



FINGERPRINTING ULTRASSÔNICO POR CHIRP E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: PROVA DE CONCEITO PARA DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES EM ÓLEOS LUBRIFICANTES AUTOMOTIVOS

Fernanda P.P. Carvalho¹; Mylena K.M. Assis¹; Alex J. Teixeira¹; Íris T. Chacon²; Rodrigo P.B. Costa-Félix¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Metrologia e Tecnologia (PPGMT) / Inmetro

² Diretoria de Metrologia Legal (Dimel) / Inmetro
fernandapellegrini31@gmail.com

Palavras-Chave: metrologia, ultrassom, quimiometria.

Introdução

Óleos lubrificantes automotivos acabados são matrizes complexas constituídas por óleos básicos e pacotes de aditivos destinados a controlar propriedades como viscosidade, detergência, dispersância, proteção antidesgaste e estabilidade oxidativa. Alterações na composição podem modificar as propriedades físico-químicas do fluido e, consequentemente, sua interação com ondas ultrassônicas. Métodos ultrassônicos são atrativos por serem não destrutivos e por possibilitarem a aquisição rápida. Em particular, sinais do tipo chirp realizam uma varredura contínua de frequências, fornecendo uma resposta espectral mais ampla do que a de excitações de frequência única. Além disso, sinais modulados em frequência podem ser empregados para caracterizar a resposta em frequência de sistemas ultrassônicos em uma faixa mais ampla, permitindo explorar informações espectrais que seriam obtidas de forma mais limitada com excitações convencionais (Costa-Félix; Machado, 2015). Manfredi *et al.* (2019) demonstraram que o *continuously repeated chirp* (CRC), aplicado a óleos padrão, produz uma resposta dependente das propriedades do líquido e que uma camada de casamento acústico pode ampliar a sensibilidade da medição da viscosidade. Trabalhos desenvolvidos no Inmetro também mostram que parâmetros ultrassônicos são sensíveis a mudanças na composição de combustíveis e biocombustíveis (Figueiredo *et al.*, 2012; Costa-Félix; Figueiredo; Alvarenga, 2018). Nesse contexto, *fingerprints* acústicos multivariados podem ser associados a métodos quimiométricos e de inteligência artificial para reconhecer padrões e identificar amostras incompatíveis com uma população de referência. O objetivo deste estudo foi avaliar, a partir de dados brutos de calibração do CRC, se a resposta espectral contém informação suficiente para discriminar óleos padrão com diferentes viscosidades, como prova de conceito para o desenvolvimento posterior de métodos de triagem de alterações não conformes em lubrificantes automotivos.

Material e Métodos

Foram analisados dois conjuntos de dados brutos obtidos pelo método CRC, com e sem camada de casamento acústico (*matching layer*, ML). Cada conjunto contém cinco óleos padrão (S3, S20, S60, S200 e S600), com viscosidades informadas de 3,57; 28,03; 103,23; 348,67 e 1058,3 mPa·s, respectivamente, e cinco pares de arquivos de medição e referência por óleo. No estudo de origem, os sinais foram adquiridos em arranjo *pitch-catch*, com transdutores de cisalhamento de 5 MHz acoplados a uma placa de alumínio, chirp de 0,5 a 9,5 MHz, Gerador de Formas de Onda Arbitrárias (AWG), recepção por osciloscópio USB PicoScope 5000a e aquisição em LabVIEW (Manfredi *et al.*, 2019).

Os sinais brutos foram disponibilizados no domínio do tempo, com intervalo de amostragem de 32 ns. Após a remoção da média de cada coluna, calcularam-se as Transformadas Rápidas de Fourier (FFT, sigla em inglês). Para cada arquivo, as magnitudes espectrais das colunas foram então promediadas separadamente para medição e referência. Para cada par, definiu-se: $S(f) = |M(f)|/|R(f)|$ e $S_{dB}(f) = 20\log_{10}[S(f)]$.

Para reduzir a dimensionalidade, os valores foram agrupados em 180 bandas de frequência, cada uma com largura de 50 kHz, abrangendo o intervalo de 0,5 a 9,5 MHz. Para cada banda, calculou-se a média aritmética. Os descritores foram padronizados e submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA, sigla em inglês), com retenção de quatro componentes principais, seguida de classificação por Análise Discriminante Linear (LDA, sigla em inglês). O desempenho foi avaliado por validação cruzada *leave-one-out*. A agregação das colunas antes da extração dos descritores resultou em um vetor por par medição/referência e 25 casos por condição. Como não foram utilizados conjunto externo nem óleos deliberadamente adulterados, a classificação foi restrita à discriminação interna das cinco classes de óleo, com diferentes viscosidades conhecidas, sem avaliar a capacidade do método de detectar adulterações. Os dados correspondem ao material suplementar associado a Manfredi *et al.* (2019).

Resultados e Discussão

Os espectros CRC apresentaram diferenças sistemáticas entre os cinco padrões de viscosidade nas duas configurações avaliadas. A técnica foi avaliada com a adição de uma camada de adaptação, uma condição conhecida como ML, PC1 explicou 52,0% da variância e PC2 6,2%, totalizando 58,1%. Sem ML, PC1 e PC2 explicaram 31,4% e 8,3%, respectivamente, totalizando 39,7%. Em ambos os conjuntos, os escores mostraram separação entre os grupos S3, S20, S60, S200 e S600, com organização progressiva principalmente ao longo de PC1. Na condição com ML, a dispersão entre as cinco medições de cada padrão foi menor do que a separação observada entre os grupos. A maior concentração de variância nas primeiras componentes com ML é coerente com o aumento de sensibilidade descrito por Manfredi *et al.* (2019). No estudo de referência, a calibração CRC da viscosidade apresentou $R^2=0,960$ sem ML e $R^2=0,999$ com ML, e a camada aumentou a faixa de resposta do parâmetro acústico utilizado em aproximadamente 13 vezes. Na classificação exploratória, a *pipeline* PCA–LDA discriminou corretamente os 25 casos de cada condição na validação cruzada interna *leave-one-out*. Esse resultado demonstra apenas a separabilidade entre os cinco padrões da base. Não representa sensibilidade, especificidade ou acurácia na detecção de alterações não conformes. Não há amostras de óleo automotivo acabado submetidas a alterações controladas, lotes comerciais independentes ou identificação química dos aditivos. Portanto, não é possível afirmar que o modelo detecte adulteração, reconheça determinado aditivo ou generalize para produtos comerciais. A interpretação adequada é que o CRC fornece um *fingerprint* acústico capaz de registrar diferenças entre líquidos com propriedades distintas, e que essa resposta pode ser explorada por meio de análise multivariada. O próximo experimento deverá comparar lotes independentes de uma mesma formulação de referência com amostras derivadas desses lotes e submetidas a alterações controladas, mantendo a separação entre treinamento e teste no nível do lote ou da amostra física e utilizando métodos químicos ou físico-químicos ortogonais. Durante a auditoria dos arquivos, observou-se uma inconsistência documental: os *ReadMe* indicam arquivos com três a quatro colunas e exemplificam um vetor temporal de até 10 ms, enquanto os CSV fornecidos apresentam predominantemente quatro colunas, três arquivos com ML apresentam cinco colunas e cada arquivo contém 208.333 amostras. Com o intervalo declarado de 32 ns, essa quantidade corresponde a aproximadamente 6,67 ms. A discrepância não invalida a análise exploratória de separabilidade, mas deve ser esclarecida antes da reprodução quantitativa da calibração metrológica.

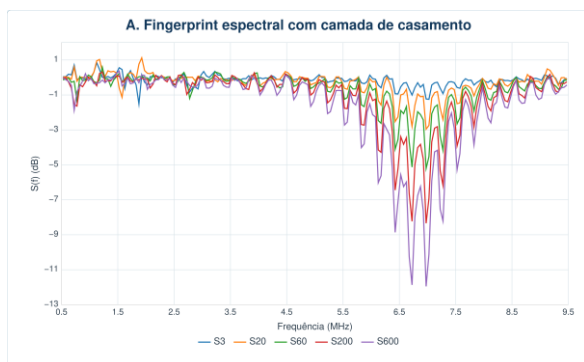


Figura 1. *Fingerprint* espectral médio dos cinco óleos padrão na configuração CRC com camada de casamento acústico (ML). Cada curva representa a média de cinco pares de medição/referência. Fonte: elaboração própria a partir dos dados brutos associados a Manfredi et al. (2019).

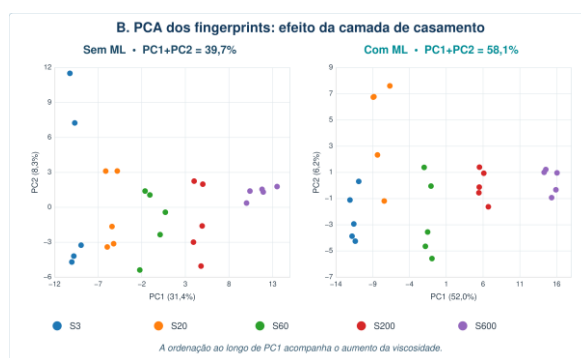


Figura 2. Escores de PCA dos *fingerprints* CRC sem e com ML. PC1+PC2 explicam 39,7% e 58,1% da variância, respectivamente ($n = 25$ por condição). Fonte: elaboração própria a partir dos dados brutos associados a Manfredi et al. (2019).

Conclusões

A reanálise demonstrou que a resposta espectral CRC contém informação multivariada suficiente para discriminar os cinco óleos padrão. Com ML, PC1+PC2 explicaram 58,1% da variância, frente a 39,7% sem ML, e a dispersão entre repetições permaneceu inferior à separação entre os grupos. A classificação interna PCA–LDA obteve 25/25 casos corretos em cada condição, constituindo uma prova de conceito para o uso de *fingerprints* acústicos associados à inteligência artificial. Entretanto, os dados não permitem concluir que alterações não conformes em óleos lubrificantes automotivos tenham sido detectados. A etapa seguinte deverá empregar diferentes lotes de uma mesma formulação automotiva, alterações controladas e um conjunto de teste independente, complementados por métodos analíticos ortogonais e avaliação de incerteza conforme o JCGM 100:2008. Nessa arquitetura, o ultrassom chirp pode ser investigado como um método rápido e não destrutivo para triagem de amostras cuja assinatura acústica seja incompatível com a população de referência.

Disponibilidade dos dados

Os conjuntos CRC, com e sem camada de casamento, analisados neste trabalho correspondem ao material suplementar associado a Manfredi *et al.* (2019).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Proc. 307.562/2020-4), à Faperj (Proc. E-26/204.027/2024) e à CAPES pela bolsa de doutorado e pelo apoio à pesquisa e formação acadêmica.

Referências

- COSTA-FELIX, R. P. B.; FIGUEIREDO, M. K. K.; ALVARENGA, A. V. An ultrasonic method to appraise diesel and biodiesel blends. *Fuel*, v. 227, p. 150–153, 2018. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.077.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008, 2008.
- COSTA-FELIX, R.; MACHADO, J. C. Output bandwidth enhancement of a pulsed ultrasound system using a flat envelope and compensated frequency-modulated input signal: Theory and experimental applications. *Measurement*, v. 69, p. 146–154, 2015. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.03.019.
- FIGUEIREDO, M. K. K. et al. Biofuel ethanol adulteration detection using an ultrasonic measurement method. *Fuel*, v. 91, p. 209–212, 2012. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.08.003.
- MANFREDI, O. F.; MILLS, R. S.; SCHIRRU, M. M.; DWYER-JOYCE, R. S. Non-invasive measurement of lubricating oil viscosity using an ultrasonic continuously repeated chirp shear wave. *Ultrasonics*, v. 94, p. 332–339, 2019. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.08.002.