TRL7 Tecnologia & Inovação
Engenharia de sistemas especializados

ENERGY ANALYZER

Resultados reais de análise elétrica e assinatura de processo

Compilação de aquisições RAW, análise ciclo a ciclo, conteúdo harmônico, tempo-frequência e assinatura mecânica observada em ensaio de fresamento.

Documento técnico-comercial
Setembro de 2026

energia.trl7.com.br

Abrir relatório

Resumo executivo

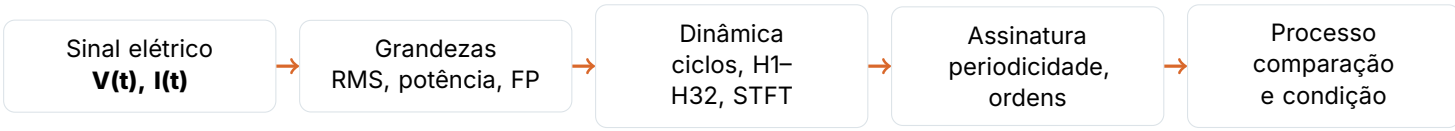
O **TRL7 Energy Analyzer** e uma plataforma de instrumentacao elétrica multicanal que preserva sinais de tensão e corrente em alta taxa de amostragem e os transforma em informação de engenharia. Os dois ensaios reunidos neste documento demonstram duas camadas complementares: **análise elétrica detalhada** e **extração da assinatura do processo**.

8 kS/s	0 gaps	6,75 Hz	~405 rpm
amostragem RAW	R00022 e R00061	periodicidade de processo	rotação equivalente

No R00022, uma aquisição de **10,000 s** com **80.002 frames** foi decomposta em grandezas por canal, **599 ciclos completos**, reconstrução harmonica H1–H32 e análise tempo-frequência. No R00061, uma captura de **30,001 s** com **240.007 frames** revelou uma componente mecânica dominante de aproximadamente **6,752 Hz**, equivalente a **405,1 rpm** no contexto conhecido de um ensaio programado a 400 rpm.

O resultado central não e apenas estimar rotação: e demonstrar que o sinal elétrico contém uma **assinatura repetível da carga mecânica**. Esse princípio e consistente com a literatura de monitoramento de usinagem por corrente e potência de motores [2, 3, 4].

Do sinal ao processo



Leitura integrada. A mesma aquisição pode sustentar diagnóstico elétrico, análise espectral e comparação de comportamento de máquina, preservando rastreabilidade até o RAW original.

R00022: profundidade da análise elétrica

ENSAIO ELÉTRICO

A captura R00022 possui **10,000 s**, taxa de **8.000 amostras/s**, **80.002 frames** e **zero lacunas** na janela processada. A frequência estimada da rede permaneceu em torno de **60,001–60,002 Hz**.

Resumo por canal - R00022

Canal	I1	I2	I3	V1	V2	V3
RMS	0,71177 A	0,70190 A	0,48595 A	132,48 V	152,74 V	136,06 V
f0	60,001	60,001	60,002	60,001	60,001	60,001
THD	136,8%	170,8%	84,88%	6,586%	5,133%	6,837%

A decomposição ciclo a ciclo encontrou **599 ciclos completos**, com frequência média de **60,00122 Hz**. A reconstrução H1–H32 usou referência de **60,001649 Hz**. Para as tensoes, o resíduo RMS do ajuste ficou abaixo de 0,2% na janela de 1 s analisada.

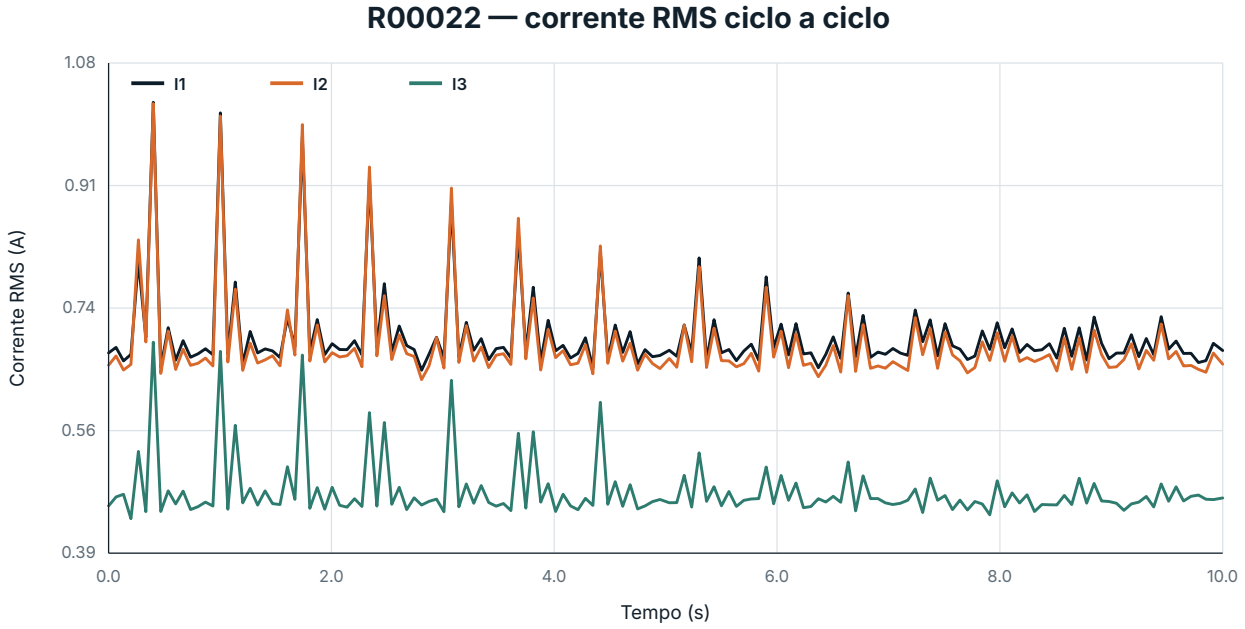


Figura 1 - R00022: correntes RMS ciclo a ciclo. Variações temporais permanecem visíveis em vez de serem reduzidas a uma única média global.

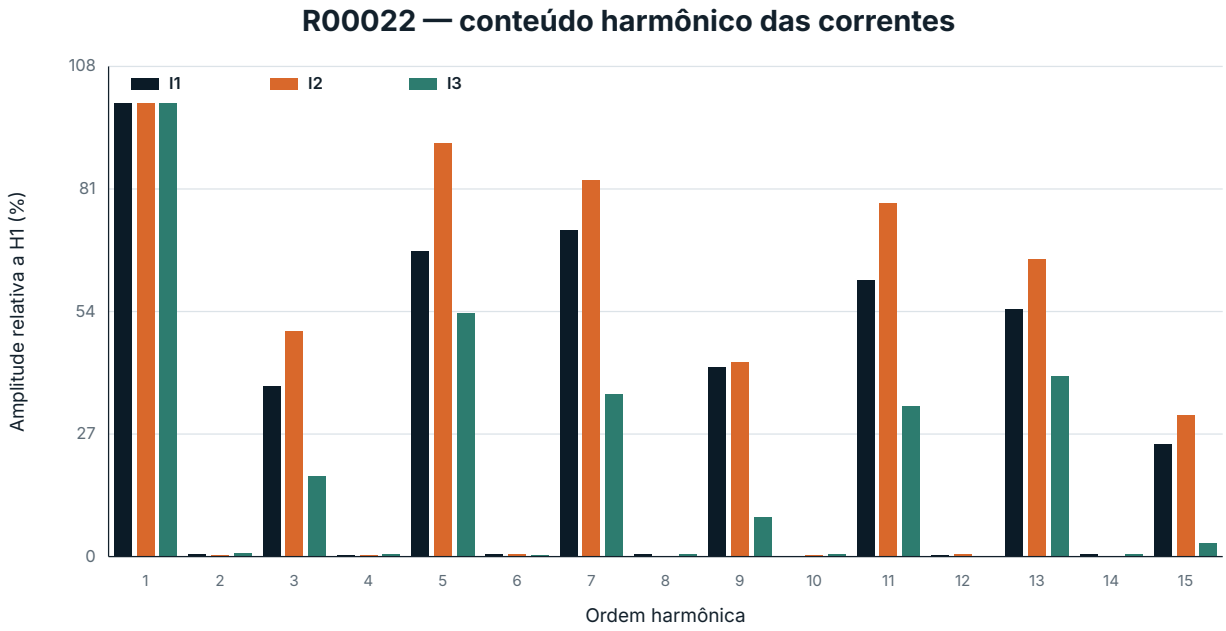


Figura 2 - R00022: conteúdo harmônico das correntes, organizado por ordem e por fase.

Tempo-frequência

A STFT foi calculada com janela de **0,250 s**, sobreposição de **75%**, resolução espectral de **3,9062 Hz** e **157 frames temporais**. Essa camada localiza no tempo o surgimento ou a mudança de componentes espectrais e complementa a leitura H1–H32.

Resultado. R00022 mostra que o equipamento não reduz a medicao a um valor de corrente ou potência: o mesmo RAW sustenta análise no dominio do tempo, por ciclo, por harmonicos e no plano tempo-frequência.

R00061: da corrente para a assinatura do processo

ENSAIO DE FRESAMENTO

R00061 foi registrado durante fresamento com **um inserto ativo** e rotação nominal de **400 rpm**. A captura possui **30,000875 s**, **8 kS/s**, **240.007 frames** e **zero lacunas**. A rede permaneceu próxima de 60 Hz.

A análise identificou uma periodicidade dominante de aproximadamente **6,752 Hz**. Com o contexto conhecido do ensaio, isso corresponde a uma rotação equivalente de aproximadamente **405,1 rpm**, cerca de **+1,29%** em relação ao valor nominal. O período correspondente e de aproximadamente **148,1 ms por volta**.

400 rpm	6,752 Hz	148,1 ms	1 evento/volta
programado	detectado	período por volta	padrão dominante

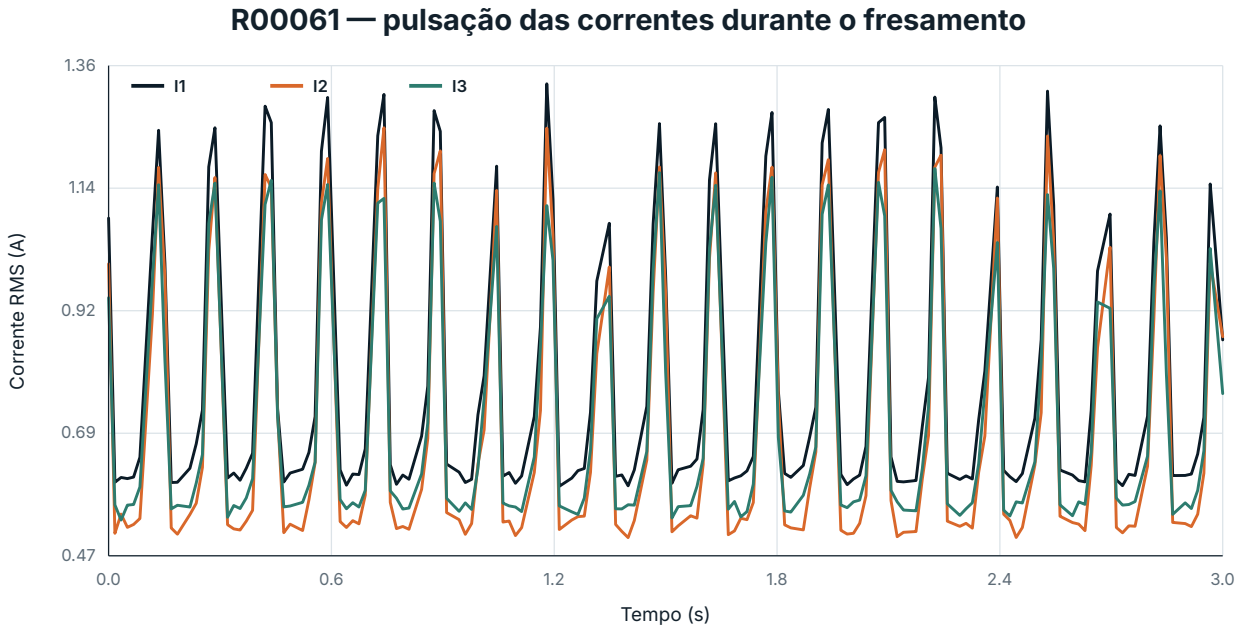


Figura 3 - R00061: pulsação das correntes RMS nas três fases. Os pulsos recorrentes reproduzem o ciclo de carga mecânica.

A carga do motor não e constante ao longo da volta. A repeticao dos picos permite organizar o processo em ciclos mecanicos comparáveis entre revoluções, ferramentas e parâmetros de corte.

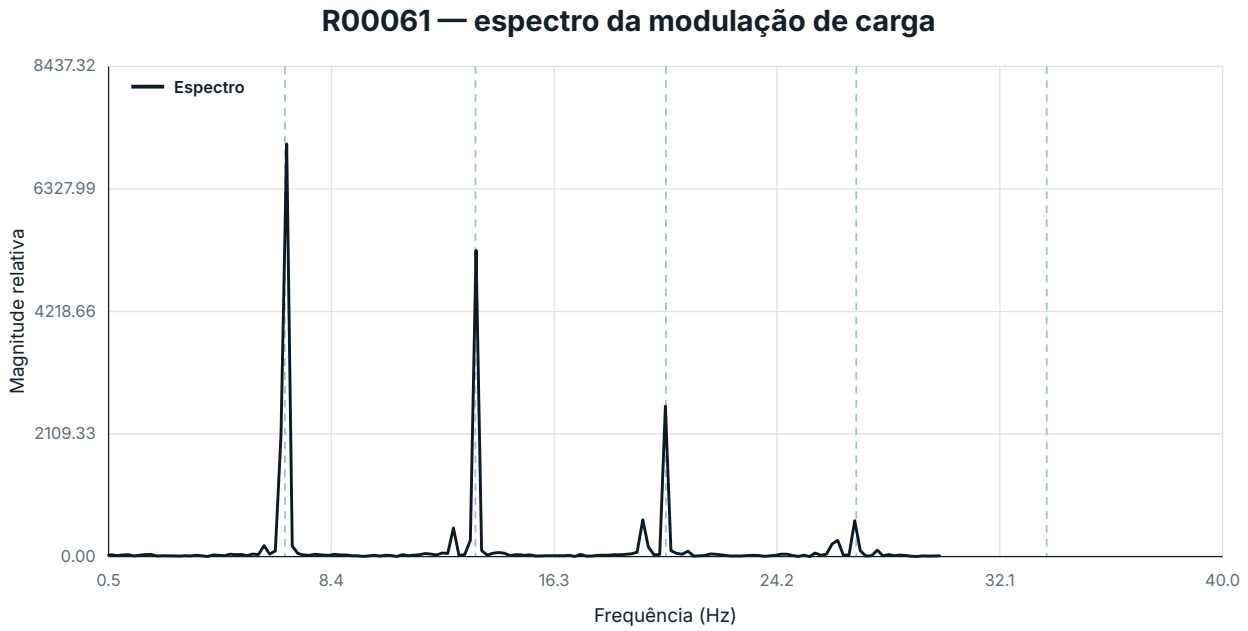


Figura 4 - R00061: espectro da modulacao de carga. A componente principal em aproximadamente 6,75 Hz e acompanhada por ordens sucessivas.

Ordens mecânicas observadas

Ordem	Frequencia	Leitura
1x	6,752 Hz	repeticao principal do ciclo mecanico
2x	13,505 Hz	segunda ordem da forma pulsada
3x	20,257 Hz	terceira ordem da assinatura
4x	27,009 Hz	quarta ordem
5x	33,762 Hz	quinta ordem

Também surgem bandas laterais proximas de **53,26 Hz** e **66,76 Hz**. A separação em relação a 60 Hz coincide com a periodicidade mecânica detectada, oferecendo uma segunda leitura coerente do mesmo fenômeno.

Leitura integrada e próximos passos

DO SINAL AO INDICADOR

Os dois ensaios demonstram capacidades complementares da mesma arquitetura.

Camada	R00022	R00061
Integridade RAW	10 s; 80.002 frames; 0 gaps	30,001 s; 240.007 frames; 0 gaps
Rede	~60,001 Hz	próxima de 60 Hz
Ciclo a ciclo	599 ciclos	repetibilidade na janela analisada
Harmônicos	H1–H32	H1–H32 e modulacao de processo
Tempo-frequência	STFT, 157 frames	STFT na janela detalhada
Processo	referência elétrica	6,752 Hz; ~405 rpm; 1 evento/volta

A literatura de monitoramento de usinagem trata corrente, potência, força, vibração e emissão acústica como fontes complementares de informação. Revisões amplas destacam processamento de sinais e correlação com estados reais do processo [2]. Estudos específicos mostram o uso de corrente e potência de motores para acompanhar condição de ferramenta e detectar alterações em fresamento [3, 4].

Cadeia de processamento

1. leitura do RAW preservado e verificacao de continuidade;
2. metricas por canal e frequência fundamental;
3. segmentação em ciclos e grandezas ciclo a ciclo;
4. reconstrução H1–H32;
5. STFT para localização temporal do conteúdo espectral;
6. periodicidade de processo, ordens e bandas laterais;
7. interpretação vinculada ao contexto conhecido do ensaio.

Para uma periodicidade mecânica validada por contexto:

$$n_{eq} = 60 f_{rot} \qquad \text{e} \qquad f_{sb} = f_{rede} \pm f_{rot}.$$

No R00061, $f_{rot} \approx 6{,}752$ Hz resulta em $n_{eq} \approx 405{,}1$ rpm e bandas laterais proximas de 53,26 Hz e 66,76 Hz.

> **Ponto central.** O Energy Analyzer transforma sinais elétricos preservados em uma base quantitativa para comparar comportamento de máquinas e processos. A mesma aquisição serve tanto para diagnóstico elétrico quanto para extração de dinâmica de processo.

Aplicações industriais em desenvolvimento

Ferramenta

- comparação nova/usada;
- assimetria entre insertos;
- tendencia de desgaste.
- entrada e saída de corte;
- comparação de receitas;

Processo

- classificação de estados.

Máquina

- assinatura de referência;
- mudanças ao longo do tempo;
- monitoramento remoto.

Pesquisa e P&D

- correlação com dinamômetro;
- order tracking;
- modelos com campanhas rotuladas.

As grandezas eletricas devem ser interpretadas de forma coerente com referências normativas como a IEEE 1459 [1]. Neste documento, valores absolutos de amplitude seguem a escala registrada nos arquivos analisados; as conclusoes de processo de R00061 se apoiam principalmente em frequência, periodicidade e repetibilidade.

Referências

Referências

[1] IEEE Standards Association. *IEEE Std 1459-2025: IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. IEEE, 2025.

[2] Teti, R.; Jemielniak, K.; O'Donnell, G.; Dornfeld, D. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(2), 717–739, 2010. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010.

[3] Bhattacharyya, P.; Sengupta, D.; Mukhopadhyay, S.; Chattopadhyay, A. B. On-line tool condition monitoring in face milling using current and power signals. *International Journal of Production Research*, 46(4), 1187–1201, 2008. DOI: 10.1080/00207540600940288.

[4] Li, X.; Ouyang, G.; Liang, Z. Complexity measure of motor current signals for tool flute breakage detection in end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(3–4), 371–379, 2008. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.09.008.

[5] TRL7 Tecnologia & Inovação. *Energy Analyzer - R00022.RAW: relatório local, análise por ciclos, reconstrução H1–H32 e STFT*. Dados experimentais internos, 2026.

[6] TRL7 Tecnologia & Inovação. *Energy Analyzer - R00061.RAW: relatório local e assinatura de processo em fresamento*. Dados experimentais internos, 2026.

Rastreabilidade. O PDF público e derivado de fontes versionadas no repositório TRL7. Os arquivos RAW originais permanecem preservados e os gráficos apresentados são produtos de análise dos ensaios indicados.

Quer medir a assinatura real de uma máquina ou processo?

A TRL7 pode estruturar a instrumentacao, a campanha e a análise para transformar corrente e tensão em indicadores do comportamento da operacao.

TRL7 Tecnologia & Inovação

contato@trl7.com.br
+55 64 98436-9497
+55 64 99948-4702
Goiás, Brasil

trl7.com.br/contato

Abrir contato da TRL7

energia.trl7.com.br/assets/docs/energy-analyzer-resultados-reais-2026-v2.pdf