XXXI ENCONTRO SOBRAC Ouro Preto - MG 2026

Instrumentação minimamente invasiva de compressores herméticos para medição de vibração em baixa frequência

Nogueira, L. M.[1]**; Lenzi, A.**[1]

[1] Laboratório de Vibrações e Acústica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, {leonardo.nogueira, arcanjo.lenzi}@lva.ufsc.br

Resumo

A carcaça selada dos compressores herméticos alternativos impede o acesso direto aos componentes internos, dificultando a medição do comportamento vibratório necessária à validação de modelos numéricos. Este trabalho desenvolve um sistema de baixo custo, com software aberto, de aquisição e processamento para a análise de vibrações de baixa frequência desses componentes, tratados como corpos rígidos. Duas unidades de medição inercial MEMS, um sensor magnético de posição angular e um sensor de corrente de núcleo partido, totalizando quatorze canais, são controlados por um computador de placa única em barramento I^2C, com aquisição de até 1.666 amostras por segundo por canal. Os sensores foram calibrados com um gabarito impresso em 3D, que dispensa equipamento de laboratório, e comparados a acelerômetros piezoelétricos comerciais. A atitude do corpo é estimada por fusão de sensores para remover a componente gravitacional e transferir os sinais ao centro de massa. Na faixa de 0 a 400 Hz as unidades inerciais identificam as mesmas componentes espectrais do sistema de referência, com predominância de 60 Hz e de suas harmônicas, porém com diferenças de amplitude. Os ensaios foram conduzidos em bancada, sem ciclo de refrigeração ativo e sem restituição da vedação da carcaça.

Palavras-chave: MEMS, unidade de medição inercial, fusão de sensores, aquisição de dados de baixo custo, monitoramento de integridade.

Minimally invasive instrumentation of hermetic compressors for low-frequency vibration measurement

Abstract

The sealed shell of reciprocating hermetic compressors prevents direct access to the internal components, hindering the vibration measurements required for numerical model validation. This work develops a low-cost acquisition and processing system, with open software, for the low-frequency vibration analysis of such components, treated as rigid bodies. Two MEMS inertial measurement units, a magnetic angular position sensor and a split-core current sensor, amounting to fourteen channels, are driven by a single-board computer over an I^2C bus, acquiring up to 1666 samples per second per channel. The sensors were calibrated with a 3D-printed template that requires no laboratory equipment, and compared against commercial piezoelectric accelerometers. Body attitude is estimated through sensor fusion in order to remove the gravitational component and to transfer the signals to the centre of mass. Within the 0 to 400 Hz range the inertial units identify the same spectral components as the reference system, dominated by 60 Hz and its harmonics, although with amplitude differences. The tests were carried out on a bench, without an active refrigeration cycle and without restoring the shell sealing.

Keywords: *MEMS, inertial measurement unit, sensor fusion, low-cost data acquisition, condition monitoring.*

1. Introdução

A validação de modelos de simulação numérica em vibroacústica depende, em última instância, da comparação de seus resultados com dados experimentais obtidos de um sistema físico real, adequadamente instrumentado [1]. No caso dos compressores herméticos alternativos, amplamente empregados em refrigeradores domésticos, essa tarefa é dificultada justamente pela condição hermética da carcaça, que impede o acesso direto aos componentes internos. A medição do comportamento vibratório desses componentes é, contudo, de interesse intrínseco ao desenvolvimento de produtos, seja para o estudo de fadiga da suspensão interna, seja para a otimização topológica da carcaça [2].

As vibrações de baixa frequência são particularmente relevantes, pois estão associadas ao desequilíbrio cinemático do mecanismo alternativo, principal causa das vibrações estruturais transmitidas ao gabinete do refrigerador e, consequentemente, do desempenho acústico do produto [3]. Na prática industrial, tais medições são realizadas com acelerômetros piezoelétricos acoplados a uma bancada de teste, cujo número de canais é normalmente insuficiente para a quantidade de sensores requerida na caracterização do movimento de corpo rígido [4], além de exigir uma instrumentação invasiva que compromete a integridade hermética da unidade. Nesse contexto, a Unidade de Medição Inercial (*Inertial Measurement Unit*, IMU), fabricada com tecnologia de Sistemas Microeletromecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems*, MEMS), apresenta-se como alternativa viável e de baixíssimo custo, reunindo em um único encapsulamento acelerômetros e giroscópios capazes de mensurar os seis graus de liberdade de um corpo rígido [5]. Trabalhos recentes demonstraram o potencial desse tipo de sensor em sistemas de aquisição de baixo custo [6], inclusive com melhor sensibilidade em baixas frequências que os acelerômetros piezoelétricos tradicionais [7]. Esses trabalhos, contudo, concentram-se na medição de aceleração em um ou três eixos, sem a estimativa do movimento completo de corpo rígido nem a aquisição simultânea de grandezas elétricas e cinemáticas da máquina. O sistema aqui proposto distingue-se por reunir, em um mesmo barramento e em uma mesma base de tempo, os seis graus de liberdade de dois corpos rígidos, a corrente de alimentação e a posição angular do rotor.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de aquisição e processamento de sinais de baixo custo, com software aberto, para a análise de vibrações de baixa frequência de componentes, considerados corpos rígidos, em compressores herméticos alternativos. Além do comportamento vibratório, o sistema adquire a corrente de alimentação e a posição angular do rotor do motocompressor, grandezas que descrevem os regimes de partida, operação e parada do motor. A contribuição principal está na demonstração de uma cadeia completa de instrumentação — do circuito de sensores à calibração, ao processamento e à visualização — com validação experimental dos acelerômetros e dos giroscópios contra sensores piezoelétricos comerciais. Ressalta-se, desde já, que os ensaios foram conduzidos em bancada, com a carcaça aberta e sem ciclo de refrigeração ativo; a restituição da hermeticidade após a instrumentação não foi demonstrada experimentalmente, e as conclusões deste trabalho restringem-se a essa condição de ensaio.

2. Fundamentação teórica

2.1 Medição do movimento de corpo rígido

Um corpo rígido possui seis graus de liberdade (GDL): três de translação e três de rotação, ou atitude, em relação a um sistema de coordenadas global [8]. Para caracterizá-los experimentalmente, Martin *et al.* [4] descrevem três configurações de instrumentação: nove acelerômetros uniaxiais; três acelerômetros uniaxiais combinados a um giroscópio triaxial; e o arranjo denominado *cubo compacto*, que emprega um acelerômetro triaxial e um giroscópio triaxial coincidentes. Esta última configuração, adotada neste trabalho, é a que melhor se ajusta ao encapsulamento de uma IMU MEMS.

Adotam-se dois referenciais: o global $\{G\}$, fixo no laboratório, com o eixo z na vertical ascendente; e o do corpo $\{B\}$, solidário ao corpo rígido e coincidente com os eixos de sensibilidade da IMU. Salvo indicação em contrário, as grandezas vetoriais a seguir estão expressas em $\{B\}$.

Como as medições não podem ser realizadas exatamente no centro de massa (CM) do corpo, os sinais são adquiridos em um ponto arbitrário e transferidos ao CM considerando as acelerações centrípeta e tangencial decorrentes da rotação [4]:

$$\vec{A}_0 = \vec{A}_1 - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}, \tag{1}$$

em que $\vec{A}_1$ é a leitura calibrada do acelerômetro no ponto de medição, $\vec{A}_0$ a aceleração transferida ao CM, $\vec{\omega}$ a velocidade angular, $\dot{\vec{\omega}}$ a aceleração angular e $\vec{r}$ o vetor posição com origem no CM e extremidade no ponto de medição — isto é, orientado do CM para a IMU.

O acelerômetro não mede a aceleração inercial, e sim a força específica, que inclui a reação de apoio à gravidade. Sua remoção exige a atitude do corpo, expressa pelo quatérnio unitário q estimado por fusão de sensores. Define-se $\mathbf{R}(q)$ como a matriz de rotação que converte coordenadas de $\{B\}$ para $\{G\}$, de modo que $\mathbf{R}(q)^{\mathsf{T}}$ realiza a conversão inversa; o vetor gravidade, expresso em $\{G\}$, é $\vec{g} = \{0 \;\; 0 \;\; -g\}^{\mathsf{T}}$, com $g = 9{,}80665$ m/s^2, apontando para baixo. A aceleração livre da componente gravitacional é, então,

$$\vec{A} = \vec{A}_0 + \mathbf{R}(q)^{\mathsf{T}}\, \vec{g}\,. \tag{2}$$

A convenção pode ser verificada no caso estático: com o sensor em repouso e nivelado, $\mathbf{R}(q) = \mathbf{I}$ e a leitura é $\{0 \;\; 0 \;\; +g\}^{\mathsf{T}}$, resultando em $\vec{A} = \vec{0}$. As duas equações são lineares na aceleração e comutam, mas a ordem de aplicação não é arbitrária: a transferência ao CM incide sobre a leitura ainda contendo a gravidade e a atitude é estimada a partir desse sinal — o que só é possível porque a gravidade ainda está presente, sendo ela a referência vertical de que o algoritmo de fusão necessita —, removendo-se a gravidade apenas em seguida.

2.2 Sensores MEMS e resolução do sistema

Os acelerômetros e giroscópios MEMS operam, respectivamente, pelo princípio massa-mola-amortecedor capacitivo e pela medição da força de Coriolis sobre uma massa de prova oscilante. Reúnem baixo custo, reduzido consumo, pequenas dimensões e boa resposta em baixas frequências, o que os torna atrativos para a análise de vibrações [7]. A faixa de interesse deste trabalho — até 500 Hz e amplitudes inferiores a 25 g — situa-se justamente no domínio de aplicação dos acelerômetros capacitivos, o que motivou a escolha desse princípio de transdução.

A digitalização dos sinais introduz o erro de quantização. Para um conversor analógico-digital (ADC) de $B+1$ bits e fundo de escala $2X_m$, o valor do bit menos significativo (LSB) é dado pela Equação (3), e a razão sinal-ruído de quantização cresce cerca de 6 dB por bit de resolução adicionado [9]:

$$\Delta = \frac{2X_m}{2^{B+1}} = \frac{X_m}{2^B}\,. \tag{3}$$

A aplicação da Equação (3) aos canais efetivamente empregados caracteriza quantitativamente o instrumento desenvolvido: $4{,}88 \times 10^{-4}$ g ($4{,}8 \times 10^{-3}$ m/s^2) para o acelerômetro de 16 bits em ± 16 g; $6{,}10 \times 10^{-2}$ °/s ($1{,}07 \times 10^{-3}$ rad/s) para o giroscópio de 16 bits em ± 2000 °/s; $1{,}53 \times 10^{-3}$ rad ($0{,}088°$) para o sensor de posição angular de 12 bits; e $4{,}88 \times 10^{-3}$ A para o canal de corrente, admitindo fundo de escala de ± 10 A e conversão de 12 bits.

3. Desenvolvimento

3.1 Arquitetura do sistema de aquisição

O sistema foi concebido em torno de um computador de placa única (*Single Board Computer*, SBC) Raspberry Pi 4, responsável pelo sequenciamento, armazenamento, processamento e visualização dos

dados. A comunicação com os sensores emprega o protocolo digital I^{2}C, escolhido em razão da simplicidade de cabeamento e do número reduzido de vias quando comparado ao SPI, mantendo taxa de transferência suficiente para a faixa de frequências de interesse. O conjunto de sensores é composto por duas IMUs LSM6DSO (acelerômetro e giroscópio triaxiais), um ADC ADS1015, um sensor magnético de posição angular de efeito Hall AS5600 — de 12 bits e período de amostragem de 150 µs — e um sensor de corrente de núcleo partido SCT013, totalizando o equivalente a 14 canais de aquisição.

A seleção do componente considerou os modelos de baixo custo mais difundidos — LSM6DSO, LSM6DS3, BMI160, MPU6050 e MPU9250 —, todos com conversão de 16 bits e fundo de escala de até $\pm$16 g. O LSM6DSO foi adotado por reunir a maior taxa de saída da comparação (6.664 Hz), simetria entre as taxas do acelerômetro e do giroscópio, disponibilidade das interfaces I^{2}C e SPI e custo unitário da ordem de US$ 15. Optou-se por uma IMU sem magnetômetro por duas razões: o escopo do trabalho não requer o posicionamento absoluto no espaço, mas apenas a oscilação em torno de uma posição de equilíbrio; e os intensos campos magnéticos do moto-compressor inviabilizariam a leitura do campo magnético terrestre.

Para minimizar erros de leitura associados ao ruído elétrico — especialmente crítico na comunicação digital, em que um único bit incorreto pode provocar grandes desvios — foi confeccionado um circuito simplificado contendo anéis de ferrite em cada linha, atuando como filtro passa-baixa, e um capacitor entre o terra e a alimentação de 3,3 V dos sensores, reduzindo flutuações de tensão. O cabeamento emprega cabos blindados com pares torcidos, mantendo um fio de cada par ligado ao terra do SBC, o que limita o aumento de capacitância nas vias e preserva a integridade da comunicação digital.

Para atingir a maior taxa de amostragem possível, adotou-se velocidade de *clock* do barramento de até 1,8 MHz e *overclock* do processador para até 2,175 GHz. Cabe registrar que esse valor excede o *fast mode* de 400 kHz especificado para a interface I^{2}C do LSM6DSO; a operação nessa frequência é possível porque os pinos SDA e SCL do componente são compartilhados com a interface MIPI I3C, especificada para taxas substancialmente mais elevadas, de modo que o barramento tolera o *clock* adotado ainda que fora da especificação nominal do modo I^{2}C. Trata-se, portanto, de operação fora de especificação, adotada após verificação empírica da integridade dos dados. A integridade da comunicação nessa condição é monitorada em tempo de aquisição: cada leitura de bloco do barramento é protegida por tratamento de exceção e, quando uma leitura falha, a ocorrência é registrada em *log* e a amostra correspondente é substituída pelo último valor válido do mesmo canal, preservando o alinhamento temporal do registro.

Nessa configuração, o sistema adquire até 1.666 amostras por segundo **por canal**, com os 14 canais ativos simultaneamente, o que corresponde a 1.666 varreduras completas do barramento por segundo. A frequência de Nyquist resultante é de 833 Hz e a banda analisada neste trabalho é de 0 a 500 Hz (Seção 4.2). Registre-se que a taxa de saída interna dos sensores inerciais é configurada em 6.664 Hz, quatro vezes superior à de varredura, e que o filtro anti-*aliasing* interno do componente é dimensionado em relação à taxa de saída, não à de varredura.

Cabe registrar que o sequenciamento das leituras é temporizado por software, e não por um relógio de amostragem dedicado: o laço aguarda o transcurso do período nominal antes de cada varredura, de modo que os intervalos efetivos são sempre iguais ou superiores a $1/f_s$, com dispersão associada à latência do barramento e ao escalonamento do sistema operacional. Como a base de tempo é reconstruída admitindo espaçamento uniforme, essa dispersão manifesta-se como alargamento das componentes espectrais e, caso a taxa média difira da nominal, como fator de escala no eixo de frequências. O efeito é aceitável na faixa de interesse, mas a amostragem sincronizada em *hardware* é o caminho natural para aplicações que exijam exatidão espectral.

3.2 Calibração dos sensores

A calibração é indispensável para a eliminação dos erros sistemáticos que, por razões econômicas, não são corrigidos de fábrica nos sensores de baixo custo [10]. Adotou-se integralmente o procedimento

estático/quase-estático publicado por Nogueira *et al.* [11], ao qual se remete o leitor para a formulação completa. Em síntese, o modelo de erro corrige tendência, sensibilidade e não-ortogonalidade dos três eixos [12]; os parâmetros do acelerômetro são obtidos posicionando-se sucessivamente cada eixo nos dois sentidos da gravidade e relacionando as seis leituras aos respectivos valores ideais de g por pseudoinversa; e os do giroscópio, a partir da integração da velocidade angular ao longo de rotações de π rad impostas pela geometria do gabarito impresso em 3D, em torno de cada eixo. O procedimento dispensa equipamento de laboratório — mesas rotativas instrumentadas ou plataformas controladas de seis eixos —, e as matrizes assim obtidas foram aplicadas aos sensores instalados no compressor.

3.3 Processamento e estimativa de atitude

A partir dos seis GDL medidos pela IMU, os parâmetros dinâmicos são transferidos para o centro de massa do corpo rígido pela Equação (1) e a componente gravitacional é removida pela Equação (2), nessa ordem. A integração e a derivação dos sinais são realizadas no domínio da frequência por meio da Transformada Discreta de Fourier (DFT) longa, assim denominada por ser aplicada ao registro inteiro em vez de a blocos janelados sucessivos [13]. Sendo $x(t)$ o sinal de entrada e $X(\omega) = \mathscr{F}\{x(t)\}$ a sua transformada, o sinal processado é obtido por

$$x_{\text{proc}}(t) = \mathscr{F}^{-1}\{H(\omega)\,X(\omega)\}\,, \tag{4}$$

em que o operador $H(\omega)$ assume uma das três formas da Equação (5), conforme se deseje derivar, integrar uma vez ou integrar duas vezes:

$$H_{\text{der}}(\omega) = \mathrm{j}\,\omega\,; \qquad H_{\text{int}}(\omega) = \frac{1}{\mathrm{j}\,\omega}\,, \quad \text{com } H(0) = 0\,. \tag{5}$$

A dupla integração — necessária para obter o deslocamento a partir da aceleração — é realizada por duas aplicações sucessivas de H_{int}, e não por um único operador $-1/\omega^2$; as duas formas são equivalentes exceto pelo fato de a componente de frequência zero ser anulada em cada passagem.

Quanto ao tratamento dos sinais: a DFT é calculada sobre o registro completo, sem janelamento nem sobreposição, não havendo ponderação espectral a compensar; a componente de frequência zero é anulada antes da divisão por $\mathrm{j}\,\omega$, o que evita a divisão por zero e remove o valor médio no próprio domínio da frequência. Não se aplica remoção de tendência polinomial nem filtragem passa-alta após a reconstrução, de modo que o ruído de baixa frequência permanece amplificado por $1/\omega$ a cada integração — mecanismo responsável pelos desvios das curvas de deslocamento da Seção 4.4. Tampouco se descartam trechos do registro: como a DFT pressupõe periodicidade, as componentes cujo número de períodos no registro não é inteiro sofrem vazamento espectral, cujo desvio se distribui ao longo de todo o sinal reconstruído, e não apenas em suas extremidades.

A estimativa da atitude, necessária à Equação (2), é obtida por um algoritmo de fusão de sensores dos empregados em sistemas de referência de atitude e direção (*Attitude and Heading Reference Systems*, AHRS). Entre as alternativas usuais — filtro de Kalman, filtro de Madgwick, filtro de Mahony e filtro complementar — adotou-se o filtro de Mahony [14], seguindo o estudo comparativo de Harindranath e Arora [15], que o identifica como o de melhor compromisso entre acurácia da orientação, robustez ao ruído e custo computacional em condições gerais de operação. Esse compromisso é determinante aqui, uma vez que o processamento ocorre no próprio SBC e os sinais de entrada provêm de sensores MEMS de baixo custo. A implementação empregou a biblioteca *AHRS* em *Python* [16].

O filtro de Mahony foi configurado com ganho proporcional $k_P = 1{,}0$ e ganho integral $k_I = 0{,}3$, operando à mesma frequência de atualização da aquisição, 1.666 Hz, sem decimação. O quatérnio inicial q_0 foi obtido diretamente da primeira amostra de aceleração já transferida ao CM, pela conversão do vetor aceleração em atitude, o que equivale a admitir que o corpo se encontra em repouso no instante inicial do

registro.

Todo o controle dos sensores, aquisição, processamento e visualização foi implementado em *Python*, com interface gráfica em PyQt5 organizada em abas para a aquisição, a calibração dos sensores, a visualização nos domínios do tempo e da frequência e a transformação de coordenadas. O código foi disponibilizado publicamente sob licença MIT [17]. Cabe a ressalva de que apenas o software é aberto e gratuito: os componentes físicos possuem custo, ainda que reduzido frente ao de sistemas comerciais equivalentes.

4. Resultados e discussão

4.1 Instrumentação do compressor

O sistema foi instalado em um compressor hermético alternativo típico. As IMUs tiveram ímãs fixados à face inferior do circuito impresso e foram encapsuladas em resina epóxi para proteção contra choques mecânicos e altas temperaturas no interior da carcaça. Uma IMU foi posicionada no bloco do moto-compressor (conjunto interno suspenso) e outra na placa base da carcaça, entre os isoladores. O sensor de posição angular foi mantido sobre o rotor por meio de peça impressa em 3D, tendo um ímã colado aos contrapesos como fonte de campo magnético. A Figura 1(b) mostra a localização dos sensores no compressor.

Os quatro condutores de cada IMU (alimentação, terra, SDA e SCL) compartilham uma única passagem na carcaça. O arranjo proposto para essa passagem é detalhado na Figura 1(a): o condutor é decapado no trecho que atravessa o furo, de modo que a alma metálica fique diretamente envolvida pelo adesivo estrutural; mantém-se uma folga mínima entre a alma decapada e a parede de aço, assegurando o isolamento elétrico; e o adesivo preenche o furo e forma bolsas nas duas faces da carcaça, cumprindo simultaneamente as funções de vedação e de fixação mecânica do condutor. A remoção da isolação no trecho central é o que permite ao adesivo aderir ao metal em toda a volta, eliminando o caminho de fuga que existiria ao longo da interface entre a isolação polimérica e o adesivo.

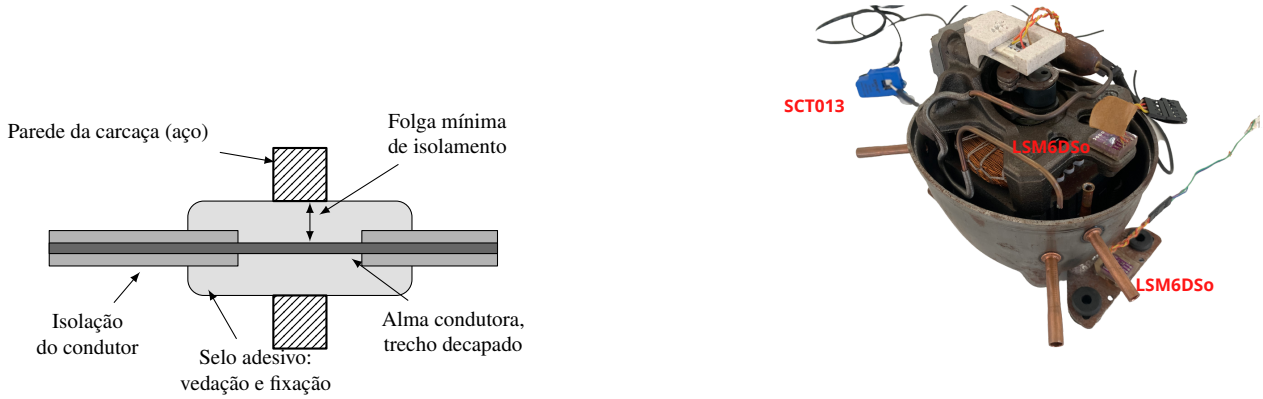
Trata-se, contudo, de um arranjo **proposto e não executado**: nos ensaios a carcaça permaneceu aberta, o selo não foi confeccionado e o compressor operou **sem ciclo de refrigeração ativo**, em razão da incompatibilidade das unidades disponíveis com a bancada de simulação de ciclo. A qualificação do selo — estanqueidade sob pressão, resistência térmica e compatibilidade química com o fluido refrigerante e o óleo — permanece fora do escopo deste trabalho, e os resultados a seguir devem ser lidos sob essa condição. O que se pode afirmar é que a instrumentação proposta reduz o número e a dimensão das passagens necessárias em relação à instrumentação piezoelétrica convencional, tornando o problema de vedação menos severo.

4.2 Validação dos sensores

O sistema de referência é um acelerômetro piezoelétrico triaxial Brüel & Kjær 4535-B (DeltaTron, 4 mA), com sensibilidades de 1,010, 0,9651 e 0,9544 mV/(m/s^2) nos eixos x, y e z, aferidas a 159,2 Hz e 20 m/s^2 RMS, faixa de amplitude ($\pm$10%) de 0,3 Hz a 10 kHz e sensibilidade transversal inferior a 5%. O condicionamento e a aquisição foram realizados por um sistema Simcenter SCADAS Mobile V8E, a 52 kHz, sem filtragem digital adicional. Os sinais da IMU e da referência foram adquiridos simultaneamente e alinhados pelo instante do impacto.

A validação dos acelerômetros foi conduzida em uma viga engastada excitada por martelo de impacto, comparando-se os sinais do sensor piezoelétrico e do acelerômetro MEMS nos domínios do tempo e da frequência. Em seguida, comparou-se a *aceleração total* estimada em um ponto P de um corpo rígido pelos dois sistemas — entendida como a aceleração absoluta de P, obtida da IMU pela soma da aceleração de translação do ponto de medição com as parcelas centrípeta e tangencial devidas à rotação, conforme a Equação (6), e comparada à leitura direta do piezoelétrico em P.

Na faixa de 0 a 400 Hz a IMU reproduz a estrutura modal identificada pela referência (Figura 2(a)): as



(a) Arranjo proposto para a passagem dos condutores.

(b) Localização dos sensores no compressor.

Figura 1: Instrumentação do compressor: (a) detalhe esquemático, sem escala, do arranjo proposto para a passagem dos condutores, em que o trecho decapado é envolvido pelo adesivo estrutural que preenche o furo e forma bolsas nas duas faces; (b) localização dos sensores instalados na unidade.

frequências dos picos coincidem e as amplitudes situam-se na mesma ordem de grandeza. Observam-se, contudo, diferenças relevantes de amplitude em picos individuais e discrepância crescente com a frequência, de modo que a concordância é adequada à identificação de componentes espectrais e à estimativa de ordens de grandeza, mas não configura equivalência metrológica. Acima de 400 Hz há decréscimo gradual da amplitude, atribuído ao filtro passa-baixa interno do sensor. O maior nível de ruído de fundo dos sensores MEMS, da ordem de 20 dB abaixo dos picos das harmônicas de 60 Hz acima de 500 Hz, motiva a filtragem dos sinais nessa faixa no pós-processamento.

Ressalve-se que a comparação é relativa: não foi elaborado orçamento de incerteza nem quantificada a repetibilidade entre montagens, e as diferenças observadas agregam, de forma indistinguível, resíduos de calibração, dispersão da base de tempo, ruído dos sensores e diferenças de fixação entre os transdutores. A caracterização metrológica formal permanece como etapa necessária à utilização do sistema em medições de acurácia declarada.

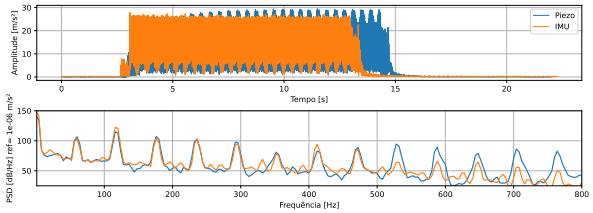
Nas Figuras 2 e 4 as curvas no domínio da frequência correspondem à densidade espectral de potência (*Power Spectral Density*, PSD) unilateral, estimada pelo método de Welch com janela de Hann de 416 amostras ($f_s/4$), sobreposição de 50% e sem remoção de tendência, com resolução de aproximadamente 4 Hz, em $(\mathrm{m/s^2})^2/\mathrm{Hz}$ para a aceleração e unidades análogas para as demais grandezas. A ordenada é apresentada como $20\log_{10}(S_{xx}/S_{\mathrm{ref}})$, com $S_{\mathrm{ref}} = 1$ na unidade correspondente — escala que difere por um fator de dois da convenção $10\log_{10}$ usual para grandezas de potência, à qual se referem as diferenças em decibéis citadas no texto.

Como a estimativa do movimento de corpo rígido depende igualmente do giroscópio, este foi validado em um dispositivo pivotado, com a IMU no centro de rotação e os acelerômetros piezoelétricos de referência fixados a uma distância $r = 50$ mm do eixo. A velocidade angular medida pela IMU é convertida em aceleração no ponto de referência somando-se as parcelas tangencial e centrípeta, Equação (6), em que $\vec{a}_o$ é a aceleração de translação do ponto de pivô:

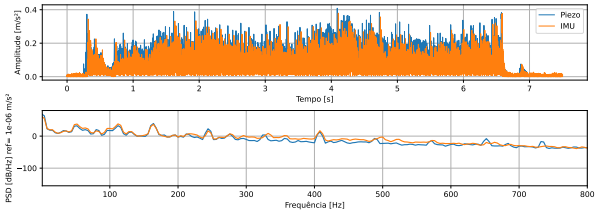
$$\vec{a}_p = \vec{a}_o + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}. \tag{6}$$

Diversos movimentos angulares foram impostos ao dispositivo. A Figura 2(b) apresenta uma das comparações obtidas: a aceleração reconstruída a partir do giroscópio acompanha a medição piezoelétrica

na faixa de interesse, com as mesmas ressalvas de amplitude apontadas para o acelerômetro. O resultado indica que os dois canais da IMU — e não apenas o acelerômetro — contribuem de forma consistente para a estimativa de corpo rígido.



(a) Acelerômetro.



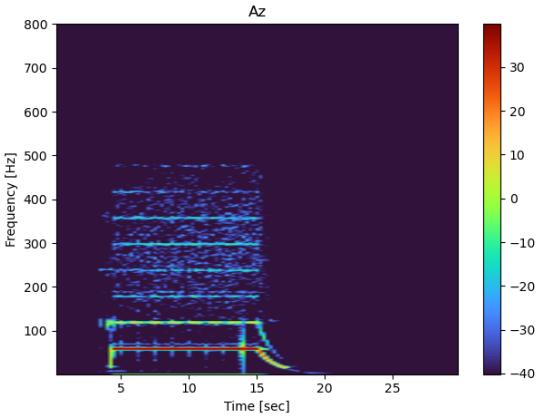
(b) Giroscópio.

Figura 2: Validação contra o sistema de referência: (a) aceleração total (definida na Seção 4.2) medida pelo acelerômetro piezoelétrico e pela IMU; (b) aceleração no ponto de referência obtida por conversão da velocidade angular da IMU, comparada à medição piezoelétrica. Curvas espectrais em PSD unilateral, em $(\mathrm{m/s^2})^2/\mathrm{Hz}$.

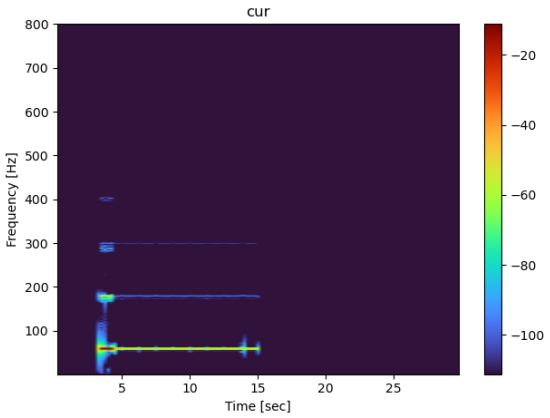
4.3 Sinais adquiridos e representação tempo-frequência

Os dados foram coletados em um ciclo de partida, regime estacionário e parada do motor, com o comportamento transiente característico esperado nos instantes de partida e de parada. A representação em espectrograma permite compreender o comportamento simultaneamente nos domínios do tempo e da frequência. A Figura 3 reúne o espectrograma de um dos sinais de aceleração do conjunto interno e o do sinal de corrente elétrica de alimentação. Em ambos observa-se nitidamente a frequência de 60 Hz e suas harmônicas ao longo do regime de operação, coerentes com o funcionamento de um motor alimentado pela frequência da rede de distribuição.

Essa coerência, entretanto, não basta para atribuir a componente de 60 Hz exclusivamente à excitação mecânica do moto-compressor: a mesma frequência é a da rede elétrica e constitui o candidato mais provável a captação eletromagnética nas linhas de comunicação digital, tanto mais num sistema de baixo custo junto a um motor de indução. Sua presença simultânea nos canais inercial e de corrente é compatível com ambas as hipóteses. A discriminação exigiria um ensaio de controle — aquisição com o circuito energizado e o rotor travado, ou verificação da persistência da componente durante a desaceleração inercial que se segue ao corte da alimentação —, não realizado neste trabalho. A atribuição à origem mecânica deve, portanto, ser tomada como plausível e não como demonstrada.



(a) Aceleração do conjunto interno.

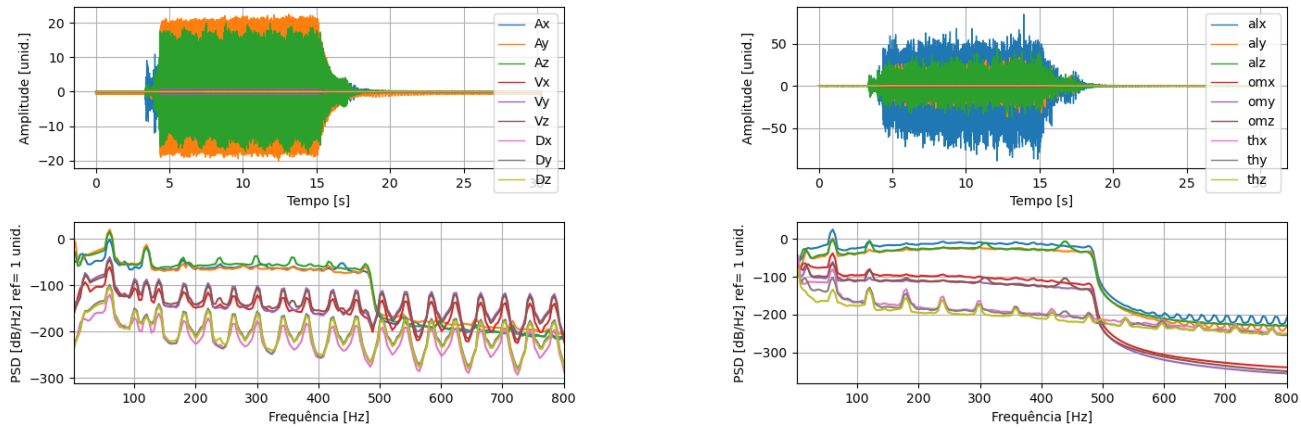


(b) Corrente de alimentação.

Figura 3: Espectrogramas dos sinais adquiridos, evidenciando a frequência de 60 Hz e suas harmônicas.

4.4 Movimento de corpo rígido no centro de massa

Aplicadas as Equações (1) e (2) aos sinais calibrados e filtrados acima de 500 Hz, e realizadas a integração e a derivação pela Equação (4), obtêm-se as seis dimensões do movimento do conjunto interno referidas ao seu centro de massa. A Figura 4 apresenta os deslocamentos, velocidades e acelerações lineares e angulares resultantes, que constituem o produto final da cadeia de instrumentação proposta.



(a) Dimensões lineares.

(b) Dimensões angulares.

Figura 4: Movimento de corpo rígido do conjunto interno transferido para o centro de massa. Curvas espectrais em PSD unilateral; unidades de aceleração em $(\mathrm{m/s^2})^2/\mathrm{Hz}$, de velocidade em $(\mathrm{m/s})^2/\mathrm{Hz}$ e de deslocamento em m^2/Hz (análogas para as grandezas angulares).

A Figura 4(a) fornece ainda a verificação experimental da remoção da gravidade: as três acelerações lineares no centro de massa apresentam-se centradas em zero ao longo de todo o registro, inclusive nos intervalos de repouso que antecedem a partida e sucedem a parada. Caso a atitude estimada ou a convenção de sinal da Equação (2) estivessem incorretas, o eixo alinhado à vertical exibiria desvio permanente da ordem de 9,8 $\mathrm{m/s^2}$, o que não se observa. A verificação é qualitativa: evidencia a ausência de erro grosseiro de convenção, sinal ou referencial, sem quantificar o resíduo.

Cabe registrar uma limitação do procedimento de integração no domínio da frequência: o operador H_{int} amplifica o ruído proporcionalmente a $1/\omega$, de modo que as componentes de baixa frequência dominam progressivamente a velocidade e, sobretudo, o deslocamento — efeito visível nas curvas da Figura 4. Como o processamento implementado não aplica filtragem passa-alta nem remoção de tendência após a reconstrução, as curvas de deslocamento devem ser lidas como indicativas da ordem de grandeza e do conteúdo espectral do movimento, e não como medida absoluta de posição. A introdução de uma filtragem complementar após a integração é a correção natural e fica registrada como trabalho futuro.

4.5 Ciclo do moto-compressor

Com o auxílio dos sensores de corrente e de posição angular foi possível detalhar o comportamento transiente da partida do motor de indução monofásico. A Figura 5 evidencia o intervalo entre a energização da bobina principal e da bobina auxiliar — necessária para gerar o torque de partida, já que sob a ação isolada da bobina principal o torque resultante sobre o rotor em repouso é nulo —, a corrente elevada requerida para vencer a inércia e o atrito estático durante o transiente e a posterior estabilização no regime nominal.

A partida do compressor é comandada manualmente, por meio de uma bancada com dois interruptores independentes, ligados respectivamente à bobina principal e à bobina auxiliar, acionados em sequência pelo operador. A ordem dos eventos é, portanto, imposta pelo procedimento, e não inferida dos sinais. Os

instantes correspondentes foram localizados nos degraus de amplitude que cada acionamento produz na corrente de alimentação: as linhas verticais tracejadas da Figura 5 assinalam, da esquerda para a direita, a energização da bobina principal, a energização da bobina auxiliar e o início do regime nominal. Não houve registro independente do instante de comutação dos interruptores, de modo que a incerteza na localização desses instantes é da ordem do período de amostragem.

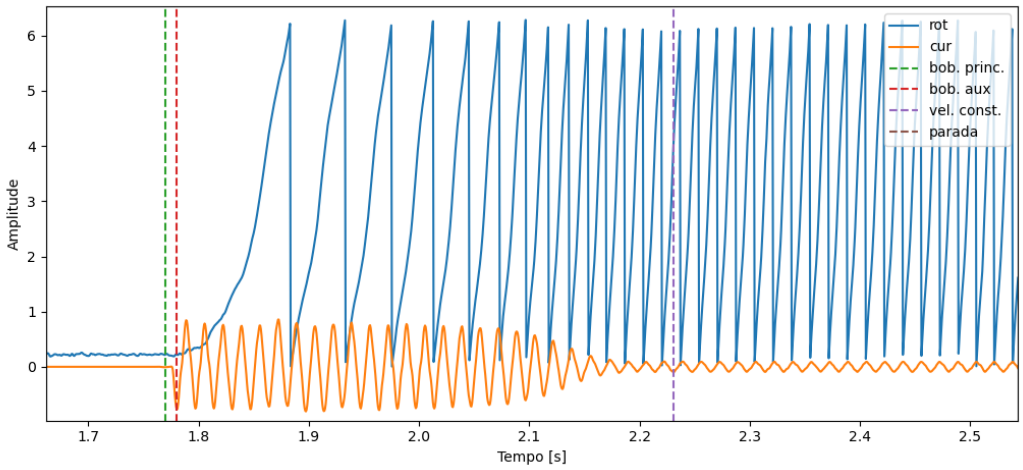


Figura 5: Transiente de partida do moto-compressor a partir dos sinais de corrente e de posição angular do rotor. Eixo horizontal: tempo, em s. Eixos verticais: corrente de alimentação, em A, e posição angular do rotor desdobrada (*unwrap*), em rad. As linhas verticais tracejadas assinalam a energização da bobina principal, a energização da bobina auxiliar e o início do regime nominal.

Os resultados revelam-se coerentes e com valores aceitáveis para a aplicação proposta, e as componentes de frequência de interesse são identificadas de forma clara. Note-se, porém, que todos os ensaios foram conduzidos com a unidade em condição nominal de funcionamento: não foram realizados ensaios com falhas induzidas, desgaste acelerado ou degradação progressiva. Portanto, o que este trabalho demonstra é a **capacidade de medir** grandezas reconhecidamente sensíveis à condição da máquina — corrente, posição angular e vibração do conjunto suspenso — e não a capacidade de **detectar** falhas. O uso do sistema para monitoramento de integridade ou manutenção preditiva permanece uma perspectiva de aplicação, condicionada a uma campanha experimental com estados de falha conhecidos.

5. Conclusões

O sistema desenvolvido atendeu aos objetivos propostos, permitindo a coleta de dados do comportamento vibratório de um compressor hermético típico, em bancada e sem ciclo de refrigeração ativo, e a estimativa do movimento de corpo rígido do conjunto suspenso e da carcaça. A calibração com gabarito impresso em 3D mostrou-se suficiente para corrigir tendência, escala e não-ortogonalidade sem recurso a equipamento de laboratório, e a comparação com sensores piezoelétricos indicou que, na faixa de 0 a 400 Hz, tanto os acelerômetros quanto os giroscópios reproduzem as componentes espectrais identificadas pelo sistema de referência, com diferenças de amplitude que restringem o uso a aplicações em que a identificação das frequências e a ordem de grandeza das amplitudes são suficientes. A combinação dos sinais de posição angular do rotor e de corrente elétrica mostrou-se de primária importância para a compreensão dos processos de partida e parada do motor.

O protocolo I^2C demonstrou-se apto, ainda que limitado a baixas e médias frequências de amostragem, a controlar e adquirir múltiplos sensores em um único barramento. Com quatro condutores por IMU, a instrumentação proposta reduz substancialmente o número e a dimensão das passagens necessárias na carcaça em relação à instrumentação piezoelétrica convencional, o que a torna uma via promissora para reduzir os riscos associados à instrumentação de unidades herméticas — vazamento de fluido refrigerante,

descaracterização da resistência à pressão interna e alteração do comportamento dinâmico. Cabe reiterar, contudo, que a restituição da hermeticidade após a instrumentação não foi implementada nem verificada neste trabalho, e que sua qualificação constitui etapa necessária antes de qualquer aplicação em unidade selada.

As características de sensibilidade, faixa de frequência e nível de ruído mostraram-se adequadas a aplicações para as quais sistemas comerciais de alta precisão seriam excessivamente robustos. O baixo custo do conjunto de sensores e a portabilidade, aliados à disponibilização do código sob licença aberta [17], tornam o sistema atrativo também para fins educacionais. Como trabalhos futuros destacam-se: o ensaio de controle que discrimine a origem mecânica da eletromagnética na componente de 60 Hz; a amostragem sincronizada em *hardware*; um orçamento de incerteza do sistema; a estimativa dos deslocamentos relativos entre conjunto interno e carcaça, que, combinada à geometria em CAD, permitiria calcular o envelope de deslocamentos como insumo à otimização topológica; a comparação experimental entre algoritmos de fusão; ensaios com estados de falha conhecidos; a qualificação de um passante hermético; e a validação direta contra simulação numérica.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Nidec Global Appliance, à CAPES, à EMBRAPII e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) da Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

1. DIAZ, Fernando Silva. Simulação do comportamento dinâmico do conjunto interno de compressores herméticos em baixas frequências. p. 134, 2017.

2. GERHOLD, C. H.; HAMILTON, J. F. Rigid body vibrations of compressors. p. 7, 1974.

3. PENAZZO, Simone. Dynamics study of the hermetic compressor. p. 11, 2018.

4. MARTIN, Peter G.; HALL, Gregory W.; CRANDALL, Jeff R.; PILKEY, Walter D. Measuring the acceleration of a rigid body. *Shock and Vibration*, v. 5, n. 4, p. 211–224, 1998. ISSN 1070-9622. doi: 10.1155/1998/134562.

5. KOENE, Ivar; KLAR, Ville; VIITALA, Raine. IoT connected device for vibration analysis and measurement. *HardwareX*, v. 7, p. e00109, 2020. doi: 10.1016/j.ohx.2020.e00109.

6. BARBOSA, Gabriel H. Cassel; VARANIS, Marcus; DELGADO, Kelven M. S.; OLIVEIRA, Clivaldo de. An acquisition system framework for mechanical measurements with Python, Raspberry-Pi and MEMS sensors. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, p. e20200167, 2020. ISSN 1806-9126. doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2020-0167.

7. VARANIS, Marcus; SILVA, Anderson; MERELES, Arthur; PEDERIVA, Robson. MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: a comprehensive review with applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, n. 11, p. 527, 2018. ISSN 1678-5878. doi: 10.1007/s40430-018-1445-5.

8. SHABANA, Ahmed A. *Dynamics of Multibody Systems*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.

9. OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. *Discrete-Time Signal Processing*. 3. ed. Harlow: Pearson, 2014. ISBN 978-1-292-02572-8.

10. FONG, W. T.; ONG, S. K.; NEE, A. Y. C. Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment. *Measurement Science and Technology*, v. 19, n. 8, p. 085202, 2008. ISSN 0957-0233. doi: 10.1088/0957-0233/19/8/085202.

11. NOGUEIRA, Leonardo Maia; BRUM, Rodrigo; MENDES, Paulo J. C.; RIZZATTI, Rafael S.; LENZI, Arcanjo. Calibration of low cost inertial measurement units without laboratory equipment. In: *12º Congresso Iberoamericano de Acústica / XXIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica (FIA 2020/22)*. Florianópolis, Brasil: [s.n.], 2022.

12. MADGWICK, Sebastian O. H.; HARRISON, Andrew J. L.; SHARKEY, Paul M.; VAIDYANATHAN, Ravi; HARWIN, William S. Measuring motion with kinematically redundant accelerometer arrays: theory, simulation and implementation. *Mechatronics*, v. 23, n. 5, p. 518–529, 2013. ISSN 0957-4158. doi: 10.1016/j.mechatronics.2013.04.003.

13. BRANDT, Anders; BRINCKER, Rune. Integrating time signals in frequency domain – comparison with time domain integration. *Measurement*, v. 58, p. 511–519, 2014. ISSN 0263-2241. doi: 10.1016/j.measurement.2014.09.004.

14. MAHONY, R.; HAMEL, T.; PFLIMLIN, J.-M. Complementary filter design on the special orthogonal group SO(3). In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. Seville, Spain: IEEE, 2005. p. 1477–1484. doi: 10.1109/CDC.2005.1582367.

15. HARINDRANATH, Aparna; ARORA, Manish. MEMS IMU sensor orientation algorithms - comparison in a simulation environment. In: *2018 International Conference on Networking, Embedded and Wireless Systems (ICNEWS)*. Bangalore, India: IEEE, 2018. p. 1–6. doi: 10.1109/ICNEWS.2018.8904029.

16. GARCIA, Mario. *AHRS: Attitude and Heading Reference Systems — biblioteca em Python*. 2019. https://github.com/Mayitzin/ahrs. Licença MIT.

17. NOGUEIRA, Leonardo Maia. *Generic Open-source Recorder for Data Acquisition and Time-frequency Analysis*. 2022. https://github.com/nogleo/gordata. Licença MIT.