

01 / O QUE A FÍSICA ACRESCENTA À PROPOSTA

O sensor começa no engrenamento.

Derivação técnica, orçamentos de dados e energia e critérios de validação para os nove TRLs.

O programa comercial permanece em **R\$ 3,1 milhões**: pesquisa de R\$ 300 mil, desenvolvimento de R\$ 2,2 milhões e industrialização de R\$ 600 mil. A trilha regulatória de terceiros continua separada. Este anexo explicita a engenharia necessária para sustentar o escopo; não constitui uma cotação de componentes nem demonstra, isoladamente, o valor comercial.

Rotação e dentes → banda → amostragem → dados
→ processamento embarcado → energia → cadência

BASE RELATADA VERSUS HIPÓTESES DE ESTUDO

Parâmetro	Origem e tratamento
1.740 rpm no motor	Relatado na reunião. Equivale a 29 Hz no eixo de entrada. Confirmar velocidade real, transmissão e variação de carga.
Energia em cerca de 90% das aplicações	Relato do cliente. Priorizar alimentação externa onde viável; variante a bateria para exceções. Não é medição de campo.
Pinhão de 20 a 40 dentes	Hipótese de estudo. O desenho da família escolhida precisa informar dentes e relação de cada estágio.
3ª harmônica; envelope até 10 ou 20 kHz	Janelas exploratórias de análise, a validar por modo de falha, ressonância, transdutor e montagem.
17 Ah; 64 B; correntes do orçamento	Premissas de cálculo expostas neste anexo, não especificação final ou desempenho medido.

Resultado de arquitetura

Duas rotas no mesmo produto: forma de onda e contexto para campanhas dos TRLs 3 a 7; FFT/envelope e indicadores no dispositivo para telemetria de operação. A alimentação externa é a referência nas aplicações que a suportem. A alternativa a bateria exige orçamento por fase e cadência coerente com o diagnóstico.

A prancha interativa mostra um espectro sintético e uma geometria conceitual. Seus controles recalculam as fórmulas; não representam ensaio, modelo validado ou previsão real de falha.

02 / DA ROTAÇÃO AO ESPECTRO

29 Hz no eixo. Até 3,48 kHz no estudo.

$$f_{\text{eixo}} = \text{rpm} / 60 = 1.740 / 60 = 29 \text{ Hz}$$

$$\text{GMF} = Z \times f_{\text{eixo}}$$

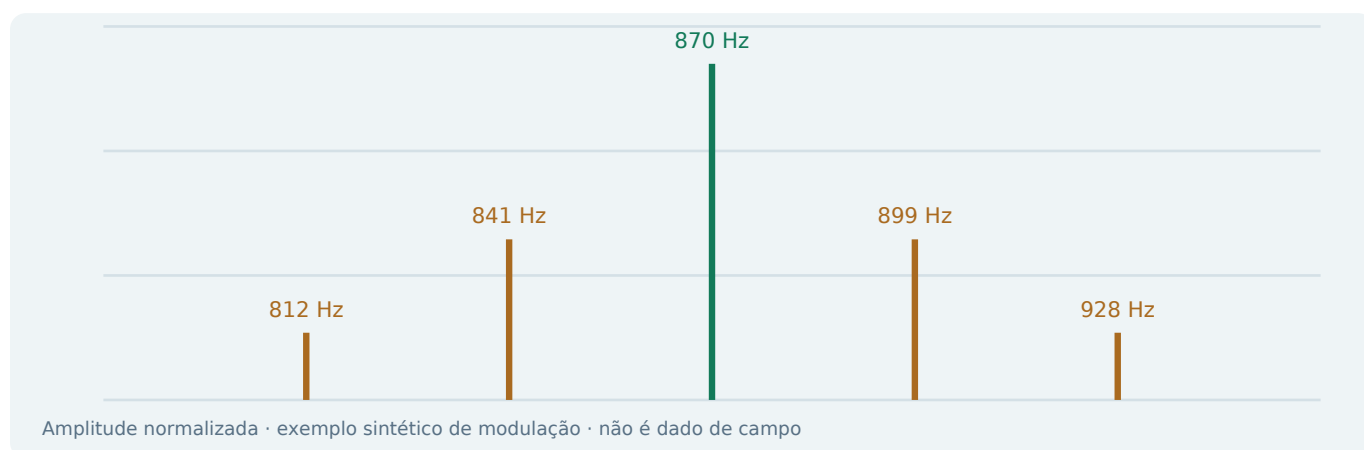
$$f_{\text{estudo}} = 3 \times \text{GMF}$$

Dentes do pinhão	GMF	3 × GMF	2,56 × banda
20	580 Hz	1.740 Hz	4.454,4 S/s
30	870 Hz	2.610 Hz	6.681,6 S/s
40	1.160 Hz	3.480 Hz	8.908,8 S/s

Para o caso de 40 dentes, 12,8 kS/s é uma escolha de estudo acima dos 8,91 kS/s calculados. O fator 2,56 reserva margem para filtragem antialias; a margem efetiva depende da cadeia de aquisição. A taxa de amostragem não corrige um sensor ou acoplamento com banda insuficiente.

O defeito pode modular o engrenamento

A fundamental, suas harmônicas e bandas laterais podem se alterar. Um evento ligado ao pinhão pode criar espaçamento de 29 Hz: no caso de 30 dentes, $870 \pm 29 \text{ Hz}$ resulta em 841 e 899 Hz. Três harmônicas são um ponto de partida, não uma obrigação universal; carga e montagem também influenciam o espectro.



Envelope: estudar uma banda portadora até 10 kHz leva a 25,6 kS/s; até 20 kHz, a 51,2 kS/s usando a mesma margem. O filtro e a demodulação extraem o envelope, cujo espectro revela periodicidades. Ressonâncias e frequências de defeito dependem do rolamento e do caminho mecânico.

Fontes: MathWorks - frequências de engrenamento e bandas laterais

NI - amostragem, banda útil e margem antialias

03 / ORÇAMENTO DE DADOS E MEMÓRIA

Campanha preserva sinal. Operação, escala.

$$25.600 \text{ amostras/s} \times 3 \text{ eixos} \times 16 \text{ bits} / 8 \\ = 153.600 \text{ B/s} = 153,6 \text{ kB/s} = 1,2288 \text{ Mbit/s}$$

Uma captura de 1 s ocupa 153,6 kB (150 KiB), antes de cabeçalhos e compressão. A 51,2 kS/s, o volume dobra. Microfone, referência de rotação e outros canais precisam de orçamento adicional. kB = 1.000 bytes; KiB = 1.024 bytes.

Caminho	Dados e infraestrutura	Critério de validação
Campanha - TRL3 a TRL7	Forma de onda, tempo, rotação, carga, montagem e rótulo. Buffer/arquivo local; exportação em rajadas por BLE ou Wi-Fi.	Recuperar capturas completas, rastreáveis e utilizáveis na comparação com instrumento de referência.
Operação - produção	FFT/envelope, RMS, picos, bandas, qualidade e eventos. Payload de estudo de 64 B; LoRa e gateway como referência.	Indicadores equivalentes ao processamento de referência, cadência e perda compatíveis com o caso de uso.
Evento / serviço	Retenção local de trechos selecionados para diagnóstico posterior.	Política de retenção e exportação compatível com memória, energia e rotina da manutenção.

Por que o fluxo bruto não segue continuamente por LoRa

Num link ilustrativo de 5 kbit/s, uma captura de 1 s demoraria ao menos **245,76 s** para transmitir, sem protocolo, espera ou perdas. A fonte produz 245,76 vezes mais bits por segundo. Isso inviabiliza o streaming dessa configuração nesse link; **não torna impossível enviar qualquer trecho finito por LoRa**. A taxa real depende da configuração e da rede.

FFT e memória também têm conta

Um bloco de 4.096 amostras por eixo, triaxial e de 16 bits, ocupa **24 KiB**. Um vetor float32 de 4.096 pontos soma **16 KiB por eixo processado**, além das áreas exigidas pela implementação. Em 25,6 kS/s, $\Delta f = f_s/N = \mathbf{6,25 \text{ Hz}}$. Buffer duplo, filtros, protocolo, firmware e retenção devem entrar no dimensionamento final.

A captura completa pode ser armazenada em memória não volátil enquanto a FFT opera por blocos. A seleção do microcontrolador depende de benchmark de tempo, RAM, energia e precisão; não decorre de uma classe comercial de chip escolhida antecipadamente.

Referência de implementação: TI TIDA-01469 - aquisição e FFT embarcada

04 / ORÇAMENTO DE ENERGIA

A medição horária pode caber em anos.

O quadro abaixo é uma **hipótese de orçamento**, com correntes equivalentes na bateria, incluindo implicitamente a conversão. Não são correntes de componentes já selecionados. Base: 25,6 kS/s, captura de 1 s, estabilização de 1 s e um envio por ciclo.

Fase	Corrente	Tempo / ciclo	Carga / ciclo
Aquisição + estabilização	32 mA	2,00 s	0,01778 mAh
FFT / indicadores	24 mA	1,50 s	0,01000 mAh
Rádio / envio	45 mA	0,40 s	0,00500 mAh
Repouso, ciclo horário	0,007 mA	3.596,10 s	0,00699 mAh
Total por hora	-	3.600 s	0,03977 mAh

$$Q_{\text{fase}} = I(\text{mA}) \times t(\text{s}) / 3.600$$
$$Q_{\text{hora}} = \sum Q_{\text{fase}} \times \text{ciclos por hora}$$

Aquisição e FFT somam cerca de **70% da carga** nesta hipótese. Transdutor, rádio, tentativas e repouso podem mudar a parcela dominante.

Capacidade isolada não é garantia de autonomia

Premissas: célula primária de 17 Ah, 50% de capacidade utilizável (8.500 mAh), autodescarga simplificada de 1% da capacidade nominal ao ano (170 mAh/ano) e horizonte de serviço assumido de 10 anos. O cálculo linear não modela passivação, pulsos, temperatura nem envelhecimento detalhado.

$$\text{Anos} = 8.500 / (Q_{\text{hora}} \times 8.760 + 170)$$
$$\text{Projeção exibida} = \text{mínimo}(\text{Anos}, 10)$$

Cadência	Consumo elétrico / hora	Projeção com as premissas
60 minutos	0,03977 mAh/h	16,4 anos por capacidade; exibido 10 anos pelo horizonte
15 minutos	0,13808 mAh/h	6,16 anos
5 minutos	0,40024 mAh/h	2,31 anos
1 minuto	1,97321 mAh/h	0,487 ano - cerca de 5,8 meses

Passar de uma hora para um minuto multiplica a carga ativa por 60, mas muda o repouso. Validar autonomia exige ensaio da célula e do produto, com margem de troca.

05 / MEDIÇÃO, NORMA E AMBIENTE

Três decisões precisam sair do genérico.

1. Severidade global não substitui diagnóstico

A ISO 20816-9:2020 trata especificamente de medição e avaliação de vibração de redutores dentro de seu campo de aplicação. A própria descrição do escopo distingue a avaliação de severidade das técnicas especializadas de diagnóstico de engrenagens. **Não se atribui a toda a série uma faixa única de 10 a 1.000 Hz.** A aplicabilidade à família selecionada deve ser verificada.

RMS e tendência global são úteis, mas a investigação do dente requer banda, resolução, contexto e indicadores específicos. A solução pode combinar ambos, sem tratar o simples pico em GMF ou uma banda lateral como confirmação de dano.

[ISO - escopo público da ISO 20816-9:2020](#)

2. “Ruído” deve virar uma escolha de aquisição

Técnica	O que investiga	Consequência de projeto
Som aéreo / microfone	Ruído audível, inclusive de máquinas vizinhas.	Controlar interferência e demonstrar contribuição real antes de incluí-lo como canal permanente.
Envelope de aceleração	Modulação de uma banda de ressonância estrutural escolhida.	Banda, antialias, demodulação e montagem compatíveis. É uma linha inicial de investigação.
Emissão acústica estrutural	Ondas de alta frequência; um exemplo SKF usa 100-500 kHz.	Transdutor e acoplamento específicos, front-end e energia próprios. Pode haver demodulação analógica: não implica sempre digitalizar toda a portadora.

Envelope de aceleração e emissão acústica são técnicas distintas. Nenhuma é a única maneira de detectar dano incipiente. A escolha deve ser resolvida no TRL2 e comprovada na POC; adicionar AE muda a cadeia de medição e exige controle formal de escopo.

[SKF CMON 2504 - exemplo de emissão acústica e acoplamento](#)

3. Magnetometria fica como hipótese no TRL2

Carcaça ferromagnética, campo do motor e montagem podem limitar sua utilidade. Comparar o ganho contra aceleração e temperatura antes de torná-la obrigatória. A prioridade é qualidade do sinal, banda e repetibilidade da fixação. Umidade também requer justificativa de aplicação.

06 / ESCOPO E ACEITE PERMANECEM EM NOVE TRLS

O preço acompanha entregas verificáveis.

A camada física é incorporada aos mesmos nove TRLs. As evidências abaixo detalham o aceite; não substituem a aprovação formal da WEG-Cestari. Mudanças materiais de escopo continuam sujeitas à governança do programa.

Gate	Valor (R\$)	Evidência física e operacional
TRL1	120 mil	Dentes, velocidades, modos de falha e referências de campo.
TRL2	180 mil	Banda, antialias, ruído, duas rotas de dados, alimentação e plano de validação aprovados.
TRL3	220 mil	Captura bruta exportável, pipeline e FFT/envelope inicial comparados à referência.
TRL4	300 mil	Protótipo integrado, benchmark de processamento/RAM e corrente medida por fase.
TRL5	330 mil	Montagem, ruído e comunicação em ambiente relevante; dados rotulados.
TRL6	450 mil	Sistema repetível, integridade das duas rotas, instalação e segurança.
TRL7	400 mil	Piloto, cadência validada, falso positivo/negativo, inspeção e valor operacional.
TRL8	500 mil	Design freeze de banda, rádio, energia, firmware e pacote de fabricação.
TRL9	600 mil	Molde, lote-piloto, fim de linha e evidência operacional reproduzível.

Pesquisa: R\$ 300 mil · Desenvolvimento: R\$ 2,2 mi

Industrialização: R\$ 600 mil · Total: R\$ 3,1 mi

Mesma governança comercial

Cenário recomendado de 13 meses: TRL8 no mês 10 e TRL9 no mês 13, com núcleo de cinco profissionais. Cenário comprimido de 11 meses: TRL8 no mês 8 e TRL9 no mês 11, com sete profissionais. Aceleração depende de execução em paralelo, acesso à planta e decisões rápidas; não elimina tempo físico de coleta ou prazos externos.

Taxas e ensaios regulatórios de terceiros seguem fora dos R\$ 3,1 milhões. O anexo não altera as demais exclusões da proposta, incluindo nuvem e conectividade operacionais, componentes do lote de produção e deslocamentos. A eventual cadeia de AE exige decisão formal antes de ser incorporada.

07 / LIMITES, DECISÕES E REFERÊNCIAS

O que precisa ser provado antes de prometer.

Mecânica e aquisição

Confirmar dentes e relação de cada estágio, rotações, cargas, rolamentos, pontos de montagem, faixa térmica e condições ambientais. Identificar ressonâncias e comparar a aquisição com referência calibrada.

Dados e diagnóstico

Demonstrar banda, antialias, resolução e integridade. Correlacionar indicadores, carga e rotação. Medir falso positivo, falso negativo e antecedência, com dados rotulados e amostra suficiente.

Rádio e energia

Verificar taxa útil, tempo no ar, perdas, densidade e recuperação. Medir corrente por fase e transferência de campanha. Avaliar capacidade útil, autodescarga, pulsos, temperatura, proteção e rotina de troca.

Produto e serviço

Fechar o ciclo alerta, inspeção, ação e resultado. Congelar a configuração qualificada; confirmar capacidade de produção, suporte e aprovações aplicáveis.

REFERÊNCIAS TÉCNICAS PRIMÁRIAS

1. ISO 20816-9:2020 - escopo de medição e avaliação de redutores
2. NI - Sampling Rate, banda útil e oversample ratio
3. MathWorks - gearMeshFaultBands, frequências e bandas laterais
4. MathWorks - indicadores de condição de engrenagens
5. TI TIDA-01469 - aquisição e FFT embarcada
6. Analog Devices ADcmXL3021 - exemplo de aquisição e processamento
7. SKF CMON 2504 - emissão acústica e banda de 100-500 kHz

Documentos do briefing: transcrição de diagnóstico Moove IoT / Ideas Hub e WEG-Cestari; HTML de proposta comercial; texto de monitoramento preditivo e imagem de referência. A disponibilidade elétrica e a rotação citadas são relatos do cliente. Fontes consultadas em setembro de 2026.

O documento usa fórmulas de dimensionamento e hipóteses transparentes. As correntes e a capacidade não são uma seleção de componentes. A prancha mostra espectro sintético; a geometria 3D não é o desenho industrial final. Nenhum desses elementos constitui garantia de previsão de falha ou autonomia.