

Plano de Trabalho Mestre para o Desenvolvimento de Sistema Integrado de Transporte de Motores Elétricos de Grande Porte com Skid Estrutural e Mancais Bipartidos de Rápida Remoção

Seção 1: Análise Estratégica da Solução Integrada de Transporte de Motores Elétricos

Esta seção estabelece o contexto estratégico e técnico, definindo o problema e justificando a necessidade de uma solução de engenharia integrada. Analisamos os riscos inerentes ao transporte de motores elétricos de grande porte, dissecamos as soluções atuais do mercado para identificar lacunas e oportunidades, e formalizamos os objetivos de projeto que guiarão todo o desenvolvimento subsequente.

1.1. O Desafio do Transporte de Motores Elétricos de Grande Porte: Riscos e Impactos

O transporte de motores elétricos de grande porte, como os utilizados em mineração, siderurgia, saneamento e geração de energia, representa um dos desafios logísticos e de engenharia mais críticos na indústria. Estes componentes não são meramente cargas pesadas; são ativos de altíssimo valor, fabricados com tolerâncias micrométricas, com rotores balanceados dinamicamente com extrema precisão e enrolamentos de estator delicados. A integridade estrutural, dimensional e elétrica destes motores é fundamental para a eficiência, segurança e vida útil da máquina. Qualquer dano incorrido durante o trânsito pode resultar

em falhas catastróficas, atrasos de projeto e perdas financeiras substanciais.

A vulnerabilidade destes ativos exige uma mudança de paradigma na filosofia de projeto dos sistemas de transporte. A abordagem não pode ser simplesmente a de contenção de uma carga pesada, mas sim a de engenharia de um sistema de suporte à vida para um componente de precisão em um ambiente hostil e dinâmico. Os riscos associados ao transporte podem ser categorizados em três domínios principais:

- **Riscos Estáticos:** O risco mais evidente é a deflexão excessiva do eixo do rotor sob seu próprio peso. Um rotor de motor elétrico, especialmente um de grande comprimento, comporta-se como uma viga. Se apoiado apenas em seus mancais principais, o vão livre pode ser suficientemente grande para que a deflexão no centro do eixo exceda os limites elásticos do material ou cause um desalinhamento permanente ("empenamento"). Tal deformação, mesmo que sutil, compromete o entreferro (air gap) crítico entre rotor e estator e pode levar a vibrações excessivas durante a operação, reduzindo drasticamente a vida útil do equipamento.
- **Riscos Dinâmicos:** Estes são os riscos mais insidiosos e frequentemente subestimados. Eles se manifestam de duas formas:
 1. **Choque:** Impactos repentinos devido a buracos na estrada, manobras bruscas ou manuseio inadequado durante o içamento podem gerar acelerações de alta magnitude. Estes choques podem causar danos de impacto, como o "brinelling" verdadeiro, onde os elementos rolantes dos mancais marcam permanentemente as pistas devido a uma sobrecarga estática momentânea.
 2. **Vibração:** Cargas cíclicas de baixa amplitude e alta frequência, inerentes ao transporte, são a causa principal do **falso brinelamento** (false brinelling). Este fenômeno de desgaste por atrito (fretting wear) ocorre nos pontos de contato entre os elementos rolantes e as pistas dos mancais, que estão estáticos. As micro-oscilações expulsam a película de lubrificante, levando ao contato metal-metal e à subsequente oxidação e remoção de material.¹ O resultado são depressões ou marcas na pista que, embora microscópicas, atuam como iniciadores de trincas por fadiga, condenando o mancal antes mesmo de sua primeira rotação em serviço.
- **Riscos Operacionais:** As deficiências no projeto do sistema de transporte se manifestam diretamente no local de instalação. Sistemas que exigem procedimentos complexos para a remoção dos suportes de transporte – como a necessidade de múltiplos içamentos do motor – aumentam o tempo de instalação, os custos de mão de obra e, mais criticamente, o risco de acidentes e danos ao equipamento durante o manuseio no campo. A segurança da equipe de montagem é uma preocupação primordial.

O impacto de uma falha no transporte é severo. Os custos diretos de reparo ou substituição de um motor ou de seus mancais podem ser extremamente elevados. No entanto, os custos indiretos são frequentemente ainda maiores, incluindo multas contratuais por atrasos no cronograma do projeto, perda de produção devido ao tempo de inatividade da planta e danos

irreparáveis à reputação do fabricante. Portanto, investir em uma solução de transporte robusta e bem projetada não é um custo, mas uma apólice de seguro essencial.

1.2. O Conceito Integrado: Sinergia entre o Skid de Transporte e os Mancais Bipartidos

Para mitigar de forma abrangente os riscos identificados, a solução proposta baseia-se em uma filosofia de projeto integrado, onde o skid de transporte (ou "berço") e os mancais bipartidos intermediários funcionam como um sistema único e coeso, projetado para proteger o motor elétrico em todas as fases do transporte e facilitar sua instalação.

- **Função do Skid de Transporte:** O skid é a espinha dorsal do sistema. Sua função primária é prover uma fundação estrutural com altíssima rigidez à flexão e torção. Ele deve ser capaz de absorver e distribuir as cargas estáticas e dinâmicas impostas pelo transporte, isolando o motor de deformações excessivas. O skid serve como a interface principal com os veículos de transporte e com os equipamentos de içamento. Portanto, deve incorporar pontos de amarração e olhais de içamento devidamente projetados, calculados e certificados. A rigidez do skid é um parâmetro de projeto crítico, pois uma estrutura flexível anularia o benefício dos suportes intermediários.
- **Função dos Mancais Bipartidos Intermediários:** Enquanto o skid fornece a rigidez global, os mancais bipartidos oferecem o suporte local e a proteção precisa onde é mais necessário. Sua função é multifacetada:
 1. **Controle de Deflexão:** Atuam como apoios intermediários ao longo do vão do rotor, limitando a deflexão estática causada pelo peso próprio a níveis insignificantes. Isso previne o empenamento e garante que o rotor chegue ao local de instalação com seu alinhamento geométrico intacto.
 2. **Proteção dos Mancais Principais:** Ao suportar uma parte significativa do peso do rotor durante o transporte, os mancais intermediários aliviam a carga sobre os mancais principais do motor. Isso é crucial para minimizar o risco de danos por choque e falso brinelamento nos componentes que serão utilizados em operação.
 3. **Rápida Remoção:** Este é um dos principais vetores de inovação. Os mancais são projetados para serem "bipartidos" ou "clamshell", permitindo que sejam abertos e removidos lateralmente ou para baixo, sem a necessidade de levantar ou manobrar complexamente o motor no local de instalação. Esta funcionalidade reduz drasticamente o tempo, o custo e o risco associados à preparação do motor para a montagem final.

A sinergia entre os dois componentes é fundamental. A rigidez do skid garante que os mancais bipartidos estejam apoiados em uma base estável. Por sua vez, os mancais bipartidos garantem que as cargas do rotor sejam transferidas para a estrutura do skid de

maneira controlada, evitando concentrações de tensão no eixo.

1.3. Análise Comparativa de Soluções Existentes (OEMs: WEG, ABB, Siemens, etc.)

Uma análise do estado da arte em transporte de motores elétricos revela práticas estabelecidas e oportunidades para inovação. Grandes fabricantes como WEG, ABB e Siemens desenvolveram soluções para o transporte de seus motores de grande porte.

- **Projeto de Skids:** Os skids de transporte para motores elétricos são frequentemente estruturas de aço soldadas que servem como base para o motor e, por vezes, para sistemas auxiliares. O design estrutural varia, com algumas soluções utilizando vigas caixão para máxima rigidez torcional, enquanto outras empregam estruturas treliçadas para otimizar a relação peso/resistência.
- **Travamento de Eixo:** Os manuais dos fabricantes enfatizam a necessidade de travar o eixo do rotor durante todo e qualquer transporte para evitar danos aos rolamentos, especialmente o falso brinelamento. Motores de grande porte, como as linhas HGF, W50 e W60 da WEG, exigem o travamento do rotor independentemente do tipo de mancal. A ABB também especifica o uso de dispositivos de travamento para transporte em seus motores de indução.
- **Foco na Remoção:** A remoção do motor do skid de transporte para a fundação final é uma operação crítica. Os projetos dos OEMs são otimizados para esta transição, mas os suportes intermediários específicos para o transporte nem sempre são projetados com a mesma atenção à eficiência da remoção.
- **Patentes e Inovações:** A pesquisa de patentes revela um foco contínuo em mecanismos de travamento de rotores para evitar rotação indesejada. No entanto, a integração de um mancal bipartido projetado especificamente para remoção rápida, combinado com um sistema ativo de mitigação de falso brinelamento, representa uma área com potencial significativo para melhorias.

A análise das soluções existentes, como os motores da linha SIMOTICS da Siemens e os motores de baixa tensão da ABB, fornece um benchmark valioso. O objetivo deste plano de trabalho é evoluir a partir dessas melhores práticas, focando em pontos de otimização identificados.

1.4. Identificação de Pontos Críticos e Oportunidades de Melhoria Tecnológica

A análise comparativa e a compreensão aprofundada dos riscos revelam lacunas nas soluções convencionais e, consequentemente, oportunidades claras para inovação tecnológica.

- **Ponto Crítico 1 - Complexidade e Risco na Remoção dos Suportes:** A maioria das soluções de transporte utiliza suportes intermediários sólidos ou de difícil desmontagem. No local de instalação, isso obriga a equipe de campo a realizar uma manobra de içamento do motor, com várias toneladas suspensas, apenas para remover os suportes de transporte. Esta operação é demorada, requer equipamentos de içamento de grande porte e introduz um ponto de risco significativo de dano ao equipamento (como ao entreferro rotor-estator) ou de acidente com o pessoal. A "remoção rápida", portanto, não é um mero luxo, mas uma necessidade operacional para aumentar a segurança e reduzir o tempo de comissionamento.
- **Ponto Crítico 2 - Mitigação Passiva da Vibração:** Muitas estratégias de transporte focam primariamente na resistência estática do skid e na contenção física do motor. A mitigação de danos dinâmicos, como o falso brinelamento, é frequentemente tratada de forma passiva, através da recomendação de graxas especiais ou da simples trava do eixo. Falta uma abordagem de engenharia proativa e mensurável para neutralizar o mecanismo de dano por vibração.

Com base nesses pontos críticos, as seguintes oportunidades de melhoria tecnológica são identificadas:

1. **Desenvolvimento de um Mancal Bipartido de Desengate Rápido:** A principal inovação será o projeto de um mancal intermediário que possa ser desacoplado e removido sem a necessidade de levantar o motor. Isso será alcançado através de um design "clamshell" com mecanismos de travamento rápido e ergonômico. O impacto direto é a eliminação de uma etapa de içamento crítica no campo, resultando em uma instalação mais rápida, segura e econômica.
2. **Implementação de um Sistema Ativo de Mitigação de Falso Brinelamento:** Em vez de depender apenas de medidas passivas, o sistema incorporará duas características ativas:
 - **Travamento Axial Robusto:** Um mecanismo para fixar o rotor axialmente, prevenindo o movimento de "martelamento" contra os mancais de escora.²
 - **Pré-carga Axial Verificável:** Um sistema para aplicar uma força axial controlada nos mancais de rolamento principais. Esta pré-carga elimina a folga interna, impedindo fisicamente o micro-movimento relativo entre rolos e pistas, que é a causa raiz do falso brinelamento.⁶ A "verificabilidade" será garantida pelo uso de indicadores de tensão, tornando o processo rastreável.
3. **Validação por Análise de Vibração Aleatória (Random Vibration Analysis):** A validação do projeto transcenderá a análise estática. O sistema completo será submetido a simulações de elementos finitos utilizando perfis de vibração (PSD - Power Spectral

Density) derivados de normas como a MIL-STD-810G e ISO 16750-3. Esta análise avançada permitirá prever a resposta dinâmica do motor ao ambiente de transporte real e quantificar o risco de falso brinelamento.

A combinação destas três inovações resultará em uma solução de transporte que não apenas garante a integridade do motor elétrico, mas também oferece um diferencial competitivo ao reduzir o tempo e o risco no local de instalação.

Seção 2: Engenharia e Projeto do Skid (Berço) de Transporte

Esta seção detalha a engenharia da estrutura principal do sistema. Abordaremos os requisitos normativos, a seleção criteriosa de materiais, o projeto estrutural com foco na soldagem de alta integridade, e o dimensionamento dos componentes de içamento e amarração para garantir a segurança em todas as fases da movimentação.

2.1. Requisitos de Projeto e Normas Aplicáveis

O projeto do skid de transporte deve ser fundamentado em um conjunto rigoroso de requisitos de engenharia e em conformidade com as normas técnicas aplicáveis.

- **Normas de Referência:** O projeto será guiado por um conjunto hierárquico de normas:
 - **API RP 686 - Recommended Practice for Machinery Installation and Installation Design:** Esta prática recomendada fornece diretrizes abrangentes para o manuseio, armazenamento e proteção de equipamentos rotativos.
 - **ABNT NBR ISO 15.818:2021:** Esta norma define os requisitos de desempenho para pontos de fixação de içamento e amarração em máquinas pesadas.
 - **ASME BTH-1 - Design of Below-the-Hook Lifting Devices:** Esta norma é a referência principal para o projeto dos olhais de içamento do skid.
 - **ASME B30.20 - Below-the-Hook Lifting Devices:** Complementar à BTH-1, esta norma aborda a marcação, inspeção, teste, manutenção e operação de dispositivos de içamento.
 - **Federal Motor Carrier Safety Administration (FMCSA) Cargo Securement Rules:** As regulamentações do Departamento de Transportes dos EUA fornecem os critérios mínimos para as acelerações de projeto que uma carga deve suportar.
- **Fatores de Carga de Projeto (Design Load Factors):** Com base nas normas da FMCSA,

- o skid e todos os seus componentes de fixação serão projetados para resistir às seguintes acelerações mínimas:
 - Aceleração longitudinal para frente (frenagem): 0.8 g
 - Aceleração longitudinal para trás (aceleração): 0.5 g
 - Aceleração lateral (curvas, mudança de faixa): 0.5 g
 - Aceleração vertical para cima: 0.5 g
 - Aceleração vertical para baixo: 2.0 g
- **Requisitos de Rigidez:** A deflexão máxima da estrutura do skid sob a combinação de seu peso próprio, o peso do motor e as cargas dinâmicas de transporte será limitada a um valor que não induza tensões de flexão prejudiciais no rotor. A análise de elementos finitos (FEA) será a ferramenta principal para verificar o cumprimento deste requisito.

2.2. Seleção de Materiais: Aços Estruturais de Alta Resistência (HSLA)

Para esta aplicação, os Aços Estruturais de Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA - High-Strength Low-Alloy) são a escolha preferencial.

- **Critérios de Seleção:**
 1. **Limite de Escoamento (fy):** Um alto limite de escoamento permite um skid mais leve. Aços da classe Strenx® 700 ou equivalentes são candidatos ideais.
 2. **Tenacidade:** O material deve possuir alta tenacidade para evitar a fratura frágil.
 3. **Soldabilidade:** O material deve ter boa soldabilidade para permitir a execução de soldas de alta qualidade.
 4. **Disponibilidade e Custo:** Será realizada uma consulta a fornecedores qualificados no mercado brasileiro, como Aço Brazil, SSAB, Açomais, Atlanta Ferro e Aço, Armco e Açovisa.
- **Benefícios da Abordagem HSLA:** Uma estrutura mais leve para a mesma rigidez resultará em frequências naturais mais elevadas. Isso afasta as ressonâncias estruturais do skid das frequências de excitação dominantes do transporte rodoviário (tipicamente 2-20 Hz).

2.3. Projeto Estrutural e Qualificação de Processos de Soldagem

O projeto estrutural do skid transformará os requisitos de carga e rigidez em uma geometria fabricável e otimizada.

- **Desenvolvimento do Conceito Estrutural:** Serão avaliadas topologias como viga caixão e treliçada espacial. Softwares de FEA serão utilizados para realizar estudos de

- otimização topológica, levando a um design mais leve e eficiente.
- **Qualificação e Controle da Soldagem:** A qualidade da soldagem será garantida com base em normas reconhecidas:
 - **ISO 3834 - Requisitos de qualidade para a soldagem:** Esta norma será o pilar da gestão da qualidade do processo.
 - **ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX - Welding Qualifications:** Este é o código padrão da indústria para a qualificação técnica dos procedimentos e do pessoal.
 - **Seleção de Fornecedores:** A fabricação será confiada a empresas de caldeiraria pesada e usinagem de grande porte com experiência comprovada.

2.4. Dispositivos de Içamento e Ancoragem: Projeto e Teste

Os pontos de interface para movimentação e fixação do skid são componentes de segurança críticos.

- **Projeto Integrado:** Os olhais de içamento e os pontos de amarração serão projetados como partes integrantes da estrutura principal do skid.
- **Conformidade com ASME BTH-1:** O projeto de cada olhal de içamento seguirá estritamente os requisitos da norma ASME BTH-1, incluindo a aplicação de um fator de segurança mínimo de **3,0** em relação ao limite de escoamento do material.
- **Protocolo de Teste de Carga:** A validação final será realizada através de um teste de carga físico. O skid será submetido a uma carga de teste estática de **125% da sua Carga Nominal de Trabalho**. Após o teste, o skid será inspecionado para garantir que não houve deformação permanente ou danos.

Seção 3: Projeto e Funcionalidade dos Mancais Bipartidos Intermediários

Esta seção detalha o projeto dos mancais intermediários, focando na sua função estrutural, nos mecanismos que permitem a rápida remoção e na ergonomia para a equipe de campo.

3.1. Função Crítica: Prevenção da Deflexão Estática e Dinâmica do Rotor

A função primordial dos mancais intermediários é transformar o rotor do motor em uma viga contínua com múltiplos apoios, muito mais rígida.

- **Análise Estrutural do Rotor:** O rotor será modelado como uma viga com seção transversal variável. A localização dos mancais intermediários será posicionada estrategicamente para minimizar a deflexão máxima ao longo de todo o comprimento do eixo.
- **Metodologia de Cálculo e Verificação:**
 - **Estimativas Preliminares:** Ferramentas de cálculo de viga online serão utilizadas para uma rápida avaliação.
 - **Verificação Analítica:** Serão aplicadas as fórmulas clássicas da teoria de vigas.
 - **Análise de Tensões:** O objetivo é garantir que as tensões de flexão induzidas no rotor sejam mantidas em níveis muito baixos. A análise de FEA (detalhada na Seção 5) será a ferramenta definitiva para confirmar estes cálculos.

3.2. Tipologias de Mancais Bipartidos (Clamshell) e Mecanismos de Travamento Rápido

O design do mancal deve ser robusto quando fechado e fácil de abrir e remover no campo.

- **Inspiração e Benchmarking:** O projeto se inspirará em tecnologias comprovadas como máquinas de usinagem de campo "clamshell" e mancais de rolamento bipartidos.
- **Conceito de Projeto:** O mancal será composto por duas metades unidas por uma dobradiça de alta resistência. O lado oposto contará com mecanismos de travamento rápido, como grampos de ação rápida, parafusos de articulação (swing bolts) ou travas de acionamento por came.

3.3. Seleção de Materiais de Contato (Poliuretano vs. Aço)

A interface entre o berço do mancal e a superfície do rotor é crítica para evitar danos ao eixo.

- **Análise de Opções:**
 - **Opção 1 (Preferencial): Berço de Poliuretano (PU) de Alta Dureza:** Oferece excelente resistência à compressão e abrasão, absorve energia de impacto e amortece vibrações, além de eliminar o risco de danos por contato metal-metal. A dureza será selecionada na faixa de 90 Shore A a 75 Shore D.

- **Opção 2: Berço de Aço com Revestimento de Baixo Atrito:** Oferece máxima rigidez, mas com risco de dano à superfície do rotor.
- **Decisão de Projeto e Justificativa:** A opção com berço de poliuretano é a escolha superior, pois atua não apenas como suporte passivo, mas como um componente ativo no gerenciamento de vibração.

3.4. Projeto para Remoção Rápida: Ergonomia e Segurança Operacional

O design do mancal deve ser centrado na equipe de montagem no campo.

- **Sequência de Desmontagem:** O projeto deve garantir uma sequência lógica e segura para desengatar os travamentos, abrir o mancal e remover as metades.
- **Características Ergonômicas e de Segurança:**
 - **Pontos de Manuseio:** Cada metade do mancal será equipada com alças ou olhais de içamento.
 - **Gerenciamento de Peso:** O peso de cada componente manuseado manualmente será mantido dentro dos limites ergonômicos.
 - **Alinhamento e Montagem:** Pinos-guia de precisão garantirão o alinhamento perfeito das duas metades.
 - **Prevenção de Erros (Poka-Yoke):** O design buscará incorporar características que impeçam a montagem incorreta.

Seção 4: Mitigação de Riscos Dinâmicos e Preservação da Integridade do Ativo

Esta seção aborda as estratégias proativas para proteger os mancais do motor contra os danos induzidos pelo transporte.

4.1. Análise Aprofundada do Fenômeno de Falso Brinelamento (False Brinelling)

O falso brinelamento é a forma mais perigosa de dano que pode ocorrer em mancais de rolamento durante o transporte.

- **Mecanismo de Falha:** O processo ocorre em mancais estacionários sujeitos a vibração.
 1. **Micro-movimento:** A vibração causa oscilações de pequena amplitude entre os elementos rolantes e as pistas.
 2. **Ruptura do Filme Lubrificante:** O movimento oscilatório expulsa a película de graxa ou óleo.
 3. **Contato Metal-Metal e Fretting:** O atrito gera calor e remove partículas minúsculas de metal.
 4. **Oxidação e Desgaste Abrasivo:** As partículas de desgaste reagem com o oxigênio, formando óxidos duros e abrasivos que aceleram o desgaste.
- **Sintomas e Consequências:** O dano se manifesta como depressões ou marcas nas pistas. Quando o motor entra em operação, essas áreas danificadas geram ruído, vibração e levam a uma falha prematura por fadiga.

4.2. Estratégias de Prevenção Ativa e Passiva

Uma estratégia robusta deve combinar medidas passivas e ativas.

4.2.1. Projeto do Sistema de Travamento Axial do Rotor

- **Necessidade:** Durante o transporte, as acelerações e frenagens geram forças de inércia axiais. Sem um travamento adequado, o rotor pode se mover e danificar o mancal de escora.
- **Conceito de Projeto:** Será projetado um dispositivo de travamento axial dedicado, como um colar bipartido, que fixa o eixo rigidamente em relação à estrutura do skid.

4.2.2. Metodologia para Aplicação de Pré-Carga Axial nos Mancais Principais

Esta é a contramedida ativa mais crítica contra o falso brinelamento, eliminando a folga interna do mancal.

- **Objetivo:** Aplicar uma força axial controlada para eliminar qualquer folga radial e axial, impedindo o micro-movimento relativo.

- **Método de Aplicação:** O sistema de travamento axial será integrado com parafusos macaco (jackscrews) de alta capacidade, que aplicarão a força de compressão no eixo.
- **Cálculo da Força de Pré-Carga:** A magnitude da pré-carga será determinada em consulta com as especificações do fabricante do mancal e através de análises de FEA. A relação entre o torque aplicado no parafuso e a força axial resultante será calculada com precisão.
- **Controle e Verificação do Processo:** Serão utilizadas **Arruelas Indicadoras de Carga Direta** (DTI - Direct Tension Indicators) para fornecer uma confirmação visual e à prova de falhas de que a pré-carga correta foi aplicada.

4.2.3. Recomendações de Lubrificação e Preservação

- **Lubrificação:** Serão especificadas graxas de alta performance com aditivos anti-fretting e de extrema pressão (EP).
- **Rotação Periódica:** Será estabelecido um procedimento para a rotação periódica do eixo (por exemplo, $\frac{1}{4}$ de volta semanalmente) para redistribuir o lubrificante.
- **Proteção Ambiental:** O motor será protegido contra corrosão e contaminação com selagem de aberturas, uso de dessecantes e Inibidores de Corrosão por Vapor (VCI).

4.3. Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) para o Processo de Transporte

Será conduzida uma Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) para todo o processo de transporte para identificar e mitigar sistematicamente todos os riscos potenciais.

- **Metodologia:** Utilizando um template FMEA padrão, uma equipe multifuncional irá identificar modos de falha, analisar seus efeitos, identificar causas, avaliar controles e calcular o Número de Prioridade de Risco (RPN) para desenvolver ações corretivas.
- **Aplicação Iterativa no Projeto:** O FMEA será usado iterativamente para otimizar o projeto, como a decisão de usar arruelas DTI para reduzir o risco de aplicação incorreta da pré-carga.

A Tabela 1 abaixo apresenta um exemplo simplificado de uma FMEA para o sistema de transporte de um motor elétrico.

Tabela 1: Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) do Sistema de Transporte (Exemplo)

Item/Função do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial da Falha	S	Causa(s) Potencial(is)	O	Controles Atuais (Prevenção/Detecção)	D	RPN	Ações Recomendadas	RPN Revisado
Içamento do Conjunto	Falha estrutural de um olhal de içamento	Queda da carga, dano catastrófico ao motor, risco de fatalidade.	10	Sobrecarga; Solda defeituosa; Fadiga do material.	3	Projeto conforme ASME BTH-1 (FS=3); Qualificação de solda (ASME IX, ISO 3834); Inspeção de solda por END.	2	60	Realizar teste de carga a 125% da carga nominal em todos os skids fabricados.	20 (D=1)
Pré-carga Axial	Pré-carga insuficiente aplicada	Falso brinelamento nos mancais do motor durante o transporte, levando à falha prematura em	9	Erro do operador; Ferramenta de torque descalibrada; Cálculo incorreto da relação torque-força.	5	Procedimento de aperto por torque; Treinamento do operador.	7	315	Incorporar Arruelas Indicadoras de Carga Direta (DTI) no sistema de parafuso macaco para verificação visual direta da força aplicada. Adicionar	63 (D=1, O=1)

		operação.						verificação no checklist visual.	
Transporte	Choque excessivo	Dano ao isolamento dos enrolamentos do estator; desalinhamento do entreferro rotor-estator.	8	Manuseio inadequado; Condições da estrada.	4	Embalagem padrão; Recomendações de manuseio.	6	192	Incorporar amortecedores de poliuretano nos berços; Instrumentar o transporte com acelerômetros para monitorar os níveis de choque.
Mancal Bipartido	Travamento incompleto do mecanismo "clams hell"	Abertura parcial do mancal durante o transporte, perda de suporte do rotor, deflexão excessiva e possível dano ao eixo.	9	Obstrução no mecanismo ; Erro do operador.	3	Inspeção visual pelo operador.	6	162	Projetar o mecanismo de trava com um indicador visual de "travado" (e.g., alinhamento de marcas, pino de segurança visível). Adicionar verificação no checklist visual.

Seção 5: Validação por Simulação Computacional (Análise de Elementos Finitos - FEA)

Esta seção descreve a metodologia para validar virtualmente o projeto antes da fabricação, utilizando ferramentas avançadas de simulação.

5.1. Modelagem e Malha do Conjunto Completo

- **Modelo Geométrico:** Será criado um modelo CAD 3D de alta fidelidade representando o conjunto completo: o motor (com rotor e estator), a estrutura do skid e os mancais bipartidos.
- **Estratégia de Malha (Meshing):** Uma estratégia de malha adaptativa será empregada, com refinamento local em áreas de alta concentração de tensão, como juntas soldadas e interfaces de contato.

5.2. Análise Estática: Simulação de Cargas de Transporte

A análise estática validará a capacidade da estrutura de suportar as cargas de "pior caso".

- **Aplicação de Cargas:** As acelerações de projeto definidas na Seção 2.1 serão aplicadas ao modelo como cargas de corpo.
- **Simulação de Pré-Carga:** A pré-carga nos parafusos e a pré-carga axial aplicada ao rotor serão simuladas utilizando as funcionalidades de pré-tensão de parafusos disponíveis no software de FEA.
- **Análise de Resultados:** Serão avaliadas as tensões de von Mises, deformações e forças de contato para garantir que os limites de projeto sejam atendidos.

5.3. Análise Dinâmica

A análise dinâmica permitirá uma avaliação quantitativa da resposta do sistema ao ambiente de vibração real do transporte.

5.3.1. Análise Modal

- **Objetivo:** A análise modal calculará as frequências naturais e os modos de vibração do conjunto para garantir que estejam afastadas das frequências de excitação dominantes do transporte (2-20 Hz).
- **Metodologia:** A análise será realizada utilizando o método de Lanczos ou similar. Se uma frequência natural problemática for identificada, o projeto do skid será modificado para aumentar sua rigidez.

5.3.2. Análise de Vibração Aleatória (Random Vibration)

Esta é a análise mais crítica para validar o projeto contra o risco de falso brinelamento.

- **Input - Perfis de PSD:** Serão utilizados perfis de **Densidade Espectral de Potência (PSD)** padronizados, que representam ambientes de transporte severos, como os das normas **ISO 16750-3** e **MIL-STD-810G**.
- **Processamento e Output:** A análise calculará a resposta estatística do sistema, como os deslocamentos e tensões RMS (Root Mean Square). O resultado mais importante será o **deslocamento relativo RMS** entre os elementos rolantes e as pistas dos mancais.
- **Critério de Aceitação:** O deslocamento relativo RMS calculado nos mancais deverá ser mantido abaixo de um limiar de alguns micrômetros. Se a análise prever deslocamentos acima deste limiar, o projeto será revisado.

A Tabela 2 especifica os perfis de PSD que serão utilizados como input para a simulação.

Tabela 2: Perfis de Densidade Espectral de Potência (PSD) para Simulação de Transporte Rodoviário

(Baseado em MIL-STD-810G, Método 514.6, Anexo C, Figura 514.6C-1 - Composite two-wheeled trailer)

Norma de Referência	Eixo de Excitação	Frequência (Hz)	Aceleração Espectral (G ² /Hz)
MIL-STD-810G	Vertical	10	0.015

		40	0.015
		500	0.00015
		1000	0.00015
MIL-STD-810G	Transversal	10	0.005
		30	0.005
		150	0.0001
		1000	0.0001
MIL-STD-810G	Longitudinal	10	0.002
		50	0.002
		200	0.00005
		1000	0.00005

5.4. Simulação Detalhada: Análise de Contato e Tensões Locais

A técnica de submodelagem será empregada para analisar em detalhe áreas de alta complexidade.

- **Áreas de Foco:**
 - **Interface Poliuretano-Eixo:** Análise detalhada da pressão de contato.
 - **Mecanismos de Travamento:** Análise das tensões nas rosas dos parafusos de pré-carga e nas superfícies de contato.
 - **Juntas Soldadas Críticas:** Análise detalhada da distribuição de tensões.

Seção 6: Plano de Trabalho para Implementação,

Testes e Operação

A seção final traduz o projeto de engenharia em um plano de ação concreto.

6.1. Roteiro de Fabricação, Montagem e Inspeção de Qualidade

A fabricação exigirá um controle de qualidade rigoroso em todas as etapas.

- **Fluxograma de Fabricação:** O processo seguirá uma sequência lógica, incluindo recebimento de matéria-prima, corte, usinagem, soldagem, inspeção e pintura.
- **Plano de Pontos de Inspeção (PPI):** Um PPI detalhado será criado para formalizar os pontos de verificação, incluindo inspeção dimensional, visual de solda e Ensaios Não Destrutivos (END).
- **Procedimento de Montagem Final:** Um procedimento detalhado e ilustrado será desenvolvido para a montagem do motor no skid, cobrindo a instalação dos mancais, o posicionamento do motor e a aplicação da pré-carga axial.

6.2. Protocolo de Teste de Carga Estático e Dinâmico do Skid

A validação física é essencial para confirmar os resultados da simulação.

- **Teste de Carga Estático:** O skid completo será submetido a um teste de carga de **125% da Carga Nominal de Trabalho**, com medição de deformações para correlação com a FEA.
- **Teste Dinâmico (Análise Modal Experimental / Bump Test):** Um "bump test" será realizado para medir as frequências naturais reais da estrutura e validar o modelo dinâmico da FEA.

6.3. Plano de Instrumentação para Validação Experimental

As primeiras viagens de transporte serão instrumentadas para validar o comportamento do sistema no ambiente real.

- **Sistema de Monitoramento:** Acelerômetros triaxiais robustos e um sistema de aquisição de dados (DAQ) registrarão os dados de vibração durante o percurso.
- **Análise de Dados e Validação:** Os dados coletados serão processados para gerar os perfis de PSD reais, que serão comparados com os perfis normativos utilizados na simulação, permitindo refinar e otimizar futuros projetos.

6.4. Desenvolvimento de Manual de Operação com Checklist Visual

O manual de operação e os checklists são componentes críticos do sistema de segurança.

- **Conteúdo e Formato:** Será desenvolvido um manual de operação claro, conciso e visual, com fotografias, diagramas 3D e ícones.
- **Checklists Visuais:** Serão criados checklists visuais laminados para uso em campo, cobrindo a liberação para transporte e a desmontagem no cliente, com imagens para cada passo para minimizar a ambiguidade.

Seção 7: Sistema de Monitoramento de Transporte com Datalogger IoT

Esta seção detalha o projeto e a implementação de um sistema de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento em tempo real das condições de transporte do motor elétrico. O objetivo é registrar dados de vibração e choque, permitindo a verificação da integridade do transporte e a criação de um histórico digital para cada ativo.

7.1. Arquitetura do Sistema de Monitoramento

O sistema será projetado com uma arquitetura modular e robusta, composta pelas seguintes camadas:

1. **Camada de Sensoriamento:** Acelerômetros triaxiais de grau industrial fixados em pontos estratégicos do motor e do skid para capturar dados de vibração e choque.
2. **Camada de Aquisição e Processamento:** Um data logger central, baseado em um computador de placa única (SBC), responsável por coletar os dados dos sensores, processá-los localmente e armazená-los temporariamente.

3. **Camada de Comunicação:** Um módulo de comunicação celular (4G/LTE) integrado ao data logger para transmitir os dados coletados para a nuvem em tempo real ou em intervalos programados. Um módulo GNSS fornecerá dados de geolocalização.
4. **Camada de Nuvem:** Uma plataforma de nuvem IoT para receber, armazenar, processar e analisar os dados de forma segura e escalável.
5. **Camada de Apresentação:** Um dashboard web acessível de qualquer lugar para visualização dos dados, geração de relatórios e configuração de alertas.

7.2. Seleção de Sensores (Acelerômetros)

A seleção do sensor é crucial para capturar com precisão tanto as vibrações de baixa amplitude quanto os choques de alta amplitude.

- **Tecnologia do Sensor:** A solução ideal combina as vantagens de diferentes tecnologias. Serão utilizados **acelerômetros piezoelétricos** para a detecção de choques de alta frequência e alta amplitude, devido à sua durabilidade e ampla faixa dinâmica.¹⁰ Para o monitoramento contínuo de vibrações de baixa frequência, característico do transporte rodoviário, **acelerômetros MEMS (Sistemas Microeletromecânicos)** de alta sensibilidade são adequados.¹² A solução final pode ser um sensor híbrido ou dois tipos de sensores distintos.
- **Especificações Técnicas:**
 - **Eixos:** Sensores triaxiais para capturar o movimento nos eixos X, Y e Z.¹⁴
 - **Faixa de Medição:** Uma faixa dinâmica ampla é necessária. Por exemplo, ±50g para vibrações gerais e até ±500g para detecção de choques.
 - **Resposta de Frequência:** Ampla, cobrindo de 2 Hz a mais de 10 kHz para capturar todo o espectro de eventos.
 - **Robustez:** Sensores com grau de proteção IP67 ou superior, encapsulados em aço inoxidável para resistir ao ambiente industrial.
- **Fornecedores e Modelos de Referência:** Serão avaliados sensores de fornecedores como PCB Piezotronics, Hansford Sensors, Honeywell, e soluções integradas como as da Dynamox.¹³

7.3. Unidade de Processamento e Aquisição de Dados (Data Logger)

O "cérebro" do sistema embarcado será responsável por orquestrar a coleta e transmissão de dados.

- **Unidade Central de Processamento (CPU):** Será utilizado um computador de placa única (SBC) como o **Raspberry Pi 4**, que oferece poder de processamento suficiente para amostragem de alta frequência, processamento de borda (edge computing), e gerenciamento da comunicação, além de rodar um sistema operacional Linux completo que facilita o desenvolvimento.¹⁹
- **Aquisição de Dados:** Como os sensores analógicos de alta fidelidade exigem uma conversão precisa, será integrada uma placa de aquisição de dados (DAQ) ou um conversor analógico-digital (ADC) de alta resolução (e.g., 24 bits) e alta taxa de amostragem (e.g., >50 kS/s) para capturar com precisão a forma de onda da vibração e dos choques.
- **Armazenamento Local:** Um cartão microSD de alta capacidade (e.g., 64 GB ou 128 GB) será usado para buffer local dos dados, garantindo que nenhuma informação seja perdida em caso de falha de conectividade.

7.4. Conectividade e Transmissão de Dados (Módulo IoT)

Para garantir a transmissão de dados de qualquer local, a conectividade celular é essencial.

- **Módulo de Comunicação:** Será integrado um módulo 4G/LTE com fallback para 3G/GSM, como os da série **SIM7600**, que oferecem cobertura para múltiplas bandas globais.²²
- **Geolocalização (GNSS):** O módulo de comunicação também incluirá funcionalidade GNSS (GPS, GLONASS) para rastrear a localização do motor em tempo real, permitindo correlacionar eventos de choque com locais específicos no trajeto.
- **Protocolo de Comunicação:** A transmissão de dados para a nuvem será feita utilizando o protocolo **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)**, que é leve, eficiente e ideal para aplicações IoT com conectividade intermitente.²⁴

7.5. Fonte de Alimentação e Autonomia

O sistema deve operar de forma autônoma durante todo o período de transporte, que pode durar dias ou semanas.

- **Fonte Principal:** Um banco de baterias de Lítio-Íon recarregáveis (e.g., conjunto de células 18650) de alta capacidade será a fonte de energia primária.²⁶
- **Gerenciamento de Energia:** Será utilizado um módulo de gerenciamento de energia (UPS - Uninterruptible Power Supply) projetado para o Raspberry Pi. Este módulo

gerencia o carregamento da bateria, fornece uma saída de tensão estável para todos os componentes e permite o desligamento seguro do sistema em caso de bateria fraca, evitando a corrupção de dados.

- **Fonte de Carregamento:** O sistema poderá ser recarregado através de uma porta USB-C ou, para autonomia estendida em armazenamento externo, poderá ser conectado a um painel solar de pequeno porte, uma vez que algumas placas de desenvolvimento já oferecem essa interface.²²

7.6. Invólucro e Proteção Física

O hardware eletrônico deve ser protegido contra as severas condições do ambiente de transporte.

- **Caixa de Proteção:** Todos os componentes eletrônicos (Raspberry Pi, módulo 4G, gerenciador de energia) serão alojados em um invólucro industrial com certificação IP67, que garante proteção total contra poeira e imersão temporária em água.²⁹
- **Material e Montagem:** O invólucro será fabricado em material robusto como ABS ou alumínio e será montado de forma segura no skid de transporte, com conectores vedados para as antenas externas (4G e GNSS) e para os cabos dos sensores.

7.7. Plataforma de Nuvem e Análise de Dados

A plataforma de nuvem é o destino final dos dados, onde eles são transformados em informação açãoável.

- **Provedor de Nuvem:** Será utilizada a plataforma **Amazon Web Services (AWS)** por sua escalabilidade, segurança e amplo portfólio de serviços IoT.³³
- **Serviços Utilizados:**
 - **AWS IoT Core:** Para gerenciar a conexão segura dos dispositivos, autenticação e o roteamento de mensagens via MQTT.³⁵
 - **Armazenamento de Dados:** Os dados de série temporal (vibração, temperatura) serão armazenados em um banco de dados otimizado para esse fim, como o **InfluxDB** ou o **Amazon Timestream**.²⁵
 - **Análise e Alertas:** Funções AWS Lambda serão usadas para processar os dados em tempo real, detectar anomalias (picos de choque acima de um limiar, por exemplo) e disparar alertas via e-mail ou SMS.
- **Visualização (Dashboard):** Os dados serão visualizados em um dashboard interativo

criado com o **Grafana** ou o **AWS QuickSight**.²⁵ O dashboard exibirá:

- Um mapa com a rota do transporte em tempo real.
- Gráficos de aceleração (RMS) e temperatura ao longo do tempo.
- Um log de eventos de choque, marcados no mapa e no gráfico.
- O estado da bateria e da conectividade do dispositivo.

Este sistema de monitoramento fornecerá uma "caixa-preta" para o transporte de cada motor, garantindo total transparência sobre as condições enfrentadas pelo ativo e validando a eficácia das soluções de proteção mecânica implementadas.

Conclusão e Recomendações

Este plano de trabalho mestre detalha uma abordagem de engenharia sistemática e rigorosa para o desenvolvimento de uma solução de transporte de motores elétricos de última geração. A integração de um skid estrutural de alta rigidez com mancais bipartidos intermediários de remoção rápida, validada por simulações dinâmicas avançadas e testes físicos, representa um avanço significativo em relação às práticas convencionais.

As principais conclusões e recomendações derivadas desta análise são:

1. **Adoção de uma Filosofia de Sistema Integrado:** O sucesso do projeto depende da compreensão de que o skid, os mancais e os sistemas de travamento não são componentes isolados, mas um sistema único e interdependente. A rigidez do skid afeta diretamente a eficácia dos mancais, e o design dos mancais dita a funcionalidade operacional no campo. Esta visão holística deve permear todas as fases do projeto, fabricação e operação.
2. **Priorização da Mitigação Ativa de Riscos Dinâmicos:** A ameaça do falso brinelamento é real e pode comprometer um ativo multimilionário antes mesmo de seu comissionamento. A confiança não pode ser depositada apenas em medidas passivas. A implementação de um **sistema de pré-carga axial controlada e verificável** é a intervenção de engenharia mais crítica e eficaz para neutralizar este risco. Recomenda-se que esta funcionalidade seja um requisito não-negociável do projeto.
3. **Inovação Focada na Eficiência Operacional do Cliente:** O maior diferencial competitivo e de valor agregado reside no projeto dos **mancais bipartidos de remoção rápida**. Ao eliminar uma etapa de içamento complexa e arriscada no local de instalação, esta solução oferece uma redução tangível no tempo de comissionamento, nos custos de mão de obra e, fundamentalmente, nos riscos de segurança. A engenharia deve ser centrada em tornar esta operação de campo o mais simples, rápida e segura possível.
4. **Validação Abrangente como Padrão:** A validação do projeto deve ir além da análise estática tradicional. A realização de **análise modal** e, especialmente, de **análise de**

vibração aleatória (Random Vibration) utilizando perfis de PSD normatizados, deve ser adotada como o procedimento padrão. Esta abordagem é a única maneira de quantificar a resposta do sistema ao ambiente de transporte real e validar o projeto contra os modos de falha dinâmicos.

5. **Ciclo de Melhoria Contínua:** O processo de validação deve ser fechado através de **testes físicos e instrumentação em campo**. O teste de carga estático e a análise modal experimental validam o modelo de FEA em condições controladas. A aquisição de dados de vibração durante transportes reais valida as premissas de carga dinâmica e calibra o modelo para futuras otimizações. Esta abordagem de "prever, validar, medir e refinar" estabelece um ciclo de melhoria contínua e constrói um nível de confiança inigualável no desempenho do sistema.

Seção 8: Sistema de Diagnóstico de Risco e Análise de Transporte com Agente de IA Integrado

Esta seção detalha a transição do sistema de monitoramento de um registrador de dados passivo para uma plataforma ativa e inteligente de diagnóstico e análise. O sistema proposto integra um agente de Inteligência Artificial (IA) que opera na nuvem, consumindo dados de sensores de alta fidelidade para realizar avaliações de risco em tempo real, análises físicas de eventos de choque e gerar relatórios de integridade automatizados para cada viagem. Esta camada de inteligência transforma dados brutos em insights acionáveis, fornecendo uma garantia de qualidade sem precedentes e uma base de dados para otimização logística contínua.

8.1. Arquitetura de Sistema para Diagnóstico Inteligente

A eficácia de qualquer sistema de diagnóstico baseado em IA depende fundamentalmente da qualidade e da integridade dos dados de entrada. A arquitetura aqui descrita expande a plataforma IoT definida anteriormente, incorporando hardware de geolocalização e sincronização de alta precisão e estabelecendo um pipeline de dados robusto para a plataforma de IA na nuvem. A sincronização temporal de alta resolução é o pilar fundamental

que sustenta a validade de todas as análises subsequentes, especialmente os cálculos físicos de força e energia.

8.1.1. Integração de Hardware: Módulo GNSS com Saída PPS (Pulse-Per-Second)

Para atender aos rigorosos requisitos de análise, o sistema de monitoramento embarcado será aprimorado com a integração de um módulo de Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) de alta performance, especificamente um que forneça uma saída de sinal de Pulso Por Segundo (PPS). Módulos como os da série u-blox, projetados para aplicações de temporização, são candidatos ideais para esta função.¹

O sinal PPS é um pulso elétrico de alta precisão gerado no início de cada segundo, alinhado com o Tempo Universal Coordenado (UTC) com uma exatidão na ordem de nanossegundos. A arquitetura de monitoramento existente, embora funcional para o registro geral de dados, depende de fontes de tempo que apresentam "jitter" (variação) inerente, como o tempo extraído de sentenças NMEA do GPS ou o tempo sincronizado via Network Time Protocol (NTP) sobre uma conexão celular. Essas fontes são inadequadas para a análise física detalhada exigida.

A necessidade de calcular a energia dissipada durante um evento de choque, por exemplo, exige a dupla integração numérica do sinal de aceleração para derivar o deslocamento.⁴ Este processo matemático é extremamente sensível a erros de temporização. Um pequeno desalinhamento ou jitter nos timestamps das amostras de aceleração, que são coletadas em alta frequência (dezenas de milhares de amostras por segundo), pode ser amplificado exponencialmente durante a integração, resultando em um cálculo de deslocamento e, consequentemente, de energia, completamente errôneo. Portanto, a inclusão de um módulo GNSS com saída PPS não é apenas uma melhoria para o rastreamento de localização; é um pré-requisito arquitetônico não negociável para garantir a fidelidade analítica necessária para os cálculos físicos solicitados. O sinal PPS serve como a referência de tempo "verdadeira" para todo o sistema de aquisição de dados.

8.1.2. Sincronização de Dados no Dispositivo de Borda (Edge Device)

O computador de placa única (SBC), como o Raspberry Pi 5, que atua como o cérebro do data logger, será configurado para utilizar o sinal PPS como sua principal fonte de

sincronização de tempo. O pulso elétrico da saída PPS do módulo GNSS será conectado a um pino de entrada/saída de propósito geral (GPIO) do SBC. O sistema operacional Linux será configurado com o módulo de kernel pps-gpio, que permite que o serviço de sincronização de tempo chrony utilize esses pulsos de hardware para disciplinar o relógio do sistema com uma precisão de microssegundos.²

Com o relógio do sistema rigorosamente sincronizado, cada amostra proveniente dos acelerômetros, digitalizada por um conversor analógico-digital (ADC) de alta resolução, receberá um timestamp de altíssima precisão no momento de sua aquisição. Simultaneamente, os dados de geolocalização (latitude e longitude) da sentença NMEA mais recente do GPS são associados ao fluxo de dados. O resultado é um fluxo de dados multimodal e firmemente sincronizado, onde cada medição de vibração pode ser correlacionada com um instante preciso no tempo e uma localização exata no espaço.⁸ Essa estrutura de dados coesa é essencial para a análise subsequente, permitindo que o agente de IA determine não apenas o que aconteceu (um choque severo), mas precisamente *quando* e *onde* ocorreu.

A tabela a seguir detalha as especificações dos componentes chave que compõem o sistema de aquisição de dados, destacando a precisão de temporização como um Indicador Chave de Desempenho (KPI) do sistema.

Tabela 8.1: Especificação dos Componentes de Hardware e Sincronização de Dados

Componente	Modelo de Referência	Especificação Crítica	Justificativa de Projeto
Acelerômetro Triaxial	PCB Piezotronics (tipo IEPE) ou similar	Faixa de Medição: 500g; Resposta de Frequência: 2 Hz a >10 kHz	Captura tanto vibrações de baixa frequência quanto choques transientes de alta amplitude, característicos do ambiente de transporte. ⁸
Módulo GNSS/GPS	u-blox LEA-M8T ou similar	Saída de sinal PPS com precisão < 30 ns (RMS); Taxa de atualização de posição: 10 Hz	Fornece a base para a sincronização de tempo em nível de hardware, essencial

			para a integridade dos cálculos de integração. ¹
Computador de Borda (SBC)	Raspberry Pi 5	Capacidade de processamento para amostragem >50 kS/s; Interface GPIO para captura de PPS	Oferece o poder computacional e as interfaces de hardware necessárias para executar a aquisição de dados de alta frequência e a sincronização via chrony. ²
Conversor A/D (DAQ)	Placa DAQ externa de 24 bits	Taxa de Amostragem: >50 kS/s por canal; Resolução: 24 bits	Garante a digitalização de alta fidelidade do sinal analógico do acelerômetro, preservando a forma de onda do choque para análise precisa. ³
Precisão de Timestamping	N/A	< 10 microsegundos (relativo ao UTC)	Este KPI, alcançado através da sincronização PPS, qualifica o sistema para realizar análises de integração numérica com erro minimizado, validando a base para os cálculos de energia.

8.1.3. Pipeline de Ingestão de Dados para a Nuvem (Google Cloud)

Seguindo a diretriz de utilizar os serviços da Google Cloud, a arquitetura de dados será implementada para garantir escalabilidade, resiliência e integração nativa com a plataforma de IA. O fluxo de dados do dispositivo de borda para a nuvem seguirá um padrão de arquitetura de streaming moderno e robusto.

Os pacotes de dados sincronizados, contendo timestamps, leituras de aceleração nos três eixos e coordenadas GPS, serão transmitidos do dispositivo de borda usando o protocolo MQTT. Este protocolo é leve e eficiente, ideal para aplicações IoT com conectividade celular que pode ser intermitente.⁸ O endpoint para essas mensagens será o serviço **Google Cloud Pub/Sub**, uma plataforma de mensageria assíncrona globalmente distribuída e altamente escalável.¹¹

O uso do Pub/Sub como ponto de entrada na nuvem desacopla os dispositivos de campo do backend de processamento.¹² Isso significa que o sistema de análise pode ser atualizado, escalado ou passar por manutenção sem afetar a coleta de dados dos dispositivos. Além disso, o Pub/Sub pode rotear os dados para múltiplos destinos simultaneamente, se necessário no futuro.

A partir do tópico Pub/Sub, os dados serão consumidos por um pipeline do **Google Cloud Dataflow**. O Dataflow é um serviço totalmente gerenciado para processamento de dados em lote e em tempo real. Neste pipeline, serão executadas tarefas de extração, transformação e carregamento (ETL) em tempo real, como:

- Conversão dos valores brutos do ADC para unidades de engenharia (g ou m/s²).
- Validação da integridade dos dados, verificando timestamps e a presença de todos os campos necessários.
- Enriquecimento dos dados, por exemplo, adicionando um ID de viagem ou o modelo do motor sendo transportado.

Este pré-processamento garante que os dados que chegam à plataforma de IA estejam limpos, consistentes e prontos para análise, uma prática recomendada fundamental para o sucesso de qualquer sistema de MLOps (Machine Learning Operations).¹⁴ O pipeline do Dataflow, por fim, entregará os dados processados aos serviços da **Vertex AI** para análise e armazenamento em **BigQuery** para consultas analíticas de longo prazo. Esta arquitetura não é apenas um duto de dados, mas uma fundação para um ecossistema de IA escalável e sustentável.

8.2. O Agente de IA: Processamento e Análise de Dados de Sensores

O "agente de IA" é o componente de software que reside na Google Cloud Vertex AI e executa a análise inteligente dos dados de sensores. Ele é projetado para operar de forma autônoma, aprendendo o comportamento "normal" do sistema de transporte e identificando desvios significativos que representam riscos potenciais ao ativo. A abordagem se baseia em aprendizado de máquina não supervisionado, pois não dispomos de um conjunto de dados pré-rotulado de falhas de transporte.

8.2.1. Detecção de Anomalias em Tempo Real com Random Cut Forest (RCF)

O núcleo do agente de diagnóstico em tempo real será uma implementação do algoritmo **Robust Random Cut Forest (RRCF)**.¹⁶ RCF é um algoritmo de aprendizado de máquina não supervisionado, projetado especificamente para a detecção de outliers (anomalias) em dados de streaming e de alta dimensionalidade, tornando-o perfeitamente adequado para esta aplicação.¹⁸

Diferentemente de um sistema de alerta baseado em limiares fixos (por exemplo, alertar se a aceleração exceder 5g), que é frágil e propenso a falsos positivos e negativos, o RCF adota uma abordagem baseada em padrões. O algoritmo constrói um conjunto (uma "floresta") de árvores de decisão binárias aleatórias a partir do fluxo de dados de entrada. Ele aprende a estrutura inerente dos dados "normais" de vibração e choque. Um ponto de dados é considerado anômalo se for "fácil de isolar" do resto dos dados na floresta, o que significa que ele requer poucos cortes aleatórios para ser separado em sua própria folha da árvore.²⁰

O resultado do algoritmo é um anomalyScore para cada ponto de dados, uma medida estatisticamente significativa de quão "incomum" aquele ponto é em relação ao comportamento aprendido do sistema.²² Esta abordagem permite detectar não apenas choques de alta amplitude, mas também desvios sutis no padrão de vibração, como o surgimento de uma nova frequência ou uma mudança na assinatura vibracional, que podem ser precursores de modos de falha como o falso brinelamento, causado por vibrações sustentadas de baixa amplitude.⁸ Esta mudança de uma lógica reativa baseada em limiares para uma detecção proativa baseada em padrões é o principal avanço que o agente de IA proporciona.

8.2.2. Aplicação de "Shingling" para Análise de Séries Temporais

Para aplicar o RCF, que opera em vetores de pontos, ao nosso fluxo de dados de série temporal, será utilizada uma técnica conhecida como "**shingling**" (ou janela deslizante). Em vez de alimentar amostras de aceleração individuais no algoritmo, o sistema agrupará amostras consecutivas em vetores de tamanho fixo, chamados "shingles". Por exemplo, um shingle pode ser um vetor contendo 256 leituras consecutivas do acelerômetro.¹⁶

Esta técnica transforma o problema de detectar pontos anômalos para detectar **padrões ou formas de onda anômalas**. A forma de um shingle capturando um choque transiente (como o impacto em um buraco na estrada) será drasticamente diferente — um pico agudo e de curta duração — da forma de um shingle capturando um período de vibração de alta frequência (como trafegar em uma estrada de superfície irregular).

O documento de projeto original distingue claramente os riscos associados a choques (causando "true brinelling") e a vibrações (causando "false brinelling").⁸ A técnica de shingling capacita o agente de IA a fazer essa distinção fundamental. Ao analisar a *forma* do evento encapsulada no shingle, em vez de apenas seu valor de pico, o algoritmo RCF pode atribuir pontuações de anomalia diferentes a eventos fisicamente distintos. Isso permite uma classificação de risco muito mais granular e significativa, alinhando diretamente a saída do modelo de IA com os modos de falha mecânicos que o sistema se propõe a mitigar.

8.2.3. Classificação e Priorização de Eventos de Risco

Um anomalyScore bruto, embora útil, precisa ser traduzido em uma classificação de risco açãoável. O agente de IA implementará um processo de triagem em duas etapas:

1. **Detecção:** Qualquer shingle cujo anomalyScore excede um limiar estatístico dinâmico (por exemplo, o percentil 99.9 de todas as pontuações observadas na viagem até o momento) será sinalizado como um "evento de anomalia" e extraído do fluxo de dados para análise mais aprofundada.
2. **Classificação:** Uma vez que um evento é detectado, o agente de IA analisará as características do sinal de aceleração dentro do shingle correspondente para classificá-lo em uma das seguintes categorias de risco:
 - **Risco Nível 1: Choque Transiente Severo.**
 - **Características:** Amplitude de pico muito alta (ex: >10g), curta duração (<100 ms), amplo conteúdo de frequência.
 - **Correlação Física:** Corresponde a eventos de impacto súbito, como buracos, lombadas em alta velocidade ou manuseio inadequado durante o içamento.
 - **Risco Associado:** Dano por impacto direto, "true brinelling" nos mancais, desalinhamento do rotor.⁸

- **Risco Nível 2: Vibração Ressonante Sustentada.**
 - **Características:** Amplitude moderada, duração prolongada (>1 s), um ou mais picos dominantes no espectro de frequência (identificados via Transformada Rápida de Fourier - FFT).
 - **Correlação Física:** Corresponde a trafegar em superfícies irregulares, ressonância estrutural do skid ou do veículo de transporte.
 - **Risco Associado:** Falso brinelamento ("false brinelling") nos mancais, que é o modo de falha mais insidioso durante o transporte.⁸
- **Risco Nível 3: Evento de Baixa Anomalia.**
 - **Características:** anomalyScore acima do limiar, mas não se enquadra nas categorias de Nível 1 ou 2.
 - **Correlação Física:** Eventos menores, manobras bruscas, mudanças na condição da estrada.
 - **Risco Associado:** Baixo risco imediato, mas útil para registro, análise de tendências e refinamento do modelo de IA.

Esta classificação estrutura a saída do agente de IA, permitindo que o sistema priorize alertas e forneça um contexto de engenharia claro para cada evento detectado.

8.3. Análise Física de Impactos e Turbulências

Para cada evento de anomalia classificado como "Choque Transiente Severo", o agente de IA executará cálculos baseados em princípios da física para quantificar a severidade do evento. Estes cálculos fornecem métricas de engenharia concretas que vão além da pontuação de anomalia, oferecendo uma avaliação quantitativa do estresse imposto ao ativo.

8.3.1. Cálculo da Força de Impacto (Pico)

A força de pico experimentada pelos componentes críticos do motor durante um evento de choque será calculada utilizando a Segunda Lei de Newton.⁶ A fórmula é:

$$F_{\text{pico}} = m a_{\text{pico}}$$

Onde:

- F_{pico} é a força de impacto de pico, em Newtons (N).
- a_{pico} é a aceleração de pico medida pelo acelerômetro durante o evento, convertida para m/s^2 .

- \$m\\$ é a massa, em quilogramas (kg).

Um ponto crucial nesta análise é a definição correta da massa m. Para avaliar o risco aos mancais do motor, a massa relevante não é a massa total do motor, mas sim a **massa do conjunto do rotor**. A principal preocupação durante um choque vertical, conforme detalhado no plano de projeto, é a força inercial gerada pela massa do rotor que é transmitida diretamente para os mancais principais, podendo causar danos como o "brinelling".⁸ Utilizar a massa total do motor calcularia a força nos pontos de fixação do skid ao veículo, que é um problema de engenharia estrutural distinto. Ao focar na massa do rotor, o cálculo da força quantifica diretamente o estresse nos componentes mais vulneráveis, tornando a métrica diretamente correlacionada ao risco de falha. O valor da massa do rotor para cada modelo de motor transportado deve ser um parâmetro de entrada configurável no sistema.

8.3.2. Estimativa da Energia Dissipada

A energia dissipada durante um evento de choque é uma medida da quantidade de energia que o sistema (motor e skid) absorveu e converteu, principalmente em deformação e calor. Uma estimativa desta energia pode ser obtida através do princípio do trabalho-energia, que relaciona o trabalho realizado sobre um corpo à sua mudança de energia cinética. O trabalho (W) é definido como a integral da força (F) ao longo do deslocamento (z):

$$W = \int F \cdot dz$$

Para calcular isso a partir dos dados do acelerômetro, é necessário um processo de integração numérica em duas etapas.⁴ No entanto, a integração de dados de sensores do mundo real é uma tarefa notoriamente difícil e propensa a erros significativos se não for tratada com o devido rigor. A simples aplicação de um algoritmo de integração a dados brutos de aceleração levará a resultados sem sentido, devido principalmente à amplificação de ruído de baixa frequência e qualquer offset de corrente contínua (DC) presente no sinal.²⁶

Para garantir a credibilidade do valor de energia calculado, o agente de IA implementará um pipeline de pré-processamento de sinal robusto para cada evento de choque a ser analisado:

1. **Janelamento (Windowing):** O evento de choque, identificado pelo algoritmo RCF, é isolado, criando um segmento de dados curto que captura todo o transiente, com uma pequena margem de tempo antes e depois.
2. **Remoção de Offset (Detrending):** Um filtro passa-alta de ordem baixa é aplicado ao segmento de aceleração para remover qualquer componente DC ou desvio de baixa frequência. Este passo é crucial para evitar que a integração resulte em um desvio

- ("drift") irrealista.
3. **Primeira Integração (Velocidade):** O sinal de aceleração filtrado é integrado numericamente para obter o perfil de velocidade ($v(t)$) durante o choque.
 4. **Verificação de Qualidade:** Uma verificação crítica é realizada neste ponto. Para um evento de choque isolado, a velocidade do sistema deve retornar a um valor próximo de zero após o término do evento. Se a velocidade final no final da janela de análise for significativamente diferente de zero, indica um problema nos dados ou no filtro, e o cálculo de energia para aquele evento é invalidado.
 5. **Segunda Integração (Deslocamento):** Se a verificação de velocidade for aprovada, o perfil de velocidade é integrado para obter o perfil de deslocamento ($z(t)$) durante o impacto.
 6. **Cálculo da Energia:** Com os perfis de força (calculado a partir da aceleração) e deslocamento, a energia dissipada é estimada numericamente calculando a área sob a curva força-deslocamento.

A implementação deste processo rigoroso demonstra uma compreensão madura dos desafios da análise de sinais do mundo real e garante que a métrica de energia dissipada seja uma estimativa fisicamente plausível e confiável da severidade do impacto.

8.4. Integração com a Plataforma Google Cloud Vertex AI

A implementação do agente de IA e de todo o fluxo de trabalho de análise será realizada na plataforma unificada **Google Cloud Vertex AI**. Esta plataforma oferece um conjunto integrado de ferramentas para gerenciar todo o ciclo de vida de aprendizado de máquina (MLOps), desde a ingestão de dados e treinamento de modelos até a implantação para inferência em tempo real e monitoramento contínuo.

8.4.1. Ciclo de Vida do Modelo de Anomalia (MLOps)

O modelo de detecção de anomalias RCF será gerenciado como um ativo de primeira classe dentro da Vertex AI, seguindo as melhores práticas de MLOps para garantir robustez, versionamento e manutenibilidade.

- **Treinamento e Registro:** O modelo RCF será treinado inicialmente em um conjunto de dados históricos de viagens consideradas "normais". Uma vez treinado, o modelo será

registrado no **Vertex AI Model Registry**. O registro de modelos fornece um repositório centralizado para versionar e gerenciar todos os modelos de ML, mantendo um registro de qual conjunto de dados foi usado para treinar cada versão.³⁰

- **Implantação para Inferência:** O modelo registrado será implantado em um **Vertex AI Endpoint**. Este serviço fornece um endpoint de API escalável e de baixa latência, capaz de receber o fluxo de dados de sensores do pipeline do Dataflow e retornar o anomalyScore em tempo real.
- **Monitoramento de Desempenho e Drift:** Uma consideração crucial para a confiabilidade a longo prazo do agente de IA é o monitoramento de "data drift". O perfil de vibração "normal" de um transporte não é estático; ele pode mudar ao longo do tempo devido a fatores como a introdução de novos modelos de caminhões na frota, mudanças sazonais nas condições das estradas ou alterações nos procedimentos de amarração da carga. Se o modelo de IA não for atualizado para refletir essas mudanças, sua capacidade de distinguir anomalias verdadeiras de novos padrões normais irá se degradar.

Para mitigar isso, o serviço **Vertex AI Model Monitoring** será configurado. Este serviço irá amostrar continuamente os dados de entrada que chegam ao endpoint de inferência e comparar sua distribuição estatística com a distribuição dos dados de treinamento originais. Para características numéricas, ele calcula a divergência Jensen-Shannon entre as duas distribuições. Se essa divergência exceder um limiar pré-definido, um alerta é acionado. Este alerta sinaliza para a equipe de engenharia que o modelo está "desatualizado" e precisa ser retreinado com dados mais recentes. Este ciclo de monitoramento e retreinamento automatizado transforma o agente de IA de uma ferramenta estática em um sistema vivo que se adapta e mantém sua precisão ao longo do tempo.

8.4.2. Análise Geoespacial de Risco

Todos os eventos de anomalia classificados (Níveis 1, 2 e 3), enriquecidos com suas coordenadas GPS e as métricas físicas calculadas (força de pico, energia dissipada), serão armazenados de forma persistente no **Google BigQuery**. BigQuery é o data warehouse sem servidor da Google Cloud, otimizado para análises em grande escala e nativamente integrado com a Vertex AI e outras ferramentas de visualização.

O armazenamento desses dados estruturados abre uma nova dimensão de análise que transcende o monitoramento de uma única viagem. Enquanto um relatório individual responde *o que aconteceu e onde* em uma viagem específica, a agregação de dados de centenas ou milhares de viagens no BigQuery permite identificar padrões estratégicos.

A equipe de logística poderá executar consultas geoespaciais para identificar "hotspots" de

risco: localizações geográficas específicas — como um trecho de rodovia mal conservado, um pátio portuário com manuseio inadequado ou um cruzamento ferroviário problemático — onde eventos de choque e vibração severos ocorrem repetidamente em diferentes viagens.

Esses dados agregados podem ser visualizados em um mapa de calor de risco, por exemplo, usando o Looker Studio. Esta visualização fornece uma inteligência proprietária e de alto valor, permitindo que a empresa:

- Otimize proativamente as rotas para futuros transportes de ativos de alto valor, evitando áreas de risco conhecido.
- Forneça feedback quantitativo para transportadoras sobre a qualidade de suas operações.
- Justifique investimentos em soluções de transporte mais robustas, com base em dados históricos de risco.

Esta capacidade transforma o sistema de um simples monitor de integridade de ativos em uma ferramenta estratégica para a otimização de toda a cadeia logística, reduzindo fundamentalmente a probabilidade de danos futuros.

8.5. Geração Automatizada de Relatórios de Viagem com IA Generativa (Gemini)

A etapa final do processo de análise é a tradução dos dados técnicos e estruturados gerados pelo agente de IA em um relatório profissional, conciso e de fácil compreensão para as partes interessadas (gerentes de projeto, clientes, equipes de instalação). Esta tarefa será realizada por um Modelo de Linguagem Grande (LLM), como o **Gemini** da Google, através de uma estratégia de engenharia de prompts cuidadosamente projetada.

8.5.1. Estrutura de Dados de Entrada para o Modelo Generativo

A confiabilidade da saída de um LLM é diretamente proporcional à qualidade e estrutura de sua entrada. Antes de invocar o modelo Gemini, o sistema irá compilar todos os dados relevantes de uma única viagem em um objeto JSON bem definido. Este objeto servirá como o contexto completo para a geração do relatório, atuando como um "contrato de API" entre o agente de IA analítico e o agente de IA generativo.³⁴ Uma estrutura consistente e com nomes de campo descritivos é essencial para que o modelo possa interpretar os dados

corretamente.

A tabela abaixo define o esquema JSON para cada evento de anomalia que será incluído no objeto de entrada principal.

Tabela 8.2: Estrutura de Dados JSON para Eventos de Anomalia

Campo	Tipo de Dados	Descrição	Exemplo
event_id	String	Identificador único para o evento de anomalia.	"EVT-20251026-A3F8"
timestamp_utc_pps	String (ISO 8601)	Timestamp de alta precisão (sincronizado por PPS) do início do evento.	"2025-10-26T14:32:10.123456Z"
gps_latitude	Number	Coordenada de latitude do evento.	-23.550520
gps_longitude	Number	Coordenada de longitude do evento.	-46.633308
event_duration_ms	Number	Duração do evento de anomalia em milissegundos.	85.5
peak_acceleration_g	Number	Aceleração de pico registrada durante o evento, em unidades de g.	12.8
dominant_frequency_hz	Number (Nullable)	Frequência dominante (se aplicável, para eventos de vibração), em Hz.	45.2

anomaly_score	Number	A pontuação de anomalia atribuída pelo modelo RCF.	9.88
risk_classification	String (Enum)	A classificação de risco atribuída: "Choque Severo", "Vibração Sustentada".	"Choque Severo"
calculated_impact_force_N	Number (Nullable)	Força de impacto de pico calculada, em Newtons.	85000
estimated_dissipated_energy_J	Number (Nullable)	Energia dissipada estimada durante o evento, em Joules.	450

8.5.2. Estratégia de Prompt Engineering em Múltiplas Etapas (Chain Prompting)

Em vez de usar um único prompt monolítico para gerar o relatório completo — uma abordagem que pode levar a resultados inconsistentes ou incompletos — será empregada uma estratégia de **"chain prompting"** (encadeamento de prompts).³⁶ Esta técnica divide a tarefa complexa de geração de relatórios em uma sequência de etapas lógicas e menores. Cada etapa utiliza um prompt específico, e a saída de uma etapa se torna a entrada para a próxima. Esta abordagem melhora drasticamente a qualidade, controle e confiabilidade da saída final.

A metodologia combinará várias práticas recomendadas de engenharia de prompts, incluindo a atribuição de um "papel" (persona) ao modelo, o fornecimento de contexto rico e a solicitação de saídas estruturadas.³⁸ O fluxo de trabalho será o seguinte:

1. **Prompt 1: Sumarização e Triagem de Dados.** Nesta primeira etapa, o modelo atua como um analista de dados. Sua tarefa é processar o array JSON completo de eventos de anomalia e extrair as informações mais críticas, apresentando-as de forma estruturada.
2. **Prompt 2: Interpretação Técnica e Avaliação de Risco.** Com os dados mais severos já

isolados, o modelo assume o papel de um engenheiro de confiabilidade. Sua tarefa é interpretar esses dados no contexto específico do equipamento transportado, explicando os riscos técnicos associados com base no conhecimento de domínio fornecido.

3. **Prompt 3: Composição e Formatação do Relatório Final.** Na etapa final, o modelo atua como um redator técnico. Ele recebe as saídas estruturadas das etapas anteriores e as compõe em um relatório narrativo coeso, profissional e bem formatado, pronto para ser entregue ao cliente.

A tabela a seguir fornece exemplos concretos dos prompts a serem usados em cada etapa deste fluxo de trabalho, servindo como um guia de implementação para a interação com a API do Gemini.

Tabela 8.3: Exemplos de Prompts para o Modelo Generativo (Gemini)

Etapa	Persona do Modelo	Prompt de Entrada (Template)	Objetivo do Prompt
1. Sumarização e Triagem	"Você é um analista de dados especialista em processar dados de telemetria de transporte. Sua tarefa é analisar os dados brutos e extrair os eventos mais significativos."	Dado o seguinte array JSON de eventos de anomalia de transporte para o motor elétrico modelo {motor_model} na viagem {trip_id}: \n\n{json_data_array} \n\nSua tarefa é: \n1. Identificar os 3 (três) eventos classificados como "Choque Severo" com o maior valor de 'calculated_impact_force_N'. \n2. Identificar o evento classificado como	Extrair e estruturar os dados mais críticos, reduzindo o "ruído" para a próxima etapa de análise e garantindo que o foco esteja nos eventos de maior risco.

		<p>"Vibração Sustentada" com a maior duração ('event_duration_ms'). \n3. Gerar um resumo em formato de tabela Markdown contendo os seguintes campos para cada evento identificado:</p> <ul style="list-style-type: none"> 'timestamp_utc_pps', 'risk_classification', 'peak_acceleration_g', 'calculated_impact_force_N'. 	
2. Interpretação e Risco	"Você é um engenheiro de confiabilidade mecânica, especialista em máquinas rotativas de grande porte e nos modos de falha associados ao transporte."	<p>Com base na seguinte tabela de eventos críticos de transporte:</p> <pre>\n\n{markdown_table_from_step_1}\n\nE considerando que o ativo transportado é um motor elétrico de precisão, escreva uma avaliação de risco técnico. Em sua análise, explique sucintamente os potenciais mecanismos de dano que podem ser causados por estes eventos, referenciando</pre>	<p>Adicionar uma camada de interpretação de engenharia, traduzindo os números (g, N) em implicações físicas e riscos concretos para o ativo, utilizando o conhecimento de domínio pré-estabelecido.⁸</p>

		<p>conceptos como "true brinelling" (causado por choques de alto impacto) e "false brinelling" (causado por vibração sustentada). Seja objetivo e baseie sua análise estritamente nos dados fornecidos.</p>	
3. Composição Final	"Você é um redator técnico responsável por preparar relatórios de integridade de ativos para clientes finais. Seu estilo é claro, profissional e conclusivo."	<p>Use as seguintes informações para compor um "Relatório de Integridade de Fim de Viagem" completo para a viagem {trip_id} do motor {motor_model}.</p> <p>\n\n**Resumo Executivo:**\n\n{\executive_summary_text}</p> <p>\n\n**Tabela de Eventos Críticos:**\n\n{\markdown_table_from_step_1}</p> <p>\n\n**Avaliação de Risco Técnico:**\n\n{\risk_assessment_text_from_step_2}</p> <p>\n\nEstruture o relatório final com os seguintes cabeçalhos:</p> <p>\n1. Sumário da Viagem</p> <p>\n2. Análise de</p>	<p>Montar as peças analisadas em um documento final coeso, bem estruturado e com um tom profissional, garantindo que o produto final seja de alta qualidade e pronto para o consumo pelo cliente.</p>

		<p>Eventos de Transporte Significativos \n3. Avaliação de Risco à Integridade do Ativo \n4. Conclusão \n\nNa seção de conclusão, forneça uma declaração final sobre a qualidade geral da viagem (ex: "sem anomalias severas", "com eventos de choque que requerem atenção", etc.).</p>	
--	--	--	--

Este processo de geração de relatórios, integrado ao sistema IoT, conclui o ciclo de dados, transformando medições de campo em documentação de certificação de qualidade, de forma totalmente automatizada e inteligente.

A implementação deste plano de trabalho resultará em um sistema de transporte que não apenas atende, mas excede os mais altos padrões de segurança estrutural e preservação de ativos. Mais importante, ele entregará um valor operacional claro ao cliente final, solidificando a reputação do fornecedor como um líder em excelência de engenharia e soluções focadas no cliente.

Referências citadas

1. Feature - STLE, acessado em outubro 22, 2025,
https://www.stle.org/files/TLTArchives/2023/06_June/Feature.aspx
2. Acoplamento para cargas pesadas - DirectIndustry, acessado em outubro 22, 2025,
<https://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/acoplamento-cargas-pesadas-113328.html>
3. APLICAÇÃO AXIAL (montado pela ponta do Eixo ou Furo) - Anelbras, acessado em outubro 22, 2025,
<https://www.anelbras.com.br/produtos/3/aplicao-axial-montado-pela-ponta-do-eixo-ou-furo>
4. Eixo planetário para transporte pesado P600™ | Cummins Inc., acessado em

outubro 22, 2025,

<https://www.cummins.com/pt/components/drivetrain-systems/axles/single-rear-drive/p600>

5. Soluções de Transporte Pesado - Pandrol, acessado em outubro 22, 2025,
<https://www.pandrol.com/pt-br/solucoes-de-transporte-pesado/>
6. O que é pré-carga do rolamento? Como é medido? - Notícias, acessado em outubro 22, 2025,
<https://pt.suvbearing.com/news/what-is-bearing-preload-how-is-it-measured-71657162.html>
7. Seleção de pré-carga - SKF, acessado em outubro 22, 2025,
<https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-execution/selecting-internal-clearance-or-preload/selecting-preload>
8. Como determinar a força de pré-carga correta ao instalar o rolamento? - Conhecimento, acessado em outubro 22, 2025,
<https://pt.sgsabearing.com/info/how-to-determine-the-correct-preload-force-when-85876751.html>
9. Como entender o cálculo de cargas em rolamentos-FHD, acessado em outubro 22, 2025, <https://fhdbearings.com/pt/blog/calculation-of-loads-on-bearings/>
10. Acelerômetros Piezoelétricos (Resposta CA) - TE Connectivity, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.te.com/pt/products/sensors/vibration-sensors/piezoelectric-accelerometers.html>
11. Calibração dos acelerômetros: por que os acelerômetros MEMS não necessitam de calibragem? - Blog WEG Digital & Sistemas, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.weg.net/digital/blog/calibracao-dos-acelerometros-por-que-os-acelerometros-mems-nao-necessitam-de-calibragem/>
12. Acelerômetro de alta sensibilidade - Todos os fabricantes do setor industrial - DirectIndustry, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/acelerometro-alta-sensibilidade-185628.html>
13. Sensor de vibração e temperatura para manutenção preditiva - Dynamox, acessado em outubro 29, 2025, <https://dynamox.net/sensors>
14. Data Logger de Vibrações, Temperatura, Umidade e Pressão - UltraShock - MadgeTech, acessado em outubro 29, 2025,
<https://hepta-instrumentos.com.br/produtos/datalogger-de-vibracoes-temperatura-umidade-e-pressao-ultrashock-madgetech/>
15. Sensor de vibração - HSM Automação, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.hsmautomacao.com.br/produtos/sensores-industriais/sensor-de-vibracao>
16. Acelerômetros Industriais | Monitoramento de Vibração - Engefaz, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.engefaz.com/servicos/acelerometros/>
17. PCB Piezotronics – Sensores de vibração, acústica, pressão, força, choque e aplicações industriais., acessado em outubro 29, 2025,
<https://wwwpcbpiezotronics.com.br/>

18. Acelerômetros IMI - Temposonics Brasil, acessado em outubro 29, 2025, <https://temposonics.com.br/accelerometros/>
19. Raspberry Pi Data Logger Guide - Technetron Electronics, acessado em outubro 29, 2025, <https://technetronelectronics.com/raspberry-pi-data-logger-guide/>
20. Completely new to Raspberry Pi. Need to build logger for work., acessado em outubro 29, 2025, <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=222024>
21. Need help in using RP 4 as a DATA LOGGER for an industrial application, acessado em outubro 29, 2025, <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=360454>
22. ESP32-S3 SIM7670G 4G Development Board, LTE Cat-1 / WiFi / Bluetooth / GNSS Positioning Support, Global Coverage Multi Band - Waveshare, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.waveshare.com/esp32-s3-sim7670g-4g.htm>
23. ESP32 4G LTE Gateway (Gen.1) - PCB Artists, acessado em outubro 29, 2025, <https://pcbartists.com/product/esp32-4g-lte-gateway-gen1/>
24. VIBGUARD IIoT - Pruftechnik, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.pruftechnik.com/pt/produtos-e-servi%C3%A7os/sistemas-de-monitoramento-de-condi%C3%A7%C3%A3o/monitoramento-de-condi%C3%A7%C3%A3o%C3%BC/B5es-on-line/sistemas-de-monitoramento-de-condi%C3%A7%C3%A7%C3%BC/B5es-on-line/vibguard-iot/>
25. Historian - armazenamento de banco de dados - Dewesoft, acessado em outubro 29, 2025, <https://dewesoft.com/pt/produtos/historian>
26. Aspectos Avançados em Engenharia de Software: IoT e Desenvolvimento de Sistemas Embarcados e Aprendizado de Máquina Aplicada - Vinicius Cardoso Garcia, acessado em outubro 29, 2025, <https://viniciusgarcia.me/development/aspectos-avancados-em-engenharia-de-software-iot-sistemas-embarcados-aprendizado-de-maquina/>
27. Sistemas Embarcados, acessado em outubro 29, 2025, http://cm-kls-content.s3.amazonaws.com/201801/INTERATIVAS_2_0/SISTEMAS_EMBARCADOS/U1/LIVRO_UNICO.pdf
28. Quais são os tipos de fontes de alimentação? - TS Shara, acessado em outubro 29, 2025, <https://tsshara.com.br/blog/acessorios-racks/quais-sao-os-tipos-de-fontes-de-alimentacao/>
29. SE-230 Invólucro de plástico IP-67 para serviço pesado - altinkaya, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.altinkaya.com/pt/shop/se-230-involutro-de-plastico-ip-67-para-servico-pesado-984>
30. IHM ultra robusta com invólucro totalmente IP67 - Turck do Brasil Automação Ltda., acessado em outubro 29, 2025, https://www.turck.com.br/pt/novidades-de-produtos-2860_ihm-ultra-robusta-com-involutro-totalmente-ip67-38781.php
31. REMOTAS IP67 MURRELEKTRONIK - Partnner Automação Industrial, acessado em outubro 29, 2025, <https://partnner.com.br/product/remotas-ip67-murrelektronik/>
32. O que é IP67 à prova d'água? - SINSMART, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.sinsmarts.com/pt/blog/what-is-ip67-waterproof/>
33. Google Cloud: Serviços de computação em nuvem, acessado em outubro 29,

- 2025, <https://cloud.google.com/?hl=pt-BR>
34. AWS IoT – Industrial, Consumer, Commercial, Automotive, acessado em outubro 29, 2025, <https://aws.amazon.com/iot/>
35. AWS IoT Device Management, acessado em outubro 29, 2025, <https://aws.amazon.com/iot-device-management/>
36. AWS IoT Core Features - Amazon Web Services, acessado em outubro 29, 2025, <https://aws.amazon.com/iot-core/features/>
37. BerryGPS-IMU V4 - ozzmaker.com, acessado em outubro 29, 2025, <https://ozzmaker.com/product/berrygps-imu/>
38. Revisiting Microsecond Accurate NTP for Raspberry Pi with GPS ..., acessado em outubro 29, 2025, <https://austinsnerdythings.com/2025/02/14/revisiting-microsecond-accurate-ntp-for-raspberry-pi-with-gps-pps-in-2025/>
39. GPS Module for Raspberry Pi | 101861 - Smart Prototyping, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.smart-prototyping.com/L80-GPS-Module-compatible-Raspberry-Pi>
40. Calculation of the Dissipated Energy Spectrum from a Fourier Amplitude Spectrum - OSTI.gov, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1343804>
41. (PDF) A Data-Driven, Energy-based Approach for Identifying Equations of Motion in Vibrating Structures Directly from Measurements - ResearchGate, acessado em outubro 29, 2025, https://www.researchgate.net/publication/385186668_A_Data-Driven_Energy-based_Approach_for_Identifying_Equations_of_Motion_in_Vibrating_Structures_Directly_from_Measurements
42. Impact and Drop Testing - PCB Piezotronics, acessado em outubro 29, 2025, https://wwwpcb.com/Contentstore/mktgcontent/WhitePapers/WPL_5_Impact.pdf
43. Raspberry Pi 10 Hz GPS / IMU Data Logger - PageMac, acessado em outubro 29, 2025, https://www.pagemac.com/projects/rpi_gps_imu
44. Skid de Transporte para Motores Elétricos _ Segurança e Remoção Rápida.pdf
45. Measuring Vibration with Accelerometers - NI - National Instruments, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-vibration-with-accelerometers.html>
46. Use Amazon SageMaker AI Edge Manager on Greengrass core devices, acessado em outubro 29, 2025, <https://docs.aws.amazon.com/greengrass/v2/developerguide/use-sagemaker-edge-manager.html>
47. Pub/Sub Integrations | Google Cloud, acessado em outubro 29, 2025, <https://cloud.google.com/pubsub/integrations>
48. How to stream IoT & telematics data to Google IoT Cloud? - flespi, acessado em outubro 29, 2025, <https://flespi.com/kb/flespi-to-google>
49. Sending IoT's device data to Big Query using Google Cloud : r/googlecloud - Reddit, acessado em outubro 29, 2025,

https://www.reddit.com/r/googlecloud/comments/mawge8/sending_iots_device_data_to_big_query_using/

50. Vertex AI: What, Why & How for Jobs & Google Cloud Certification - K21 Academy, acessado em outubro 29, 2025,
<https://k21academy.com/ai-ml/google/simplifying-machine-learning-with-google-cloud-vertex-ai-key-tools-real-world-applications/>
51. Vertex AI Chronicles: Exploring End-to-End ML Solutions - NashTech Blog, acessado em outubro 29, 2025,
<https://blog.nashtechglobal.com/vertex-ai-chronicles-exploring-end-to-end-ml-solutions/>
52. kLabUM/rrcf: Implementation of the Robust Random Cut Forest algorithm for anomaly detection on streams - GitHub, acessado em outubro 29, 2025,
<https://github.com/kLabUM/rrcf>
53. Robust random cut forest based anomaly detection on streams - Amazon Science, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.amazon.science/publications/robust-random-cut-forest-based-anomaly-detection-on-streams>
54. Real-time anomaly detection via Random Cut Forest in Amazon Managed Service for Apache Flink | AWS Big Data Blog, acessado em outubro 29, 2025,
<https://aws.amazon.com/blogs/big-data/real-time-anomaly-detection-via-random-cut-forest-in-amazon-managed-service-for-apache-flink/>
55. What is Random cut forest algorithm? | by Sujatha Mudadla - Medium, acessado em outubro 29, 2025,
<https://medium.com/@sujathamudadla1213/what-is-random-cut-forest-algorithm-4f289594add0>
56. Random Cut Forest. The things you should know about this... | by Tapan Kumar Patro | Analytics Vidhya | Medium, acessado em outubro 29, 2025,
<https://medium.com/analytics-vidhya/random-cut-forest-321aae4d8a59>
57. Dynamic Anomaly Detection Using Robust Random Cut Forests in Resource-Constrained IoT Environments, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.informatica.si/index.php/informatica/article/download/6862/3488>
58. Anomaly detection in streaming time series data with online learning ..., acessado em outubro 29, 2025,
<https://aws.amazon.com/blogs/machine-learning/anomaly-detection-in-streaming-time-series-data-with-online-learning-using-amazon-managed-service-for-apache-flink/>
59. AWS Partner Webinar: Random Cut Forest on Amazon SageMaker - YouTube, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.youtube.com/watch?v=9BWHR4JsTNU>
60. Force, Acceleration, & Torque - OMEGA Engineering, acessado em outubro 29, 2025, <https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume3/force.html>
61. Measuring Shock and Vibration with Accelerometer Sensors - Dewesoft, acessado em outubro 29, 2025,
<https://dewesoft.com/blog/measure-shock-vibration-with-accelerometers>
62. MECHANICAL SHOCK SHAPE CALCULATION FROM ESTI- MATED

- ACCELEROMETER PARAMETERS, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.ioa.org.uk/system/files/publications/J%20KUNZ%20P%20BENE%C5%A0%20MECHANICAL%20SHOCK%20SHAPE%20CALCULATION%20FROM%20ESTIMATED%20ACCELEROMETER%20PARAMETERS.pdf>
63. MIL-STD-810H-Method-518.3-Pyroshock.pdf - CVG Strategy, acessado em outubro 29, 2025,
<https://cvgstrategy.com/wp-content/uploads/2019/08/MIL-STD-810H-Method-518.3-Pyroshock.pdf>
64. Slides - NESC Academy, acessado em outubro 29, 2025,
https://nescacademy.nasa.gov/review/downloadfile.php?file=webinar_42_shock_topics.pptx&id=468&distr=Public
65. Vertex AI Platform | Google Cloud, acessado em outubro 29, 2025,
<https://cloud.google.com/vertex-ai>
66. Introduction to Vertex AI | Google Cloud Documentation, acessado em outubro 29, 2025,
<https://docs.cloud.google.com/vertex-ai/docs/start/introduction-unified-platform>
67. Monitoring | Vertex AI | Google Cloud Documentation, acessado em outubro 29, 2025, <https://docs.cloud.google.com/vertex-ai/docs/featurestore/monitoring>
68. Introduction to Vertex AI Model Monitoring | Google Cloud Documentation, acessado em outubro 29, 2025,
<https://docs.cloud.google.com/vertex-ai/docs/model-monitoring/overview>
69. Anomaly Detection With Google Cloud - Meegle, acessado em outubro 29, 2025, https://www.meegle.com/en_us/topics/anomaly-detection/anomaly-detection-with-google-cloud
70. Enhancing Structured Data Generation with GPT-4o Evaluating Prompt Efficiency Across Prompt Styles - Frontiers, acessado em outubro 29, 2025,
<https://www.frontiersin.org/journals/artificial-intelligence/articles/10.3389/frai.2025.1558938/full>
71. Generate structured output (like JSON and enums) using the Gemini API | Firebase AI Logic, acessado em outubro 29, 2025,
<https://firebase.google.com/docs/ai-logic/generate-structured-output>
72. Prompt design strategies | Gemini API | Google AI for Developers, acessado em outubro 29, 2025, <https://ai.google.dev/gemini-api/docs/prompting-strategies>
73. My favorite prompt engineering technique for getting structured output from Gemini - Reddit, acessado em outubro 29, 2025,
https://www.reddit.com/r/generativeAI/comments/1mkv44l/my_favorite_prompt_engineering_technique_for/
74. Prompt Engineering for AI Guide | Google Cloud, acessado em outubro 29, 2025, <https://cloud.google.com/discover/what-is-prompt-engineering>
75. Use Gemini 2.0 to speed up data processing | Google Cloud Blog, acessado em outubro 29, 2025,
<https://cloud.google.com/blog/products/ai-machine-learning/use-gemini-2-0-to-speed-up-data-processing>