

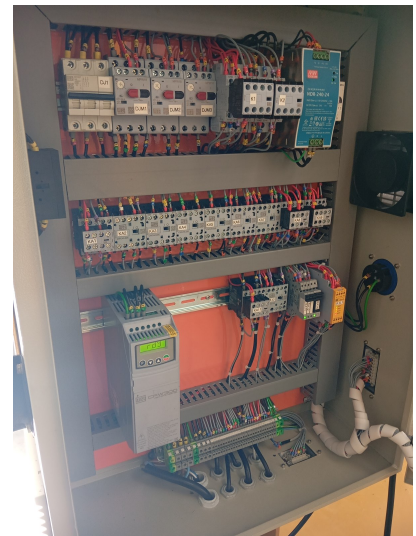
# Relatório Técnico de Análise de Vibração

Motor rotativo — monitoramento com acelerômetro (*Vibração ao Vivo*)

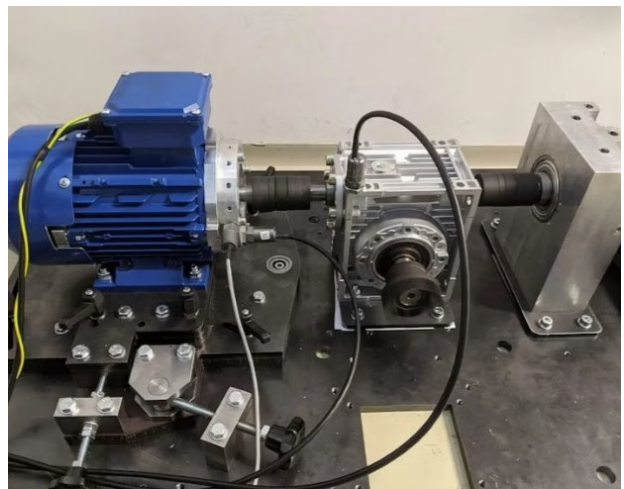
Arquivo de origem: VID\_20260906\_095555\_062 • Taxa de amostragem: 199 amostras/s

## 1. Contexto de campo

Esta análise não é um exercício de laboratório: nasce de **aplicação real em chão de fábrica**. O monitoramento faz parte de um sistema de manutenção preditiva desenvolvido e instalado em campo, sobre máquinas industriais em operação — colunas de elevação, redutores e conjuntos motrizes. As figuras a seguir mostram o ambiente em que os dados deste relatório são coletados.



**Figure 1:** *Em campo: coluna de elevação industrial (EMPRETEC) energizada com torre de sinalização em operação, e o painel de comando (inversor WEG CFW300, disjuntores-motor, contadores e relés) que aciona o conjunto. É sobre máquinas rotativas assim que o sensor de vibração atua.*



**Figure 2:** *Esquerda: conjunto motoredutor (SEW) instalado em campo — a máquina rotativa cuja vibração é monitorada. Direita: bancada de ensaio instrumentada (motor + redutor + acoplamento) usada para validar o conceito de medição.*

**Por que isto importa.** Um relatório de vibração só vale se os números vierem de uma medição real e rastreável. Todo o tratamento matemático a seguir — frequência dominante, RMS, FFT, severidade ISO — descreve exatamente o sinal captado por este sensor, neste ambiente.

## 2. Dados lidos do painel

Os valores abaixo foram extraídos diretamente das telas. O painel mede a **aceleração linear** nos três eixos ( $X, Y, Z$ ), já com a gravidade removida (“*sem a gravidade*”), e calcula em tempo real a frequência dominante, o valor RMS e o pico a pico.

| Grandeza                | Valor(es) observado(s)                    | Observação                 |
|-------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| Frequência dominante    | 59,4; 59,8; 65,2; 66,0; 67,2 Hz           | pico do espectro FFT       |
| Rotação equivalente     | 3563; 3609; 3914; 4031 RPM                | $n = 60 f$                 |
| Vibração (RMS)          | 0,4080; 0,4108; 0,4170; 0,4464 g          | 139–153× a linha de base   |
| Pico a pico             | 1,981; 2,098 g                            | maior excursão instantânea |
| Linha de base (repouso) | 0,00294 g                                 | ruído do sensor parado     |
| Aceleração por eixo     | $X \approx 1,0\text{--}1,16$ g            | $X$ é o eixo dominante     |
| Total de amostras       | $\approx 6\,704\,489\text{--}6\,769\,261$ | histórico coletado         |

**Leitura rápida:** o motor gira a  $\sim 3600\text{--}4000$  RPM, com energia de vibração fortemente concentrada em uma única frequência ( $\approx$  a frequência de rotação). A vibração em funcionamento é cerca de **140 a 150 vezes** maior que o ruído do sensor em repouso — ou seja, é sinal real, não ruído.

## 3. Parte I — Física da vibração

### 3.1 Movimento harmônico e a relação frequência $\rightarrow$ RPM

Cada ponto da carcaça oscila em torno de uma posição de equilíbrio. Modelando a componente dominante como um **movimento harmônico simples (MHS)**:

$$x(t) = X_0 \sin(\omega t), \quad \omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}]. \quad (1)$$

A frequência dominante  $f$  (em Hz = ciclos/s) corresponde à rotação do eixo. Como 1 volta = 1 ciclo, a rotação em rotações por minuto é

$$\boxed{n = 60 f} \quad \text{Ex.: } f = 67,2 \text{ Hz} \Rightarrow n = 60 \times 67,2 = 4032 \text{ RPM (painel: 4031)}. \quad (2)$$

Todos os pares  $(f, n)$  do painel confirmam essa relação com erro  $< 0,1\%$ , o que mostra que o pico do espectro é mesmo a *frequência de rotação* (ordem  $1\times$ ).

### 3.2 Aceleração, velocidade e deslocamento (integração)

O sensor mede aceleração  $a(t)$ . Velocidade e deslocamento vêm da **integração** no tempo:

$$v(t) = \int a(t) dt, \quad x(t) = \int v(t) dt = \iint a(t) dt dt. \quad (3)$$

Para a componente harmônica dominante  $a(t) = A \sin(\omega t)$ :

$$v(t) = -\frac{A}{\omega} \cos(\omega t), \quad x(t) = -\frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t). \quad (4)$$

Logo, em valores RMS, cada integração divide a amplitude por  $\omega$ :

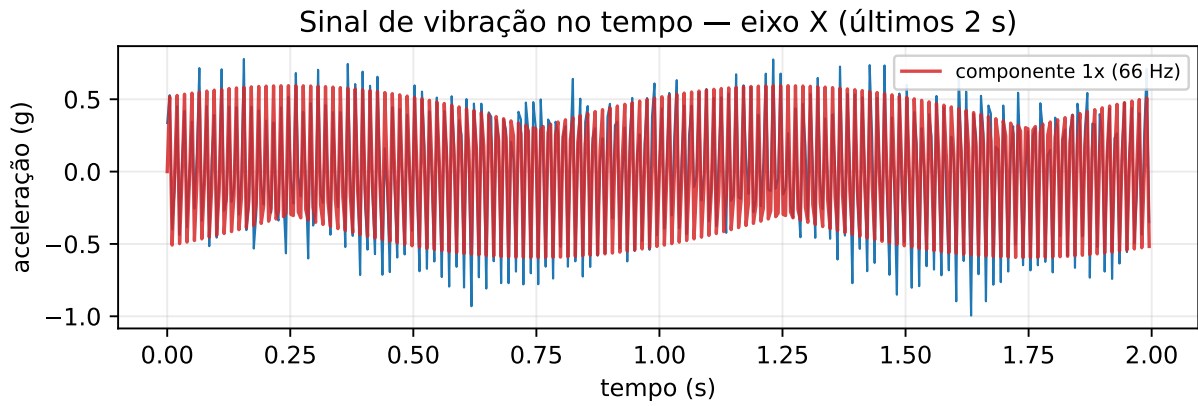
$$\boxed{v_{\text{rms}} = \frac{a_{\text{rms}}}{\omega} = \frac{a_{\text{rms}}}{2\pi f}, \quad x_{\text{rms}} = \frac{a_{\text{rms}}}{\omega^2} = \frac{a_{\text{rms}}}{(2\pi f)^2}} \quad (5)$$

**Exemplo numérico** (Print:  $a_{\text{rms}} = 0,4080 \text{ g}$ ,  $f = 67,2 \text{ Hz}$ ). Convertendo para SI,  $a_{\text{rms}} = 0,4080 \times 9,80665 = 4,001 \text{ m/s}^2$  e  $\omega = 2\pi(67,2) = 422,2 \text{ rad/s}$ :

$$v_{\text{rms}} = \frac{4,001}{422,2} = 9,48 \times 10^{-3} \text{ m/s} = 9,48 \text{ mm/s}, \quad (6)$$

$$x_{\text{rms}} = \frac{4,001}{422,2^2} = 2,24 \times 10^{-5} \text{ m} = 22,4 \mu\text{m} \quad (\text{pico a pico} \approx 63 \mu\text{m}). \quad (7)$$

Ou seja: apesar de 0,41 g parecer alto, o eixo se desloca fisicamente apenas  $\sim 22 \mu\text{m}$  — porque a aceleração cresce com  $\omega^2$  (frequência alta gera muita aceleração com pouquíssimo deslocamento).



## 4. Parte II — Matemática avançada

### 4.1 O RMS como integral (norma quadrática)

O “0,4080 g” do painel é a **raiz do valor quadrático médio**, definida por uma integral sobre a janela de tempo  $T$ :

$$\boxed{a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt}} \xrightarrow{\text{versão discreta}} a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2}. \quad (8)$$

Para um seno puro de amplitude  $A$ , a integral fornece o fator clássico

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0,707 A. \quad (9)$$

Como a **potência** de vibração é proporcional a  $a_{\text{rms}}^2$ , comparando com a linha de base (0,00294 g):

$$\left( \frac{0,4080}{0,00294} \right)^2 \approx 1,9 \times 10^4 \Rightarrow \text{a potência vibratória é } \sim 19\,000\times \text{ a do sensor em repouso } (\approx 42,8 \text{ dB}). \quad (10)$$

## 4.2 Transformada de Fourier: como nasce o espectro

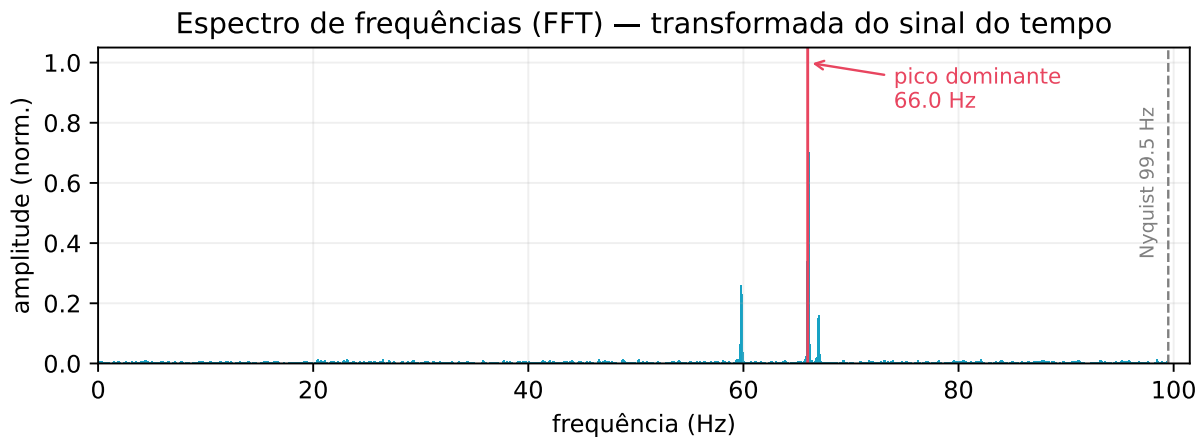
O gráfico de barras (o “espectro”) é a **Transformada de Fourier** do sinal do tempo. Na forma contínua:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-i2\pi ft} dt. \quad (11)$$

Como o sinal é amostrado, o aparelho usa a **Transformada Discreta de Fourier (DFT)**, calculada pelo algoritmo *FFT*:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-i2\pi kn/N}, \quad f_k = k \frac{f_s}{N}, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}. \quad (12)$$

O pico do módulo  $|X_k|$  ocorre no índice  $k$  cuja frequência  $f_k$  é a **frequência dominante** exibida (59,8, 66,0 Hz etc.).



## 4.3 Teorema da amostragem (Nyquist) e resolução

Com  $f_s = 199$  Hz, a maior frequência mensurável sem distorção (*aliasing*) é

$$f_{\text{Nyquist}} = \frac{f_s}{2} = 99,5 \text{ Hz}. \quad (13)$$

Como o pico está em  $\sim 60\text{--}67$  Hz, a medição está **dentro** do limite — válida. A resolução em frequência depende do número de amostras  $N$  da janela:

| $N$  | tempo de janela $T = N/f_s$ | resolução $\Delta f = f_s/N$ |
|------|-----------------------------|------------------------------|
| 512  | 2,57 s                      | 0,389 Hz                     |
| 1024 | 5,15 s                      | 0,194 Hz                     |
| 2048 | 10,29 s                     | 0,097 Hz                     |

Quanto mais tempo de coleta, mais “fino” o espectro — por isso o pico consegue ser lido com uma casa decimal.

## 4.4 Fator de crista (crest factor)

Relaciona o pico com o RMS e mede o quão “pontudo” é o sinal:

$$\text{CF} = \frac{a_{\text{pico}}}{a_{\text{rms}}}, \quad a_{\text{pico}} = \frac{\text{pico a pico}}{2}. \quad (14)$$

Print (pk-pk = 1,981 g, RMS bruto 0,4325 g):

$$CF = \frac{1,981/2}{0,4325} = \frac{0,9905}{0,4325} \approx 2,29. \quad (15)$$

Para um seno puro  $CF = \sqrt{2} \approx 1,41$ . O valor medido ( $\approx 2,3$ – $2,5$ ) é maior, indicando conteúdo **não puramente senoidal** (há harmônicos e algum componente impulsivo/aleatório) — coerente com a forma de onda “cheia” das telas.

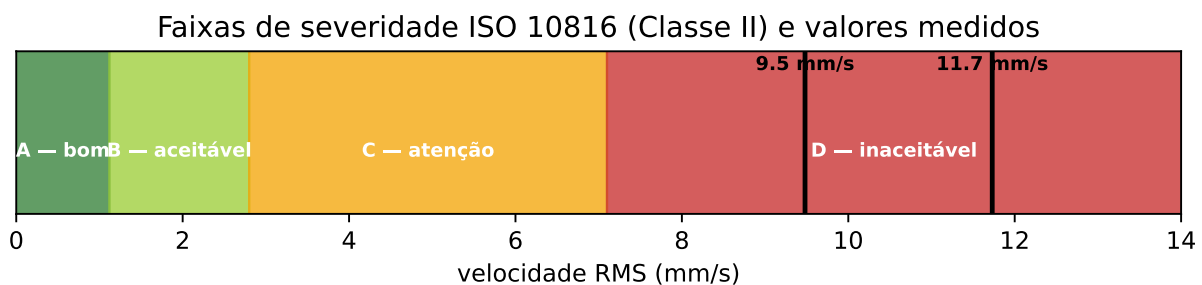
## 5. Parte III — Diagnóstico de engenharia

### 5.1 Assinatura de desbalanceamento ( $1\times$ )

Toda a energia concentrada em **um único pico na frequência de rotação** (ordem  $1\times$ ), radial e estável, é a assinatura clássica de **desbalanceamento de massa** do rotor. Trincas, folgas ou defeitos de rolamento tendem a gerar picos em outras ordens ( $2\times$ ,  $3\times$ ) ou bandas laterais, e fatores de crista bem mais altos ( $> 4$ – $6$ ). Aqui o quadro aponta primariamente para desbalanceamento.

### 5.2 Severidade segundo a ISO 10816

Convertendo a vibração para **velocidade RMS** (a grandeza que a norma usa), obtivemos  $v_{\text{rms}} \approx 9,5$ – $11,7$  mm/s na faixa 59–67 Hz. Para máquinas de porte médio (Classe II), isso cai na **Zona D (inaceitável)**:



**Conclusão técnica.** A máquina apresenta vibração dominada pela ordem  $1\times$  ( $\sim 60$  Hz  $\Rightarrow \sim 3600$  RPM), com velocidade RMS estimada em  $\sim 10$  mm/s — nível elevado pela ISO 10816. O padrão é compatível com **desbalanceamento de rotor**. Recomenda-se: (i) verificar fixação/base; (ii) balanceamento do conjunto rotativo; (iii) reavaliar após correção, buscando  $v_{\text{rms}} < 2,8$  mm/s (zonas A/B).

*Observações metodológicas: valores obtidos de acelerômetro não calibrado (tipo MEMS de celular/módulo), portanto as amplitudes têm caráter comparativo. A conversão aceleração  $\rightarrow$  velocidade admite que a energia se concentra na frequência dominante (aproximação de banda estreita). Como o pico oscila em torno de 60 Hz, convém confirmar que ele é mecânico (rotação) e não interferência elétrica da rede, comparando o pico com a rotação real medida com tacômetro.*