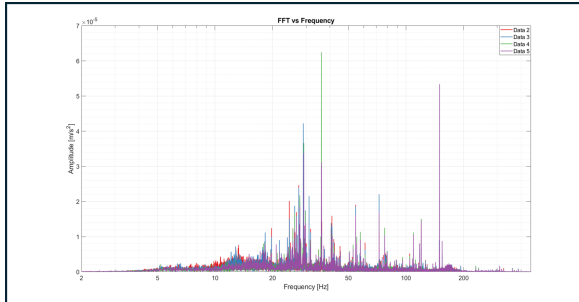


Figura 60 – RMS ponto 51 dia 11/08.

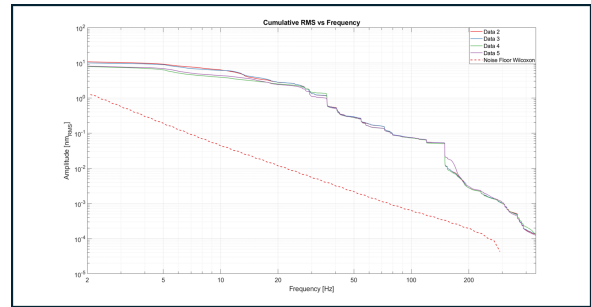
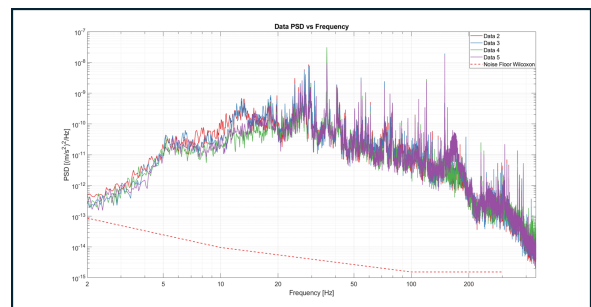


Figura 61 – PSD ponto 51 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 62 – FFT ponto 51 dia 25/08.

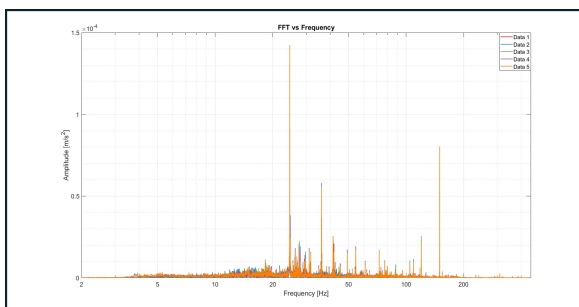


Figura 63 – RMS ponto 51 dia 25/08.

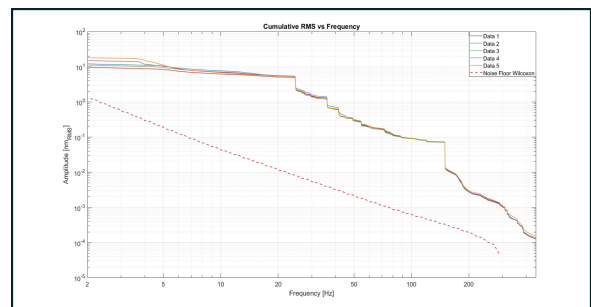
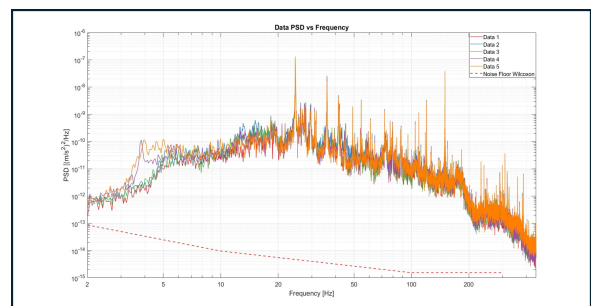


Figura 64 – PSD ponto 51 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

As frequências em destaque para o ponto 51 estão apresentadas na figura 65 e, na figura 90 no apêndice A, estão dispostas todas as frequências coletadas para esse ponto.

Figura 65 – Frequências de destaque do ponto 51.

| 23/06/2025 | 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 18,37 | | | 18,18 | 18,31 | | 18,31 | | 18,42 |
| | | | | | | | | 19 |
| 24,55 | | 24,49 | 24,72 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| 24,89 | | | | | | | | |
| | 25,58 | 25,58 | | | | 25,35 | | |
| | 26,15 | 26,15 | | 26,26 | 26,04 | 26,04 | 26,21 | 26,09 |
| 26,72 | 26,72 | 26,72 | 26,44 | | 26,72 | 26,72 | 26,72 | |
| 27,4 | | 27,47 | | 27,47 | 27,47 | 27,47 | | |
| | 27,81 | 27,81 | 27,81 | | 27,81 | 27,81 | 27,81 | 27,81 |
| 29,07 | 29,18 | 29,01 | | | | | | |
| 29,41 | 29,7 | 29,7 | 29,58 | 29,7 | 29,58 | 29,53 | 29,98 | 29,64 |
| 31,07 | | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 |
| 34,9 | | | 34,05 | | | 34,05 | | |
| | | | | | 35,25 | 35,02 | 34,79 | |
| 36,16 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,12 | 35,93 |
| 41,54 | 41,54 | 41,54 | 41,54 | 41,43 | 41,14 | 41,2 | 41,14 | 41,08 |
| | | | | 41,89 | | | | |
| 43,6 | | | | | | | | |
| 44,63 | | | 44,46 | | | | | |
| | | | 45,15 | | 45,09 | 45,09 | 45,09 | 45,03 |
| 48,47 | | | | | | | | |
| 49,67 | | | | 49,21 | 49,21 | 49,21 | 49,21 | 49,21 |
| 52,36 | | | 52,39 | | | 52,8 | 52,81 | |
| 54,02 | | | | | | | | |
| 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 |
| 57,33 | 57,62 | 57,62 | | | | 57,96 | 57,68 | |
| 59,68 | | | 59,57 | | 59,62 | | 59,17 | 60,02 |
| 61,05 | 61,05 | 60,99 | | 60,99 | 60,99 | 60,99 | 60,94 | |
| 68,38 | | | | | | | | |
| 69,81 | | | 69,69 | | | 70,04 | | |
| 72,04 | 72,27 | 72,27 | | 72,27 | 72,27 | 72,27 | 72,27 | 72,27 |
| 73,24 | | | | | 73,99 | 73,81 | 73,81 | |
| | | | 75,02 | | | 75,06 | 75,02 | |
| 77,36 | 77,25 | 77,3 | 77,3 | 77,25 | 77,25 | 77,3 | 77,3 | 77,36 |
| | | | | | | 86,75 | 86,57 | |
| 87,2 | 87,2 | | 87,95 | 88,18 | | | | |
| 89,49 | | 88,86 | | | | 89,09 | 88,98 | |
| | | | | | | | 91,04 | |
| 104,66 | 104,66 | 104,54 | 104,54 | 104,54 | 104,54 | 104,54 | 104,43 | 104,54 |
| 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | |
| 111,98 | | | 112,44 | | | | | |
| 113,41 | | | | | | | | |
| | | | | | | 115,58 | 115,41 | |
| | 120,05 | 120,11 | 119,99 | 119,99 | 119,99 | 119,99 | 119,93 | 120,05 |
| | | | | | | 144,08 | 144,25 | |
| 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 |
| | | 154,61 | 154,55 | 154,55 | 154,55 | 154,55 | 154,55 | 154,72 |
| | | | | | | 166,22 | 165,88 | |
| | | | | | | | 173,09 | 173,61 |
| | | | | | | 177,84 | 177,61 | |
| | | | 187,51 | | | | | |
| | | 193,23 | | | | | 193,23 | |
| | | | 224,99 | | | | 223,56 | |
| | 231,69 | 231,8 | 231,4 | 231,51 | 231,46 | | 231,28 | 231,51 |
| | | | | | 254,57 | | | |
| | 309,05 | 309,16 | 309,16 | 309,05 | 309,16 | 309,04 | 309,05 | 309,39 |
| | | | | | 312,77 | | | |

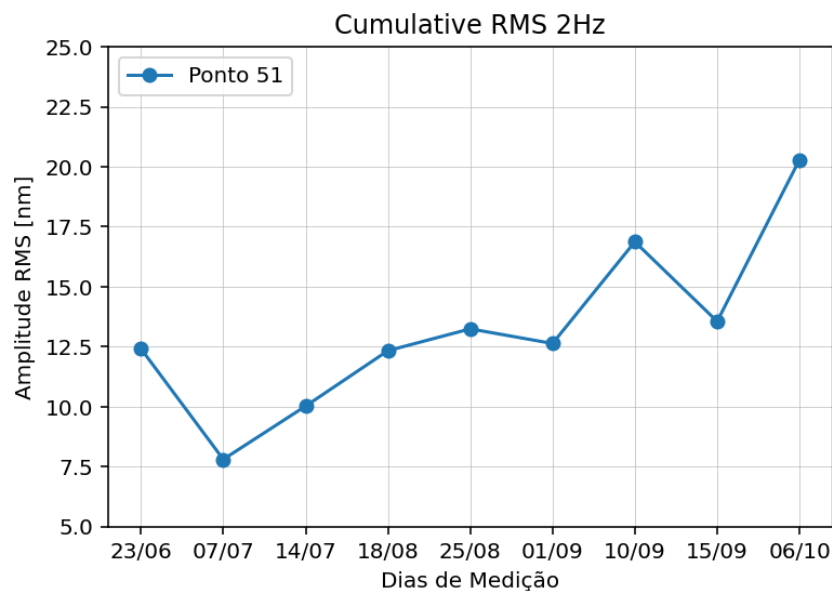
Fonte: Autoral.

A tabela 8 contém todos os valores de RMS cumulativo máximo, mínimo e médio para o ponto em questão e a figura 66 apresenta a curva de RMS cumulativo médio ao longo do tempo.

Tabela 8 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 51 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 23/06/25 | 19,97 | 11,73 | 12,41 |
| 14/07/25 | 8,03 | 7,81 | 7,93 |
| 11/08/25 | 10,65 | 7,80 | 9,09 |
| 18/08/25 | 16,90 | 9,31 | 12,33 |
| 25/08/25 | 18,06 | 9,77 | 13,24 |
| 01/09/25 | 13,56 | 11,53 | 12,63 |
| 10/09/25 | 12,24 | 10,04 | 11,27 |
| 15/09/25 | 19,96 | 14,20 | 16,87 |
| 06/10/25 | 16,50 | 12,20 | 13,55 |

Figura 66 – RMS cumulativo médio do ponto 51.

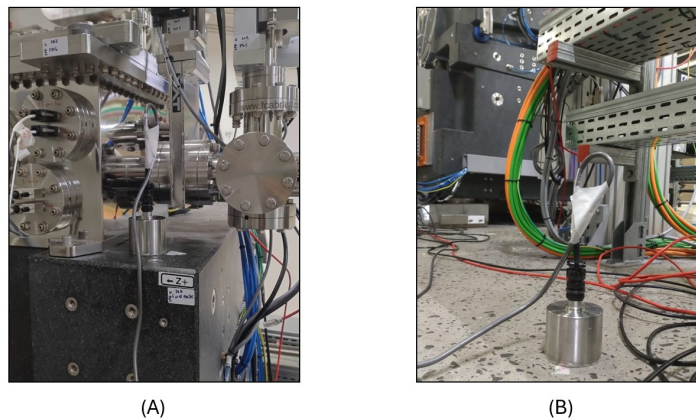


Fonte: Autoral.

4.3 Pisos especiais e mesas de granito

Ao longo das linhas de luz do Sirius há componentes ópticos, como espelhos, que necessitam de alta estabilidade por conta de sua sensibilidade. Para minimizar as perturbações advindas das vibrações no solo, alguns equipamentos são montados em mesas de granito. Nessa seção, apresentaremos resultados das medidas feitas na mesa de granito do espelho –M6– da linha IPE e seu respectivo solo, analisando assim a transferência das vibrações do solo na mesa de granito e vice-versa.

Figura 67 – Pontos 47 e 48 do piso especial.



Pontos de medição no piso especial onde: (A) Ponto 47 e (B) ponto 48. Fonte: Autoral.

4.3.1 Ponto 47

O ponto 47 é o ponto em cima da mesa de granito onde se encontra o espelho –M6– da linha IPE.

As figuras 68, 69 e 70 apresentam, nessa ordem, os resultados de FFT, RMS e PSD obtidos nas medições realizadas em 11 de agosto.

Da mesma forma, as figuras 71, 72 e 73 mostram os resultados obtidos no dia 25 de agosto para o mesmo ponto.

Figura 68 – FFT ponto 47 dia 11/08.

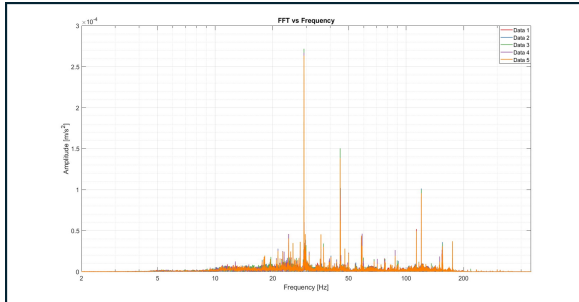


Figura 69 – RMS ponto 47 dia 11/08.

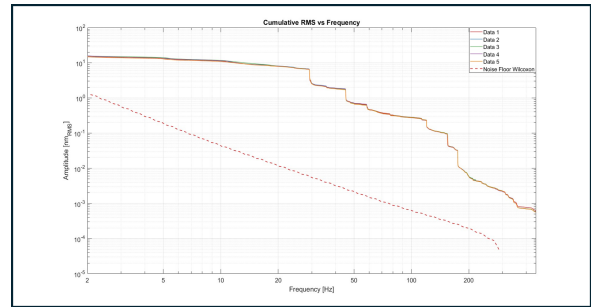
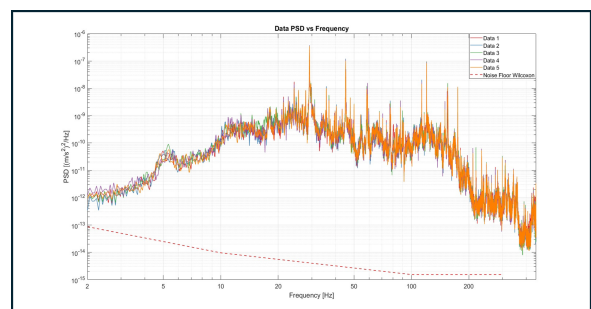


Figura 70 – PSD ponto 47 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 71 – FFT ponto 47 dia 25/08.

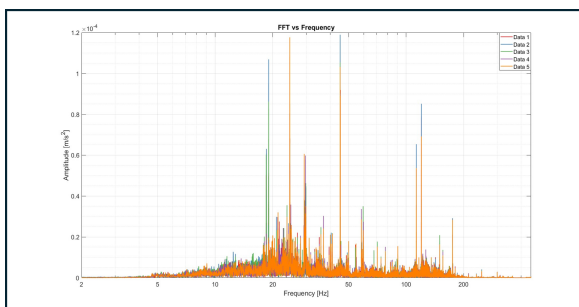


Figura 72 – RMS ponto 47 dia 25/08.

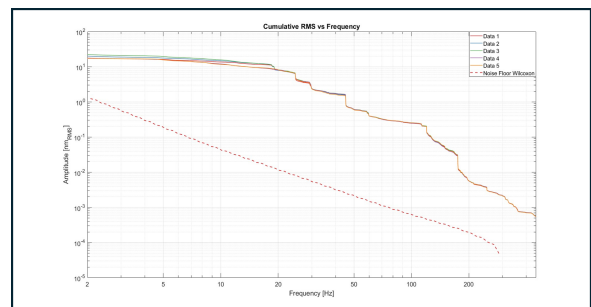
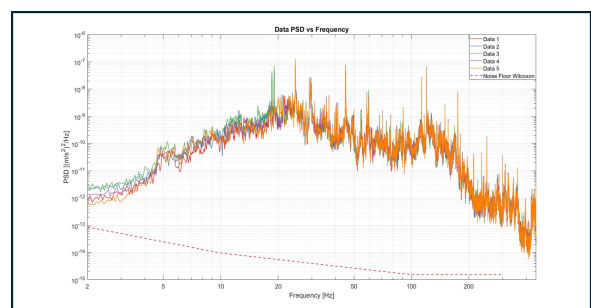


Figura 73 – PSD ponto 47 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

A figura 74 evidencia as frequências de maior relevância detectadas no ponto 47 desde o início das medições, seguindo o mesmo padrão de cores utilizado nas figuras anteriores. Para uma visão completa de todas as frequências coletadas nesse ponto, consulte a figura 86 no apêndice A.

Figura 74 – Frequências de destaque do ponto 47.

| 07/07/2025 | 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | 5,49 | | | | |
| | | | | | 11,39 | | | |
| | | | | | 13,45 | 14,07 | | |
| 18,53 | | 18,48 | 18,54 | 18,65 | 18,54 | 18,43 | 18,54 | |
| | | | 18,83 | 19,11 | 19 | 18,99 | 19,05 | 18,94 |
| | | | 19,17 | | | | | |
| 19,62 | 19,57 | 19,51 | 19,51 | 19,45 | 19,45 | 19,46 | | |
| | 24,2 | | | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,66 | |
| 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 |
| | | | | | 26,03 | 26,55 | | |
| | | 26,15 | 26,26 | 26,26 | 26,61 | | 26,38 | |
| 26,78 | 26,83 | 26,78 | 26,72 | 26,78 | | | 26,72 | |
| 29,35 | 29,35 | | | | | | | |
| 29,58 | 29,52 | 29,64 | 29,58 | 29,58 | 29,58 | 29,53 | 29,58 | 29,58 |
| 33,76 | | 33,7 | 33,7 | 33,7 | 33,7 | | 34,05 | |
| 36,1 | 36,05 | 36,11 | 36,04 | 36,11 | 36,11 | 36,11 | 36,11 | 35,93 |
| 36,96 | | | 36,91 | 36,91 | 36,91 | 36,96 | 36,96 | |
| 37,48 | 36,91 | 36,96 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | |
| | | | | | | | | 38,45 |
| 41,03 | | 41,66 | 41,48 | 41,6 | 41,03 | 41,08 | 41,37 | |
| | | | | 42,51 | 42,57 | 42,57 | 42,92 | |
| | | | | 43,32 | | | | |
| 48,46 | 48,58 | 48,52 | 48,41 | 48,58 | 48,35 | 48,29 | 48,46 | 45,43 |
| 50,01 | | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | |
| | | | | | | | | 51,38 |
| 53,73 | 53,39 | 53,56 | 53,62 | 53,39 | 53,67 | 53,73 | 53,33 | |
| | | | 54,25 | | | | | 54,87 |
| | | 58,31 | | 58,25 | | 58,82 | | 58,31 |
| 59,17 | 59,34 | | | 59,57 | 59,51 | | | |
| 60,42 | | 60,42 | 60,88 | | 60,82 | | | |
| | | | | 67,63 | 67,81 | 68,26 | | 68,09 |
| | | 69,35 | | | | | | |
| | | | | 70,61 | | 70,61 | 70,67 | 70,67 |
| 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,81 | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,93 | |
| 87,54 | | | | 86,63 | 87,66 | 87,78 | 87,72 | |
| 90,64 | 90,69 | 90,64 | 90,75 | 90,58 | 90,52 | 90,64 | 90,69 | 90,69 |
| | 100,02 | | | 100,02 | 100,02 | 100,02 | 100,02 | |
| 110,83 | | 110,84 | 110,66 | 110,78 | 110,78 | 110,84 | 110,89 | 110,84 |
| 120,05 | 120,05 | 119,99 | 119,99 | 120,05 | 119,93 | 119,99 | 119,99 | 120,05 |
| | | 126,29 | | 126,4 | 126,74 | | | |
| | | | | | | 128,4 | 128,86 | |
| | | | | | | | | 130,01 |
| | 142,42 | 142,42 | 142,42 | 142,42 | 142,42 | 142,42 | 142,42 | 142,42 |
| | | 154,44 | 154,55 | 154,21 | 154,67 | 154,5 | 154,32 | |
| | 178,98 | 178,99 | | | | | 179,16 | |
| | 182,19 | | 182,19 | 182,53 | 182,48 | 182,59 | 182,48 | |
| 190,89 | | | | | | | | 191,06 |
| | 192,49 | 192,6 | 192,43 | 192,6 | 192,55 | 192,55 | 192,49 | |
| | 232,14 | | | | | 232,94 | 232,83 | 232,26 |
| 232,37 | | 232,89 | 233,06 | | | | | |
| | | | | 233,46 | 233,63 | | | |
| | | | | 263,44 | | | | |
| 270,59 | 270,59 | 270,37 | 269,97 | 270,02 | 270,14 | 269,97 | 270,02 | |
| | | | | | | | | 274,54 |
| | | | | | 298,23 | 298 | | |
| | | | | 303,32 | | | | 303,73 |
| | | | | 324,61 | 324,04 | | | |
| | | | | 344,75 | 345,5 | | | 345,33 |
| | | 360,09 | | | 360,28 | | 360,15 | |
| | | | | | | | | 393,79 |
| | | | | | | | 409,7 | |
| | | 415,99 | | 413,13 | 413,3 | | | |
| | | | | | | 417,08 | | |
| | | | | | | 449,24 | | |

Fonte: Autoral.

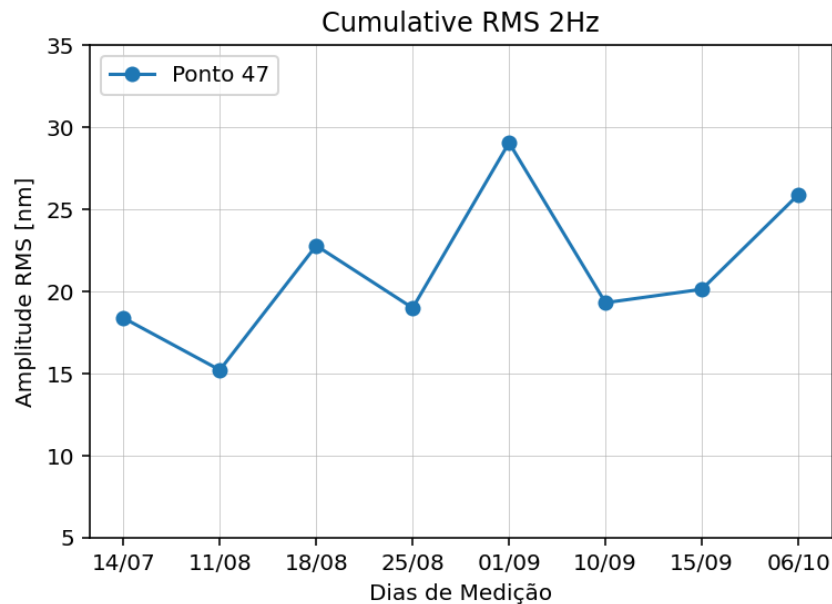
A tabela 9 apresenta os valores de RMS cumulativo máximo, mínimo e médio do ponto 47, considerando todas as medições realizadas até o momento, permitindo observar a variação temporal do comportamento do piso. A figura 75 ilustra a evolução do RMS médio ao longo do

tempo.

Tabela 9 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 47 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 14/07/25 | 21,97 | 15,59 | 18,37 |
| 11/08/25 | 15,73 | 14,73 | 15,20 |
| 18/08/25 | 25,64 | 19,35 | 22,78 |
| 25/08/25 | 22,23 | 17,34 | 18,98 |
| 01/09/25 | 33,03 | 22,99 | 29,05 |
| 10/09/25 | 23,16 | 16,25 | 19,30 |
| 15/09/25 | 22,01 | 19,18 | 20,12 |
| 06/10/25 | 35,29 | 22,27 | 25,88 |

Figura 75 – RMS cumulativo médio do ponto 47.



Fonte: Autoral.

4.3.2 Ponto 48

O ponto 48 refere-se ao piso especial da linha de luz IPE, e está localizado no mesmo piso em que se encontra a mesa de granito que sustenta o espelho M6 da linha, cujos resultados foram apresentados anteriormente.

As figuras 76, 77 e 78 mostram, respectivamente, os resultados de FFT, RMS e PSD obtidos no ponto 48 durante as medições realizadas em 11 de agosto.

De forma semelhante, as figuras 79, 80 e 81 apresentam os dados obtidos em 25 de agosto.

Figura 76 – FFT ponto 48 dia 11/08.

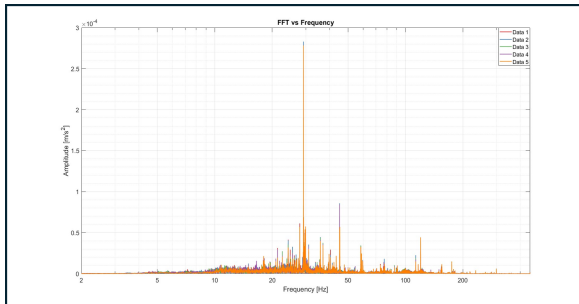


Figura 77 – RMS ponto 48 dia 11/08.

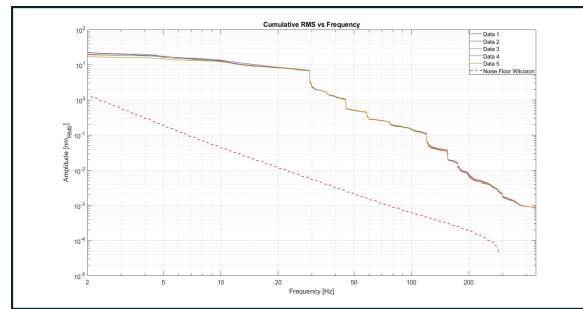
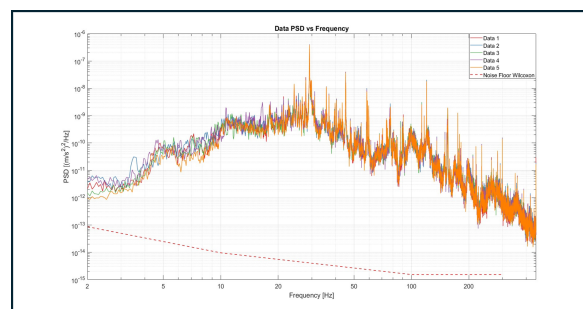


Figura 78 – PSD ponto 48 dia 11/08.



Fonte: Autoral.

Figura 80 – RMS ponto 48 dia 25/08.

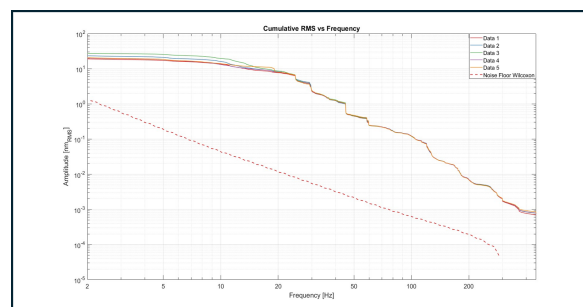


Figura 79 – FFT ponto 48 dia 25/08.

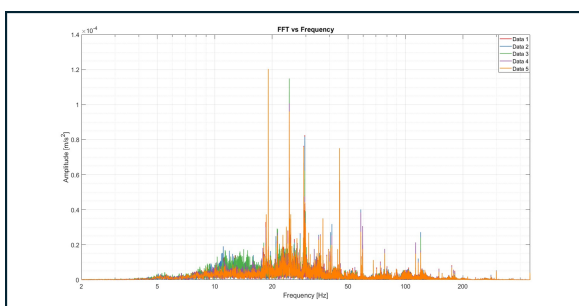
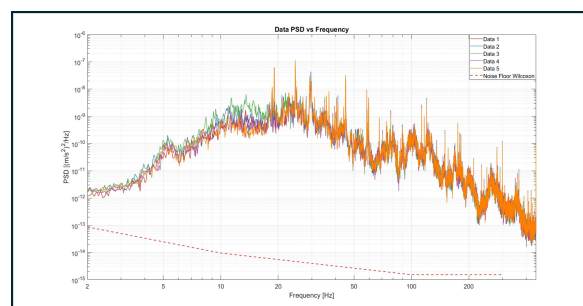


Figura 81 – PSD ponto 48 dia 25/08.



Fonte: Autoral.

As frequências mais significativas observadas no ponto, desde o início das medições, e, seguindo o padrão de cores adotado nas análises anteriores, podem ser consultadas na figura 82. Para uma visualização completa de todas as frequências registradas, consulte a figura 87 no apêndice A.

Figura 82 – Frequências de destaque do ponto 48.

| 26/06/2025 | 30/06/2025 | 07/07/2025 | 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 4,92 | 4,92 | | | | 4,92 | | | | | 4,98 |
| 5,83 | 5,78 | | | | | | | | | |
| 13,33 | 13,62 | | | | | | | | | |
| 15,03 | 15,05 | | | | 14,88 | | 14,99 | | | |
| 18,65 | | 18,48 | | 18,48 | 18,48 | 18,65 | 18,48 | 18,65 | 18,54 | |
| 19,11 | 19 | | 19,17 | | 19,11 | 19,11 | 18,99 | 19,05 | 19,05 | 19,05 |
| 24,78 | | | | | | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,55 |
| 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | |
| 26,32 | 26,32 | | | 26,15 | 26,26 | | 26,06 | 26,03 | 26,03 | |
| 26,78 | 26,83 | 26,72 | 26,89 | 26,78 | 26,72 | 26,89 | 26,61 | 26,61 | 26,72 | |
| 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | | 29,35 | | | | | |
| | | 29,58 | 29,52 | 29,64 | | 29,58 | 29,58 | 29,64 | 29,64 | 29,64 |
| | | | 32,84 | | | | | | | 32,1 |
| 33,76 | 33,76 | 33,76 | 33,76 | 33,71 | 33,7 | 33,7 | 33,7 | 33,7 | 33,7 | |
| 36,91 | 36,91 | 36,96 | 36,96 | 36,96 | 36,91 | 36,91 | 36,96 | 36,91 | 36,96 | 36,93 |
| 37,54 | 37,54 | 37,48 | 37,53 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | |
| | | | | | | | | | | 38,39 |
| 41,27 | 41,2 | 41,03 | 41,59 | 41,54 | 41,48 | 41,66 | | | 41,37 | |
| | | | | | 42,97 | 42,28 | 42,57 | 42,51 | 42,91 | |
| | | | 43,49 | | | 43,43 | | | 43,77 | |
| | | | | | | | | | 49,21 | 49,21 |
| 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,35 |
| 57,79 | 57,79 | 57,68 | 57,85 | 57,74 | 57,73 | 57,79 | 57,73 | 57,68 | 57,73 | 57,45 |
| 59,74 | 59,22 | 59,51 | 59,56 | | 59,57 | 59,51 | 59,57 | 59,45 | 59,39 | |
| | | 63,91 | | | | | | | | |
| 70,61 | 70,61 | 70,72 | 70,67 | 70,67 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,67 | |
| 73,78 | 73,81 | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,81 | 73,81 | 73,87 | 73,87 | 73,93 | 73,76 |
| 87,49 | 87,72 | | 87,72 | | | 87,78 | 87,72 | 87,54 | 87,78 | |
| 90,81 | 90,81 | 90,64 | 90,69 | 90,75 | 90,75 | 90,58 | 90,58 | 90,64 | 90,64 | 90,69 |

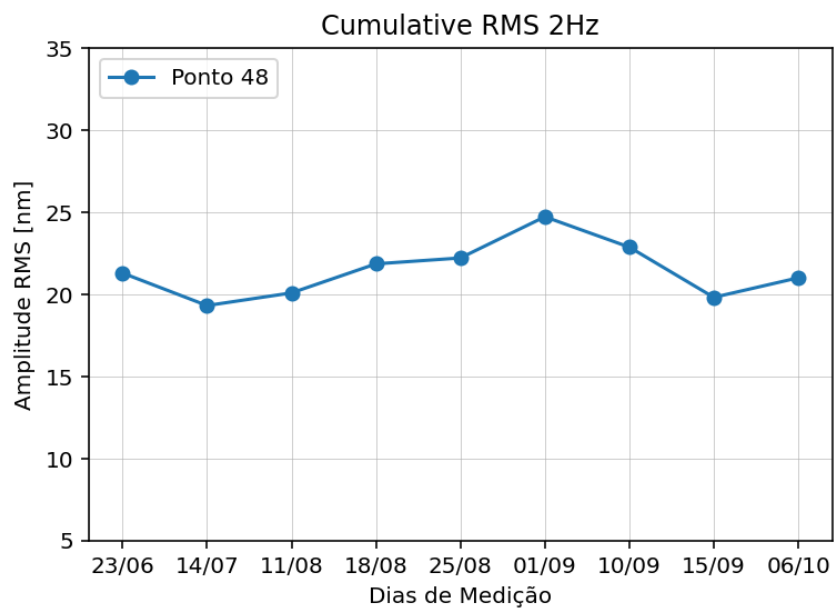
Fonte: Autoral.

A tabela 10 apresenta os valores máximo, mínimo e médio do RMS cumulativo para o ponto 43, considerando todo o período de coleta até o presente momento. A figura 83 ilustra a evolução temporal do RMS médio, permitindo analisar as variações do piso ao longo do tempo.

Tabela 10 – Valores de RMS Cumulativo para o ponto 48 em 2 Hz.

| Data da Medida | RMS Máximo (nm) | RMS Mínimo (nm) | RMS Médio (nm) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 23/06/25 | 23,09 | 19,19 | 21,29 |
| 14/07/25 | 22,32 | 16,34 | 19,31 |
| 11/08/25 | 22,38 | 16,91 | 20,08 |
| 18/08/25 | 32,60 | 18,41 | 21,85 |
| 25/08/25 | 27,57 | 19,10 | 22,21 |
| 01/09/25 | 30,28 | 20,56 | 24,72 |
| 10/09/25 | 28,48 | 20,31 | 22,87 |
| 15/09/25 | 21,12 | 18,82 | 19,81 |
| 06/10/25 | 26,27 | 18,09 | 21,00 |

Figura 83 – RMS cumulativo médio do ponto 48.



Fonte: Autoral.

5 Discussão dos Resultados

Nesta seção, serão discutidos a validação da metodologia, apresentada na seção 3, e os resultados obtidos, apresentados na seção 4. Serão realizadas comparações entre os pontos do piso do anel, com o objetivo de avaliar sua homogeneidade, bem como comparações com os pontos correspondentes no hall experimental, a fim de analisar o desacoplamento entre os pisos. Adicionalmente, será realizada uma análise comparativa entre o piso especial e a mesa de granito, seguida de uma avaliação detalhada da metodologia empregada nas medições.

5.1 Análise da Estabilidade e Homogeneidade do Piso do Anel

Com o objetivo de verificar se o piso do anel é, de fato, homogêneo e estável, três pontos distintos – separados, em média, por uma mesma distância – foram selecionados. Na subseção 4.1, são apresentados os resultados de FFT, RMS, PSD e as principais frequências de cada ponto, além da evolução temporal do RMS cumulativo correspondente a cada um deles.

Para os pontos 32 e 52, nota-se um comportamento de aumento significativo no valor de RMS cumulativo. Entretanto, deve-se levar em consideração que ambos os pisos estão localizados próximos a canteiros de obras. O dia 31 de julho marca o início das atividades de fundação e canteiro do projeto ÓRION, o novo laboratório de biossegurança, cuja localização é próxima ao ponto 32. É importante ressaltar que, de acordo com a figura 16, nenhuma medição válida foi feita antes do início das obras. Porém, após o início, percebe-se que o piso passa por momentos de estabilidade que culminam em seu pico máximo no dia 06/10, data que registra atividades de perfuração no solo.

Já para o ponto 52, no dia 11/09 iniciam-se as obras do auditório do Sirius, que está localizado próximo ao ponto. E é exatamente a partir desse ponto que podemos observar a tendência de crescimento do valor do RMS cumulativo médio, o qual também sofre seu pico máximo no dia 06/10, mas se dá em decorrência do assentamento do piso do auditório.

Já para o ponto 45, equidistante dos pontos 32 e 52, nota-se também um perfil de crescimento no valor de RMS cumulativo, principalmente ao observar que o valor de RMS cumulativo máximo em 2 Hz para o dia 06/10 é relativamente próximo aos valores médios obtidos nos outros dois pontos na mesma data, como mostra a tabela 4.

Também é possível verificar que, antes do evento crítico de cada ponto, mesmo com a tendência de aumento nos valores de RMS, tais valores se mantiveram em uma taxa de estabilidade significativa, principalmente levando em consideração as atividades nos canteiros de obras, o que pode ser relacionado à estabilidade do piso do anel.

Analisando as curvas de FFT, RMS e PSD para os três pontos, é possível notar que há

uma certa semelhança entre as curvas relacionadas aos pontos 32 e 52 e, levando em consideração que a frequência natural do Sirius encontra-se na faixa de 30–40 Hz, nota-se que, incluindo o ponto 45, os três pontos apresentam frequências bastante semelhantes até a faixa de 150 Hz, salvo algumas frequências muito características de cada ponto, as quais estão relacionadas aos diferentes equipamentos em operação próximos ao ponto de medição.

A partir de tais análises, pode-se inquirir que o piso do anel do Sirius cumpre seu requisito de estabilidade e homogeneidade.

5.2 Análise do Desacoplamento Entre o Piso do Anel e o Piso do Hall Experimental

Como supracitado, os pisos do anel e do hall experimental são desacoplados e, começando a análise pelos pontos 32 e 33, percebemos, somente com a análise das tabelas 3 e 6, que o RMS cumulativo em 2 Hz para o ponto 33 mostra-se mais sensível às obras à sua volta. Comparando os dados do período de 11/08 até 06/10 para ambos os pontos e fazendo uma média do RMS cumulativo médio em 2 Hz para as medidas feitas antes do dia 06/10 – período de maior criticidade –, a média para o ponto 33 é de 13,37 nm, enquanto, para o ponto 32, a média é de 12,78 nm. Comparando agora essas médias com o RMS do dia 06/10, observa-se que o ponto 33 apresenta um aumento de 326,85%, enquanto o ponto 32 apresenta um aumento de 198,65%, ou seja, o ponto 33 mostrou-se cerca de 64,53% mais sensível às obras do projeto ÓRION.

Já fazendo a comparação das curvas de FFT, RMS e PSD de cada ponto, bem como suas respectivas frequências de destaque, é notável que os pontos compartilham curvas com algumas semelhanças, principalmente às curvas de RMS, como pode ser visto nas figuras 19 e 44 para o dia 11/08 e 22 e 47 para o dia 25/08, onde, salvo algumas frequências muito específicas, os gráficos do ponto 32 parecem uma versão mais atenuada dos gráficos do ponto 33. Entretanto, através das curvas de FFT e PSD apresentadas nas figuras 18, 43, 20 e 45 do dia 11/08 e 21, 46, 23 e 48 para o dia 25/08, e consultando as tabelas de frequências para ambos os pontos, pode-se observar que o ponto 33 possui valores relevantes de baixas frequências, característica que não é observada para o piso do anel, mantendo, assim, um dos seus objetivos principais da fase de construção do edifício: a atenuação das baixas frequências.

É fácil observar exatamente o mesmo comportamento para os pontos 45 e 46, embora esses pontos apresentem também uma diferença significativa das frequências de maior destaque, gerando um perfil com uma maior diferença entre os pisos, como pode ser visto nas figuras 26, 51, 28 e 53 do dia 11/08 e 29, 54, 31 e 56 para o dia 25/08. Novamente vemos a atenuação das baixas frequências no piso do anel e, comparando as curvas de RMS médio, apresentadas nas figuras 33 e 58, também observa-se um piso mais estável no anel.

Finalmente, para os pontos 52 e 51, as semelhanças são mínimas. O ponto 51 apresenta

uma forte influência de altas frequências, como pode ser visto nas imagens apresentadas na subseção 4.2.3, enquanto o ponto 52 apresenta uma responsividade a frequências entre 25 e 150 Hz, como pode ser visto nas figuras da subseção 4.1.3. Além disso, comparando as tabelas 5 e 8 de RMS cumulativo em 2 Hz, e as curvas de RMS médio apresentadas nas figuras 66 e 41, nota-se claramente que as obras do auditório do Sirius, próximas ao ponto 52, não apresentam impactos significativos nos deslocamentos do piso 51. Tal fato está não só relacionado ao desacoplamento dos pisos, mas também ao fato mencionado previamente de que não há nenhum ponto de medição no piso do hall experimental correspondente ao ponto 52. Com apenas 5 eixos de diferença entre os pontos, já é possível perceber a independência entre os pisos.

Dessa forma, apesar de alguns pontos apresentarem comportamentos levemente parecidos e de forma amortecida, ainda é possível verificar que não só os pisos são independentes, como também que o piso do anel responde bem menos às alterações ao seu redor do que o piso do hall experimental.

5.3 Análise Entre o Piso Especial e a Mesa de Granito

Ao analisarmos as figuras de FFT, RMS e PSD apresentadas na subseção 4.3, notamos visivelmente padrões de vibrações bem parecidos até metade do espectro de frequências; porém, no ponto 47, referente à mesa de granito, observa-se um grande impacto na região de altas frequências, que claramente não está presente nas curvas geradas com os dados obtidos no ponto 48, referente ao piso. Tal comportamento observado pode ser atribuído aos equipamentos da mesa de granito, podendo-se concluir que as perturbações geradas por eles não interferem de forma significativa no solo. Porém, para frequências do centro do espectro, não observamos atenuação significativa, inferindo que o granito consegue atenuar somente parte das vibrações.

Além disso, a respeito do RMS, observa-se que, apesar dos valores variarem dentro de uma faixa muito próxima, o piso se mostrou mais estável que o granito; disso conclui-se que baixas frequências afetam o granito de forma mais significativa, o que também explica o comportamento observado nos gráficos de FFT e PSD.

De modo geral, ainda temos dois padrões de vibração muito parecidos e, por esse motivo, não se viu necessidade de dar continuidade ao monitoramento das vibrações dentro das estações experimentais, uma vez que as medidas nesses locais foram todas no mesmo padrão: mesa de granito e piso correspondente. Mas, ao analisarmos o comportamento de sistemas parecidos, como esse dos pontos 47 e 48, ficou muito claro que tal análise seria equivalente a medir o mesmo piso duas vezes, gerando apenas mais volume de dados e perda de tempo.

5.4 Análise da Metodologia Empregada

Ao longo das medições, notou-se a necessidade de implementar mudanças na metodologia inicialmente proposta. O tempo de tomada de medida e sua taxa de aquisição foram repensados para cobrir todos os pontos em um único dia. Além disso, houve uma melhora significativa no setup com a aquisição de um carrinho para facilitar a movimentação entre um ponto e outro. Ainda assim, mesmo com as mudanças culminando em uma visível melhora, como pode ser visto na figura 16 a partir do dia 7 de julho, a demanda de energia do computador tornou-se um novo obstáculo, com o notebook sofrendo descargas totais conforme as medidas iam sendo tomadas.

Para contornar esse problema, foi implementado um nobreak conectado ao notebook durante o deslocamento entre os pontos. A adição do nobreak ao sistema de coleta de dados mostrou-se muito eficaz, como pode ser visto na figura 16, onde, a partir do dia 11 de agosto, obteve-se medidas de todos os pontos.

Entretanto, um novo desafio deverá ser contornado: o armazenamento dos dados gerados. A tabela 11 mostra o volume de dados gerados, no qual é possível observar a criticidade no que tange o processamento e armazenamento das informações.

Tabela 11 – Volume de dados.

| Dado | Tamanho |
|---|----------------|
| Medida | 80 MB |
| Pasta de dia | 391 MB |
| Pasta com todos os dados de 11/08 a 13/10 | 71 GB |
| Power Point mês | 42,7 MB |
| Power Point ano | 133 MB |
| Planilha de frequências | 15,2 MB |

Fonte: Autoral.

Com os estudos realizados até o presente momento, a metodologia empregada mostrou-se bastante eficaz. Com a sensibilidade dos equipamentos, os parâmetros de aquisição adotados e as melhorias feitas ao longo do tempo, é fácil notar que a técnica utilizada é bastante promissora para o monitoramento e análise das vibrações no Sirius.

Ao comparar os dados obtidos nos dias 11/08 e 25/08, observa-se que algumas frequências características não apareceram nas medições do dia 11/08 devido à queda do feixe, que levou ao desligamento de equipamentos em algumas linhas de luz. No dia 25/08, após a retomada do feixe, tais frequências voltaram a ser registradas nas medições.

Esse comportamento evidencia que a metodologia empregada não apenas monitora a estabilidade do piso e das vibrações ambientais, mas também permite diagnosticar a presença ou ausência de frequências específicas associadas a equipamentos. Dessa forma, se for possível identificar quais equipamentos foram desligados, a técnica pode ser utilizada para atenuar ou

mitigar fontes de perturbação, evidenciando que a metodologia também apresenta alto potencial para estudos posteriores de diagnóstico das fontes de vibração.

6 Considerações Finais

A metodologia empregada, tanto para a aquisição de dados quanto para o tratamento desses dados, mostrou-se muito eficaz. A sensibilidade dos equipamentos permite uma análise bastante precisa, mostrando como as vibrações no solo e em mesas de granito podem afetar o funcionamento correto de uma linha de luz. A metodologia também se mostra uma ferramenta com grande potencial para o diagnóstico de frequências, visando atenuar ou até mesmo mitigar frequências que estejam afetando significativamente a estabilidade do feixe e de componentes ópticos.

Entretanto, há ainda muito espaço para melhorias, tais como: adição de novos pontos de medição, melhor escolha para armazenamento dos dados, geração de novas curvas de resultados, como, por exemplo, o espectrograma, e implementação do diagnóstico de equipamentos que são as principais fontes de vibração.

Com base nas análises realizadas, verificou-se que o piso do anel do Sirius cumpre satisfatoriamente os requisitos de estabilidade e homogeneidade esperados. Mesmo diante de interferências externas provocadas por obras próximas, os valores de RMS permaneceram dentro de uma faixa de estabilidade aceitável, confirmando a eficiência do isolamento estrutural.

Os resultados também evidenciaram o bom desempenho do desacoplamento entre o piso do anel e o piso do hall experimental, demonstrando que as vibrações não se propagam entre as duas estruturas. Essa independência garante que as atividades externas não prejudiquem o desempenho das áreas mais sensíveis.

A comparação entre o piso especial e a mesa de granito mostrou que, embora ambos apresentem padrões semelhantes de vibração em parte do espectro, o granito é mais suscetível às baixas frequências, reforçando a necessidade de considerar esse comportamento em análises futuras.

De modo geral, a metodologia adotada e as adaptações implementadas ao longo do trabalho mostraram-se bastante eficazes, resultando em dados consistentes e representativos. Assim, os resultados obtidos até o momento comprovam não apenas a eficiência do método, mas também seu potencial para futuras aplicações no monitoramento e diagnóstico das vibrações no Sirius.

Apêndices

APÊNDICE A – Frequências obtidas para os pontos de interesse

Figura 84 – Frequências do ponto 32.

| 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 3,89 | 4,86 | | | 4,18 |
| | | 10,76 | | | | |
| | | 11,27 | | | | 11,27 |
| | | | | | | 12,36 |
| | | 14,48 | | | 14,99 | 14,42 |
| | | | | | 17,22 | 16,82 |
| 18,83 | | 18,82 | 19,82 | | | |
| 19,28 | | | | | | |
| 19,63 | | 19,57 | 19,57 | 19,57 | 19,57 | 19,91 |
| 20,31 | | | | | | |
| | | 21,06 | | | | |
| | | 22,26 | 22,2 | | 22,14 | |
| 24,15 | | 23,86 | | | 23,57 | |
| 24,66 | | | 24,55 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| | 25,29 | 25,63 | | 25,52 | | |
| 26,04 | 26,21 | 26,26 | 26,21 | 26,44 | 26,21 | 26,15 |
| 27,07 | | | 26,72 | | 27,07 | |
| 27,52 | | 27,46 | | 27,52 | 27,52 | |
| 29,41 | 29,41 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,41 | 29,35 |
| 30,27 | 29,98 | 30,27 | 30,27 | 30,27 | 30,27 | 30,16 |
| 31,59 | | | 31,64 | 31,59 | 31,59 | |
| | | | | 34,22 | | |
| 34,73 | | | 34,73 | 34,73 | 34,73 | |
| 35,88 | 35,88 | 35,88 | 35,88 | 35,87 | 35,88 | 35,88 |
| 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,51 |
| 38,17 | | | 37,48 | 37,48 | 37,48 | |
| 39,54 | 39,77 | 39,71 | 39,77 | 39,71 | 39,88 | 40,34 |
| | | | | | 41,15 | |
| 42,51 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | | 42,45 | |
| | | 42,97 | | 42,91 | | |
| | | | | 44,06 | | |
| 44,98 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 |
| | 45,09 | 45,03 | 45,15 | 44,98 | | 45,49 |
| 46,12 | | | 46,12 | 46,12 | | |
| | | | | 47,84 | 47,89 | 48,07 |
| | | 48,64 | | 48,64 | 48,63 | 48,27 |
| | | | | 49,21 | | |
| | 50,35 | | 50,01 | 50,01 | | |
| 51,38 | | 51,33 | | | 51,21 | |
| | | | | | 51,55 | |
| | | 52,41 | 52,41 | 52,41 | 52,41 | |
| 54,13 | | 54,13 | 54,07 | 54,24 | | |
| 58,71 | 58,71 | 58,65 | | 58,65 | 58,36 | |
| 60,02 | | 59,97 | 60,02 | 60,08 | | 59,51 |
| 66,43 | | 60,6 | | 60,6 | 60,6 | |
| | | | 63,69 | | | |
| | | 65,29 | 65,29 | | 66,36 | |
| 68,66 | 68,49 | | | | | |
| | | 70,78 | 71,75 | 72,04 | 72,04 | 71,3 |
| 72,9 | | | | 72,96 | 72,96 | 73,76 |
| | | 80,22 | | 81,2 | 80,08 | |
| | | | 87,49 | | 87,66 | |
| 88,58 | 88,23 | 88,06 | 88,75 | 88,81 | 88,86 | 88,92 |
| | | | 90,12 | | | |
| | | | | | | 94,41 |
| 96,59 | | 95,39 | 96,13 | | | |
| | | | 101,16 | 101,17 | | |
| 105 | 104,66 | 104,71 | 104,71 | 104,71 | 104,77 | 104,77 |
| | | | | | | 106,72 |
| | | | 107,69 | | | |
| 112,09 | | 112,21 | 111,98 | 112,03 | 112,09 | |
| | 117,65 | | | | 117,36 | |
| 120,11 | 120,05 | 119,93 | 119,99 | 120,16 | 120,11 | 119,99 |
| | 122,22 | 122,28 | 122,45 | 122,57 | 122,57 | 122,62 |
| | | 129,83 | | | | |
| | | | 131,03 | | | |
| 135,04 | | 134,98 | 135,33 | 134,98 | | |
| 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 |
| | | 148,54 | | | | |
| | | 155,98 | 156,15 | 155,41 | 155,92 | |
| 180,7 | | 180,76 | 180,64 | 180,59 | 180,47 | 181,05 |
| 183,05 | | 183,51 | 183,33 | 183,33 | 183,44 | 183,56 |
| | | | | 190,59 | | |
| | | | | 202,45 | 202,27 | 202,27 |
| 216,64 | | 217,44 | 217,67 | 217,04 | 216,75 | 214,02 |
| | 218,18 | | | | | |
| | | | | | | 220,7 |
| | | 224,99 | | | | |
| 240,21 | 239,87 | 240,1 | 239,98 | 240,33 | 240,38 | 239,98 |
| | 244,5 | 244,62 | 244,9 | 245,13 | 245,14 | 245,25 |
| | | 260,29 | 259,84 | 260,12 | 260,47 | 260,75 |
| 271 | | | | | | |
| | | 273,68 | 273,17 | | | 274,49 |
| | | | | | | 281,07 |
| | | | | | | 281,68 |
| | | 288,16 | 288,1 | 288,11 | | |
| 303,04 | | 303,04 | | 300,41 | | |
| 319,12 | 319 | 319,06 | 319,12 | 318,66 | 319,63 | |
| | | 346,47 | | | | |
| | | 360,14 | 360,2 | 360,43 | 360,43 | 359,86 |
| 382,23 | 383,03 | 382,92 | 382,63 | 382,52 | 384,81 | 382,46 |
| | | 395,16 | | | | |
| | | | | 404,95 | 404,55 | 404,49 |
| | | 420,11 | | 420,11 | 420,06 | 420,57 |
| | | | | | 449,24 | 449,29 |

Fonte: Autoral.

Figura 85 – Frequências do ponto 33.

| 18/06/2025 | 07/07/2025 | 11/08/2025 | 19/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | | 2,89 | | | 4,01 |
| | | | | | 5,32 | | | 5,44 |
| | | | | | 5,84 | | | |
| | | | | | 7,27 | | | 8,87 |
| | | | | | | 11,27 | | 12,13 |
| | | | | | 14,68 | | | |
| | | | | | 15,33 | | 15,34 | 15,96 |
| | | | | | | | 17,74 | 18,98 |
| 18,84 | 18,82 | 18,82 | 18,83 | 18,83 | 18,82 | | 18,54 | 18,88 |
| | | | | | | | 19,17 | |
| 19,53 | 19,57 | 19,57 | 19,57 | 19,68 | 19,63 | 19,57 | 19,57 | 19,57 |
| 20,88 | | | | | | | 21,34 | |
| | | | | | | | | 22,09 |
| 22,20 | | 22,32 | | 22,54 | | | 22,25 | 22,54 |
| 23,87 | | 23,78 | | 23,92 | 23,63 | | 23,83 | 23,23 |
| 24,72 | 24,71 | | | | | 24,38 | 24,6 | 24,2 |
| | | 25,98 | | | | | | |
| | | | 26,20 | 26,21 | | | | 26,21 |
| | | | 26,61 | 27,08 | 26,72 | | | |
| 27,85 | | 27,75 | 27,75 | 27,81 | 27,75 | 27,89 | 27,52 | 27,12 |
| 29,37 | 29,35 | 29,41 | 29,41 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 |
| | | 30,27 | | | | 30,16 | 29,7 | 30,61 |
| | | | | 32,02 | 31,99 | | | 32,96 |
| | | | | 33,76 | | | 33,47 | 33,93 |
| 35,83 | | | | | | | 35,02 | |
| 36,47 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,45 | 36,51 |
| | | | | | | | 37,48 | |
| | | | | | 38,03 | | 38,85 | 38,85 |
| | | | | | | | | 39,48 |
| 40,05 | | | | | | | | |
| 42,57 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | 42,51 | | 42,46 | |
| | | | | | | | 44,06 | |
| 44,48 | 44,46 | 44,4 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 | 44,46 |
| | | | | | | | 46,06 | |
| 46,92 | | | | | | | | 47,2 |
| | | | | | | | | 47,98 |
| 49,44 | 49,38 | | 49,32 | | | | | |
| | | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 |
| | | 51,21 | 51,16 | 51,26 | 51,06 | | 51,21 | 52,18 |
| 54,09 | 54,07 | 54,07 | | 53,03 | 53,9 | | 55,56 | 53,22 |
| 57,83 | | 57,85 | 57,85 | 57,79 | 57,79 | 57,79 | 57,82 | |
| | | 58,65 | 58,65 | 58,76 | 58,76 | 58,82 | 58,82 | 59,51 |
| 59,97 | | | 60,02 | | | 60,02 | | |
| | | | | 61 | 61,77 | | 64,32 | |
| 66,45 | | 66,43 | | 67,46 | | 67,01 | | |
| | | 68,61 | 68,55 | | | | | |
| | | | | 69,81 | 69,87 | | | |
| | | | | 71,18 | | | | |
| 72,94 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 72,96 | 73,47 |
| | | | | | | | | 75,76 |
| | | | | | | | | 79,08 |
| | | | | 80,91 | 80,91 | 80,91 | | |
| 87,97 | | 86,8 | 88,29 | 86,92 | 86,92 | 86,92 | 86,86 | |
| | | | | | | | | 94,3 |
| | | | | | | 100,13 | 102,88 | |
| 104,52 | | 104,83 | 104,77 | 104,71 | 104,77 | 104,83 | 104,89 | 104,77 |
| | | | | | | | | 106,43 |
| | | | 117,36 | | | | | |
| 120,01 | 120,05 | 119,99 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 119,99 | 119,99 |
| | | | | | | 132,12 | | |
| 143,89 | | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 | 143,57 |
| | | | | | | 149,4 | 149,4 | 149,4 |
| | | 156,0 | 155,41 | 156,15 | 157,18 | 157,01 | 156,1 | 156,04 |
| | | | | 167,48 | 167,63 | | | |
| | | | | | | | 179,96 | 179,79 |
| | | | | 181,79 | | | | |
| | | | | 194,78 | | | | |
| | | | | | | | | 203,53 |
| | | 240,1 | 240,1 | 240,15 | 240,15 | 240,1 | 239,98 | 239,75 |
| | 245,99 | 245,71 | 246,22 | 246,62 | 246,22 | 246,22 | 246,05 | 246,26 |
| | | | | | | 266,71 | | 266,82 |
| | | 285,42 | 284,1 | | | 284,67 | 285,07 | |
| | | | | | | | | 288,58 |
| | | | | | | | 298,41 | |
| | | | | | | | | 299,55 |
| | | | 349,98 | | | | 349,85 | 349,86 |
| | | 360,15 | 360,2 | | | | 360,15 | 359,97 |
| | | | | | | | 404,95 | 404,95 |
| | | | | | | | 449,24 | 449,75 |

Fonte: Autoral.

Figura 86 – Frequências do ponto 47.

| 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 18,02 | | 18,54 | 18,54 | 18,48 | 18,48 | 18,48 | 18,54 |
| | | 19,05 | 19,05 | 18,99 | | | 19,05 |
| 19,4 | | | | | 19,63 | 19,63 | |
| 21,34 | 21,34 | 21,23 | | | 21,23 | 21,17 | 21,34 |
| | | 22,72 | | | | | |
| 24,32 | 24,26 | 24,55 | 24,6 | 24,26 | 24,26 | | |
| 25,69 | 25,58 | | | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| | | 26,32 | | | 25,52 | 25,58 | |
| | | | | | 26,15 | | |
| | | | | | 26,72 | | |
| | 27,87 | 27,98 | | | | 27,29 | |
| 29,41 | 29,18 | 29,3 | | 29,13 | 29,13 | 29,35 | 29,41 |
| | | 29,7 | 29,64 | 29,64 | 29,64 | 29,7 | |
| | | | | 30,04 | | | |
| 31,07 | | | | | 31,07 | 31,07 | |
| | | | | | 31,64 | 31,64 | |
| 32,84 | | | | | | | |
| | | | | | 35,08 | 35,08 | |
| 35,76 | 35,82 | 35,82 | 35,76 | | | 35,82 | |
| 36,96 | 36,96 | 36,81 | 36,91 | 36,91 | 36,91 | 36,96 | 36,96 |
| 39,42 | | 39,94 | | 39,48 | 39,48 | 39,54 | |
| 40,74 | 40,4 | 40,34 | | | 40 | 40,45 | 40 |
| 42,74 | | 41,03 | | 42,11 | 42,17 | | |
| | | | | 43,32 | | 43,77 | |
| 45,31 | 45,15 | 45,15 | 45,09 | 45,09 | 45,09 | 45,09 | 45,15 |
| | | | | | 48,64 | 48,46 | |
| 50,01 | | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | 50,01 | |
| 54,13 | 54,13 | 54,7 | 54,65 | 54,59 | 54,76 | 54,93 | |
| | | 58,25 | 58,31 | 58,31 | 58,31 | 58,31 | |
| 58,3 | 58,82 | | | | 56,48 | 56,59 | |
| 59,74 | 59,74 | 59,68 | 59,57 | 59,39 | 59,62 | 59,45 | |
| | | | | | 62,26 | 60,82 | |
| | | 66,09 | | | | | |
| 68,66 | 67,92 | 67,86 | 67,81 | 67,81 | 67,75 | 67,75 | 67,69 |
| | 70,67 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,67 | |
| | 73,87 | 74,04 | 73,81 | 73,7 | 73,87 | 73,93 | |
| | | | | | | 75,02 | |
| 77,82 | 77,42 | 77,82 | 77,82 | 77,82 | 77,82 | 77,88 | |
| | | | | | | 84 | |
| 88,23 | 87,55 | 87,95 | | 87,49 | 87,43 | 88 | 88,18 |
| | 89,78 | | | | | | |
| | 90,86 | | 90,47 | 90,81 | 90,75 | 90,41 | |
| | | 91,32 | | | | 91,38 | 91,53 |
| | 113,24 | 113,12 | 113,07 | 113,01 | 112,9 | 112,95 | 112,84 |
| | | 116,56 | | | 116,56 | 116,56 | |
| 119,99 | 120,05 | 120,11 | 120,11 | 120,05 | 120,05 | 120,16 | 119,99 |
| | | 122,62 | | | | 127,6 | |
| 135,96 | | 135,38 | | | | | 135,21 |
| | | | | | 137,44 | | |
| | | | | | | 145,91 | |
| 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 |
| | 154,95 | 155,7 | 155,64 | 155,64 | 155,64 | 155,7 | 155,64 |
| | | 167,83 | 167,89 | 167,71 | 168 | 167,88 | |
| | | | | 171,08 | 171,08 | | |
| 174,75 | 174,81 | 174,87 | 174,87 | 174,81 | 174,81 | 174,81 | 174,69 |
| | | 180,53 | 180,42 | 180,36 | | | |
| | | | | | | 182,82 | |
| | | | | | 185,87 | | |
| | | | | | | 188,43 | |
| | | 195,86 | | 196,5 | 195,58 | 195,92 | |
| | | | | 206,39 | 206,39 | 207,14 | |
| | 209,77 | | | | | | |
| | | 212,23 | 212,17 | | | | |
| | 217,72 | 218,7 | | 217,55 | 217,44 | 218,81 | |
| | 233,06 | 233,17 | 233,17 | 233,17 | 233 | 233,34 | 232,94 |
| | | 240,15 | | | | | |
| 248,28 | 247,25 | 248,22 | 248,57 | 246,28 | | 247,65 | |
| | | 263,84 | | | | 264,01 | 250,74 |
| | 275,11 | | | | | | |
| 285,13 | | | | | | 283,24 | |
| | | 287,02 | | | | | 286,16 |
| | | | | | | 293,31 | |
| 299,61 | 299,61 | 299,61 | 299,61 | 299,61 | 299,61 | 299,61 | 299,61 |
| 303,5 | | 307,22 | | | | | 307,62 |
| | 310,42 | | 310,25 | | 310,13 | 309,56 | |
| | | 322,44 | 322,09 | | 321,75 | 321,01 | |
| 342,06 | 342,81 | | | | 341,95 | 341,89 | |
| | | 360,26 | 360,26 | 360,15 | 360,55 | 360,55 | |
| | | | | 395,65 | 395,97 | | |
| | | | | 410,27 | | | |
| | | | | | 414,28 | | |
| | | | | | 428,98 | | |
| | | | | | 442,14 | | |
| 449,35 | 449,35 | 449,35 | 449,35 | 449,35 | 449,35 | 449,35 | |

Fonte: Autoral.

Figura 88 – Frequências do ponto 45.

| 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | 14,36 | | 14,02 | |
| | | | | | | | 17,51 |
| | 18,37 | 18,35 | | 18,43 | | 18,48 | 18,48 |
| 18,82 | 18,83 | 18,63 | 18,6 | | 18,59 | | |
| | | 19,08 | 19,05 | 18,99 | 19,05 | 19 | 19 |
| 19,57 | 19,57 | 19,6 | 19,63 | 19,57 | | 19,57 | |
| | | | | | 21,11 | 21,91 | |
| | 22,66 | | | | 22,94 | 23 | |
| 24,15 | | 24,03 | 24,1 | 24,03 | 23,92 | 23,86 | |
| | 24,78 | | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | 25,58 | |
| | 26,09 | 26,26 | 26,33 | 26,21 | 26,09 | | |
| 26,83 | 26,78 | | | 26,72 | 26,78 | 26,55 | 26,61 |
| | | 27,06 | 27,07 | | | | |
| 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,35 | 29,47 | 29,35 | 29,64 |
| | | | | | | | 31,01 |
| 32,84 | 32,79 | 32,78 | | 32,79 | | 32,79 | |
| 33,76 | 33,7 | 33,7 | | 33,7 | | | 33,64 |
| | | 34,05 | 34,05 | 34,05 | 34,05 | 34,05 | |
| | | | | | 34,85 | | |
| 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,82 | 35,76 | 35,82 | 35,82 | 35,82 |
| 36,96 | 36,96 | 36,91 | 36,91 | 36,91 | 36,96 | 36,96 | 36,96 |
| 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 |
| | | | | 40,11 | 40,17 | | |
| | | 40,97 | | 41,03 | 41,14 | 40,51 | 40,91 |
| 41,48 | 41,26 | 41,6 | | | | 41,31 | 41,6 |
| 43,94 | 43,77 | | | 43,49 | 43,54 | 43,83 | |
| 44,69 | 44,52 | 44,17 | 44,23 | 44,17 | 44,23 | 44,52 | 44,23 |
| | | 45,09 | 45,2 | | 45,09 | 45,09 | 44,86 |
| | | 46,46 | | | 46,52 | 46,46 | |
| | | 49,49 | | | 49,21 | 49,09 | |
| | | | | 49,95 | 49,95 | | |
| 50,12 | 50,07 | 50,12 | 50,18 | | | 50,01 | 50,12 |
| 57,85 | | 57,85 | 57,85 | 57,96 | 57,91 | 57,96 | |
| 58,82 | 58,82 | 58,82 | 58,82 | 58,82 | 58,76 | 58,76 | 58,76 |
| | | | | | | 59,22 | 60,7 |
| | | 67,4 | | 67,35 | 67,35 | 67,35 | 67,29 |
| 70,66 | 70,67 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,61 | 70,67 | 70,61 |
| | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,87 | 73,93 | 73,87 |
| 76,5 | | 76,45 | 76,45 | | 76,45 | 76,45 | |
| | | | | | 81,19 | 81,48 | |
| | | | | 86,98 | 87,09 | | |
| 87,89 | 87,55 | 88,29 | 88,46 | | 87,89 | 87,72 | 88,4 |
| | | | | 101,34 | | | 101,62 |
| | | | 108,78 | | 108,95 | 109 | 109,11 |
| | | | 112,5 | | 112,09 | 112,09 | |
| 119,99 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 120,11 | 119,99 | 119,99 | 119,93 |
| | | | | | 123,48 | 123,94 | 124,85 |
| 125,2 | | 125,43 | 125,48 | | | | |
| | | | | 130,46 | 130,58 | | |
| | 144,94 | | 144,2 | 144,25 | 144,77 | 144,48 | |
| 160,1 | | | | | | 160,67 | |
| | | 161,93 | | | | | |
| 170 | 169,89 | 170,63 | 170,17 | 169,14 | 170,8 | 170,29 | 170,12 |
| | | | | | 173,95 | 173,95 | |
| 184,31 | 184,42 | 185,05 | 185,45 | 185,51 | 185,05 | 184,99 | 185,11 |
| | | | | | 196,21 | 195,92 | |
| | | | | | 207,82 | 206,74 | 207,77 |
| | | | | | 223,27 | 223,39 | |
| | | | | | | | |
| | 231,17 | 232,12 | 231,23 | | 231,8 | 231,8 | |
| 238,4 | 237,01 | 237,86 | | 238,5 | 238,67 | 237,58 | 238,44 |
| | 242,56 | 242,56 | 243,76 | | 243,19 | 242,84 | |
| 252,4 | 253,32 | 253,32 | | 252,06 | 253,37 | 252,97 | |
| | | | 265,56 | 265,68 | 266,13 | | |
| | | | | | | 274,66 | |
| | | | 303,67 | 304,24 | 304,93 | 304,24 | 303,95 |
| | 310,42 | 310,42 | | | | | |
| 318,55 | | | | 324,9 | 325,53 | 325,18 | |
| | | | | | | | |
| | 386,75 | 386,75 | 386,93 | 386,93 | 386,98 | 386,92 | 387,04 |
| | | | | | | 412,22 | 411,99 |

Fonte: Autoral.

Figura 90 – Frequências do ponto 51.

| 23/06/2025 | 14/07/2025 | 11/08/2025 | 18/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 17,91 | | | | | 15,28 | 14,99 | |
| 19,37 | | | 18,18 | 18,31 | | 18,31 | | 17,62 |
| | | | | | | | | 18,42 |
| 19,23 | 19,28 | 19,74 | 19 | | | 19,23 | 19,34 | 19 |
| 21,74 | | 21,74 | | | | 21,74 | | |
| 22,26 | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | |
| | 23,86 | | | | | 23,4 | | |
| 24,55 | | 24,49 | 24,72 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| 24,89 | | | | | | | | |
| | 25,58 | 25,58 | | | | 25,35 | | |
| | 26,15 | 26,15 | | 26,26 | 26,04 | 26,04 | 26,21 | 26,09 |
| 26,72 | 26,72 | 26,72 | 26,44 | | 26,72 | 26,72 | 26,72 | |
| 27,4 | | 27,47 | | 27,47 | 27,47 | 27,47 | | |
| | 27,81 | 27,81 | 27,81 | | 27,81 | 27,81 | 27,81 | 27,81 |
| 29,07 | 29,19 | 29,01 | | | | | | |
| 29,41 | 29,7 | 29,7 | 29,58 | 29,7 | 29,58 | 29,53 | 29,98 | 29,64 |
| 31,07 | | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 |
| 31,7 | 31,7 | 31,64 | 31,64 | 31,7 | 31,64 | 31,64 | 31,58 | 31,58 |
| | | | | | | | | 32,84 |
| 34,9 | | | 34,05 | | | 34,05 | | |
| | | | | | 35,25 | 35,02 | 34,79 | |
| 36,16 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,12 | 35,93 |
| 38,34 | | | 39,71 | | | 39,54 | | |
| | 40,68 | 40,62 | | | | | | |
| | 40,97 | | | | 40,86 | 40,8 | | |
| 41,54 | 41,54 | 41,54 | 41,54 | 41,43 | 41,14 | 41,2 | 41,14 | 41,08 |
| | | | | 41,89 | | | | |
| 43,6 | | | | | | | | |
| 44,63 | | | 44,46 | | | | | |
| | | | 45,15 | | 45,09 | 45,09 | 45,09 | 45,03 |
| 48,47 | | | | 49,21 | 49,21 | 49,21 | 49,21 | 49,21 |
| 49,67 | | 50,53 | 50,41 | | | | | |
| 52,36 | | | 52,39 | | | 52,8 | 52,81 | |
| 54,02 | | | | | | | | |
| 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 |
| | 55,22 | | | | | | | |
| 57,33 | 57,62 | 57,62 | | | | 57,96 | 57,68 | |
| | | | | | | | 58,59 | 58,82 |
| 59,68 | | | 59,57 | | 59,62 | | 59,17 | 60,02 |
| 61,85 | 61,65 | 60,99 | | 60,99 | 60,99 | 60,99 | 60,94 | |
| | | | 62,14 | | 62,14 | 62,14 | 62,14 | |
| | | | | | | | 64,6 | |
| 68,38 | | | | | | | | |
| 69,81 | | | 69,68 | | | 70,04 | | |
| 72,04 | 72,27 | 72,27 | 72,27 | 72,27 | 72,27 | 72,27 | 72,27 | 72,27 |
| 73,24 | | | | | 73,99 | 73,81 | 73,81 | |
| | | | 75,02 | | | 75,06 | 75,02 | |
| 77,36 | 77,25 | 77,3 | 77,3 | 77,25 | 77,25 | 77,3 | 77,3 | 77,36 |
| | | | | | 78,39 | 78,39 | 78,33 | 78,39 |
| | 79,59 | 79,59 | 79,71 | 79,71 | 79,48 | 79,71 | 79,71 | 79,82 |
| | | | 83,77 | | | | 82,97 | |
| 87,2 | 87,2 | | 87,95 | 88,18 | | 86,75 | 86,57 | |
| 89,49 | | 88,86 | | | | 89,09 | 88,98 | |
| | | | | | | | 91,04 | |
| | | 95,9 | 95,84 | 95,84 | 95,79 | | 95,75 | |
| | | 99,96 | | | | | | |
| 104,66 | 104,66 | 104,54 | 104,54 | 104,54 | 104,54 | 104,54 | 104,43 | 104,54 |
| 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | 109,35 | |
| 111,98 | | | 112,44 | | | | | |
| 113,41 | | | | | | | | |
| | | 117,93 | 118,1 | 118,16 | 118,1 | 115,58 | 115,41 | |
| | 120,05 | 120,11 | 119,99 | 119,99 | 119,99 | 119,99 | 119,93 | 120,05 |
| | | | 131,21 | | | | | |
| | | | | 126,97 | | 126,97 | | |
| 130,86 | | | | | | | | |
| | | 138,13 | | | | 144,08 | 144,25 | |
| 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 | 149,8 |
| | | 154,61 | 154,55 | 154,55 | 154,55 | 154,55 | 154,55 | 154,72 |
| | | | | | 163,48 | | | |
| | | | 168,68 | | | 166,22 | 165,88 | |
| | | | | | | 169,94 | | |
| | | | | | | | 173,09 | 173,61 |
| | | | | | | 177,84 | 177,61 | |
| | | | | | | | 180,36 | |
| | | | 187,51 | 183,1 | | | | |
| | | 193,23 | | | | | 193,23 | |
| | | | | | | 202,33 | 201,93 | |
| | | | | | | 211,14 | 210,97 | |
| | | | 224,99 | | | | 223,56 | |
| 231,69 | 231,8 | 231,4 | 231,51 | 231,46 | | 231,28 | 231,51 | |
| | | | | | | 235,29 | | |
| 240,04 | 240,04 | 239,98 | 239,98 | 240,04 | 240,04 | 239,81 | 240,04 | 240,04 |
| | | | | | 254,57 | | 249,14 | 250,17 |
| 278,15 | | | | | | | 278,15 | |
| | | | | | | | 287,93 | |
| | | | | 290,79 | | | | |
| | | | | 299,55 | | 299,61 | 299,61 | 299,61 |
| 309,05 | 309,16 | 309,16 | 309,05 | 309,05 | 309,16 | 309,04 | 309,05 | 309,39 |
| | | | | | 312,77 | | | |
| 316,04 | 316,89 | | | | | | | |
| | 324,32 | | | | | | | |
| 360,03 | 360,32 | 359,78 | 359,8 | 359,8 | 359,8 | 360,09 | 359,8 | |
| 367,7 | | | | | 368,39 | | | |
| | | | | 386,35 | 386,41 | 386,35 | 386,41 | 386,75 |

Fonte: Autoral.

Figura 91 – Frequências do ponto 52.

| 23/06/2025 | 14/07/2025 | 11/08/2025 | 19/08/2025 | 25/08/2025 | 01/09/2025 | 10/09/2025 | 15/09/2025 | 06/10/2025 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | 15,17 | | | | | |
| | | | 15,83 | | | 15,85 | 15,85 | |
| | | | 16,62 | | | | | |
| | | | 17,27 | | | | | |
| 18,43 | | | | | | | | |
| 19,57 | 19,57 | 19,57 | | | | 19,83 | | |
| | 20,94 | 20,94 | 20,94 | 20,94 | 20,94 | | 20,93 | |
| 21,17 | | | | | 21,17 | 21,17 | 21,15 | |
| | | | | | | 22,26 | | |
| | | | | | | 23,06 | 23,12 | |
| | | 24,49 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| 24,6 | | | | | | | | |
| 26,78 | 26,72 | 26,72 | 26,49 | | 26,72 | 26,72 | 26,78 | |
| 27,47 | | 27,47 | 27,81 | 27,47 | 27,47 | 27,47 | | |
| 27,75 | 27,81 | 27,81 | | | | 27,75 | 27,81 | 27,75 |
| 29,13 | 29,13 | 28,9 | | | | | | |
| 29,53 | | 29,59 | 29,64 | 29,53 | 29,53 | 29,58 | 29,52 | |
| | | 30,04 | | | | | 29,98 | |
| 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 | 31,07 |
| 31,7 | 31,7 | 31,7 | 31,64 | 31,64 | 31,64 | 31,64 | 31,64 | |
| 34,9 | | | | | | 34,85 | 34,85 | |
| 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | 36,05 | |
| 37,82 | | 37,54 | | | 37,82 | | 37,82 | |
| | | | 38,17 | 38,05 | | | | |
| | | | 38,79 | | | 38,79 | 38,79 | |
| | | | | 39,42 | | | 39,37 | |
| 41,2 | 41,26 | 41,2 | 41,2 | 41,2 | 41,26 | 41,2 | 41,2 | |
| | | | 41,83 | 41,89 | | 41,83 | 41,88 | |
| 42,4 | | 42,34 | 42,34 | | 42,34 | | | |
| | | | | | | 43,54 | 43,54 | |
| | | | | | | 44,69 | 44,69 | |
| 48,75 | | 48,64 | | | | | | 48,29 |
| 49,55 | | | | 49,21 | 49,21 | 49,21 | 49,21 | |
| | | | 50,24 | | | | | |
| | | | 52,87 | | | 52,3 | 52,3 | |
| 54,02 | 54,47 | | 53,96 | 54,02 | 54,02 | 54,47 | 54,47 | |
| | | 57,79 | | | | 57,96 | 58,02 | 57,79 |
| | | | 59,05 | | | | | |
| | | | | | | | | 60,31 |
| 62,08 | 62,08 | | 62,14 | 62,14 | 62,14 | 62,14 | 62,14 | |
| | | | | | | | | 64,83 |
| | | | | | | | | 69,64 |
| | | | | | | | | 71,3 |
| 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | |
| | | | | 73,81 | 73,81 | 73,81 | 73,81 | |
| | | | 75,54 | 75,56 | | | | |
| | | | 87,78 | 87,78 | | 87,83 | 87,83 | |
| | 89,78 | 89,72 | | | 88,81 | 88,61 | 88,61 | 88,52 |
| | | 95,79 | 95,9 | 95,84 | 95,9 | 95,79 | 95,79 | 96,19 |
| 104,66 | 104,71 | 104,49 | 104,6 | 104,54 | 104,6 | 104,6 | 104,48 | |
| | | | | | | 108,09 | | |
| | | 109,35 | | | | 109,35 | 109,35 | |
| | | | | | | | | 110,55 |
| 111,98 | 111,98 | | 111,97 | 111,87 | 112,84 | 111,87 | 111,87 | |
| 116,22 | | | 118,22 | | 118,22 | 118,22 | 118,22 | 117,82 |
| 119,99 | 120,16 | 120,05 | 120,05 | 120,05 | 120,11 | 119,99 | 120,05 | 119,99 |
| | | | 124,28 | 124,28 | 124,28 | 124,28 | 124,28 | 124,74 |
| 126 | 125,99 | 126,11 | 126,17 | | 126,23 | 126,28 | 126,28 | |
| | | | | | | | | 142,19 |
| | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | 144,14 | |
| 149,35 | 149,35 | 149,35 | 149,34 | 149,35 | 149,35 | 149,35 | 149,35 | |
| | 158,67 | | | | | | | |
| | | 160,56 | 160,05 | 160,56 | 160,5 | 160,62 | 160,45 | |
| | | | 162,22 | | | | | |
| | | | | | | | | 165,94 |
| 180,19 | 180,19 | 180,19 | 180,13 | 180,07 | 180,07 | 179,96 | 179,9 | |
| | | | 216,24 | | | 216,24 | 216,24 | |
| | | | | | | 231,91 | 231,68 | |
| | | 239,87 | 240,1 | | 247,02 | 247,14 | 240,1 | 239,87 |
| | | 246,85 | 245,47 | 247,02 | 247,14 | 245,7 | 246,28 | 249,02 |
| | | | | | 254,57 | | | |
| 288,33 | 288,33 | 288,33 | 288,33 | 288,33 | 288,28 | 288,28 | 288,33 | 288,33 |
| | | | | | | | 294,11 | 294,4 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | 296,68 | | |
| | 324,38 | | 324,38 | 324,38 | 312,77 | 312,77 | | |
| | | | | | 324,33 | 324,33 | 324,33 | 324,32 |
| | | | | | 360,37 | 360,15 | 360,15 | 360,37 |
| | | | | | 375,94 | 373,53 | 374,05 | |
| | | | | | | 386,92 | 386,98 | 386,98 |
| | | | | | 397,11 | 397,28 | | 411,87 |
| | | | | | | | 419,83 | |
| | | | | | | | 448,09 | 448,09 |

Fonte: Autoral.

Referências

- AMC – Analytik & Messtechnik GmbH Chemnitz. *USB-4431 - Schall- und Schwingungsmessgerät*. 2025. Acesso em: 03 out. 2025. Disponível em: <<https://www.amc-systeme.de/usb-ethernet-messgeraete/USB-4431.html>>.
- ARRUDA, R. de F.; HUALLPA, B. N. *Análise Espectral de Sinais e Sistemas Mecânicos Lineares*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008. Acesso em: 01 out. 2025.
- Artisan Technology Group. *P31 Wilcoxon Research Power Unit / Amplifier*. 2025. Acesso em: 03 out. 2025. Disponível em: <<https://www.artisanng.com/TestMeasurement/66164-1/Wilcoxon-Research-P31-Power-Unit-Amplifier>>.
- BARTOLINI, R. et al. Analysis of beam orbit stability and ground vibrations at the diamond storage ring. In: *Proceedings of the EPAC08*. Genoa, Italy: [s.n.], 2008. p. 1980–1982. Acesso em: 03 out. 2025.
- BUENO, C. S. N. C. et al. Vibration assessment at the carnaÚba beamline at the sirius/lnls. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI2020)*. Chicago, IL, USA: JACoW Publishing, 2021. p. 37–40. Disponível em: <<https://doi.org/10.18429/JACoW-MEDSI2020-MOPB08>>. Acesso em: 25 out. 2025.
- CHARRONDIERE, C. et al. Ground vibration monitoring at cern as part of the international seismic network. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2017)*. Barcelona, Spain: JACoW Publishing, 2018. p. THPHA134. Disponível em: <<<https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA134>>>. Acesso em: 25 out. 2025.
- CHU, T. et al. A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon*, Cell Press, v. 10, n. 5, p. e26282, mar. 2024. Acesso em: 30 set. 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024023132>>.
- DigiKey Electronics. *Amphenol Wilcoxon Sensing Technologies 731A - Accelerometer Sensor*. 2025. Acesso em: 03 out. 2025. Disponível em: <<https://www.digikey.com/en/products/detail/amphenol-wilcoxon-sensing-technologies/731A/13148702>>.
- DISW, S. *Data Acquisition: Anti-Aliasing Filters*. 2019. Disponível em: <<https://community.sw.siemens.com/s/article/data-acquisition-anti-aliasing-filters>>. Acesso em: 09 out. 2025.
- DOESITY. *Resumo: Movimento Harmônico Amortecido*. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/licao/158294-resumo-movimento-harmonico-amortecido/8935/?src=social_login>. Acesso em: 19 out. 2025.
- Engfaz. *O que é RMS em análise de vibração?* 2025. Disponível em: <<https://www.engfaz.com/o-que-e-rms-em-analise-de-vibracao/>>. Acesso em: 9 out. 2025.
- ENSUS. *Análise de Vibração – Tipos de Sinais, Transformada de Fourier e PSD*. 2025. <<https://ensus.com.br/analise-de-vibracao-tipos-de-sinais-transformada-de-fourier-e-psd/>>. Acesso em: 04 out. 2025.

- Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). *Linha de Luz CARNAÚBA*. Disponível em: <<https://lnls.cnpem.br/facilities/carnauba/>>. Acesso em: 25 out. 2025.
- Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM). *Como funciona o Sirius?* 2025. Acesso em: 20 set. 2025. Disponível em: <<https://lnls.cnpem.br/sirius/como-funciona-o-sirius/>>.
- LAGE, E. Vibrações. *Revista Ciência Elementar*, Universidade do Porto, v. 8, n. 1, p. 015, 2020. Acesso em: 20 set. 2025. Disponível em: <<https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2020/015/>>.
- MACHBASE. *FFT (Fast Fourier Transform) Utilizing Machbase Neo*. 2024. <<https://www.machbase.com/en/post/fft-fast-fourier-transform-utilizing-machbase-neo>>. Acesso em: 04 out. 2025.
- NUSSENZVEIG, H. M. O oscilador harmônico. In: *Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2002. p. 39–46.
- REYNOLDS, J. *Ciclo de uma onda*. 2023. Disponível em: <<https://physigeek.com/pt/ciclo-de-uma-onda/>>. Acesso em: 19 out. 2025.
- RODRIGUES, F. et al. Sirius stability: From foundation to girders. *Synchrotron Radiation News*, Taylor & Francis, v. 32, n. 5, p. 20–26, 2019. Acesso em: 30 set. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/08940886.2019.1654828>>.
- SERLUCA, M. et al. Vibration and luminosity frequency analysis of the superkekb collider. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, Elsevier, v. 1025, p. 166123, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166123>>. Acesso em: 25 out. 2025.
- Siemens PLM. *Windows and Spectral Leakage*. 2019. Disponível em: <<https://community.sw.siemens.com/s/article/windows-and-spectral-leakage>>. Acesso em: 05 out. 2025.