



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

APLICAÇÃO DE AGENTES INTELIGENTES NA MINERAÇÃO DE DADOS PARA

DIAGNÓSTICO DE FALHAS¹

SOBRE O AUTOR

Estevão Lima Rabelo - Engenheiro mecânico com ênfase em Mecatrônica (PUC Minas), com especializações em Engenharia de Segurança do Trabalho (UNINOVE) e Gestão em Logística Empresarial (FAAP). Atualmente cursa MBA em Data Science e Analytics (USP/ESALQ). Atua desde 2012 na CPTM, com sólida experiência em engenharia de manutenção, análise de falhas e confiabilidade de sistemas ferroviários. Desenvolve soluções em ciência de dados e inteligência artificial aplicadas à manutenção, com foco na transformação digital, na integração entre engenharia e tecnologia e no apoio à tomada de decisões técnicas.

¹ Artigo finalista do 12º Prêmio Tecnologia & Desenvolvimento Metroferroviários



APLICAÇÃO DE AGENTES INTELIGENTES NA MINERAÇÃO DE DADOS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS

INTRODUÇÃO

A Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), assim como outras grandes operadoras ferroviárias, enfrenta o desafio constante de garantir a disponibilidade, a confiabilidade e a segurança de seus ativos ao longo de todo o ciclo de vida operacional. Nesse contexto, a gestão de ativos, conforme sistematizada por Lafraia (2020), compreende um conjunto de práticas estratégicas voltadas ao equilíbrio entre custos, riscos e desempenho, integrando processos de planejamento, monitoramento e melhoria contínua. A manutenção se destaca como um dos pilares dessa abordagem,



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

sendo fundamental não apenas a execução técnica das intervenções, mas também a geração e o registro de informações de qualidade durante inspeções, reparos e análises de falhas. Em cenários nos quais a infraestrutura não conta com sistemas avançados de telemetria, os registros textuais oriundos de ordens de serviço e relatórios de falhas assumem papel central para o entendimento do histórico dos equipamentos, além de orientarem as ações corretivas e preventivas.

Apesar de sua importância, a utilização efetiva dos registros textuais de manutenção apresenta desafios significativos. A existência de campos de texto livre, destinados ao complemento de informações e preenchidos por diferentes profissionais sem padronização terminológica, contribui para a variabilidade e subjetividade na descrição das falhas, causas e intervenções realizadas. Essa heterogeneidade dificulta a estruturação dos dados e limita o uso direto dessas informações para análises quantitativas ou geração de indicadores confiáveis. Além disso, a ausência de telemetria em parte dos equipamentos amplia a dependência desses relatos escritos, que muitas vezes são complementados por registros paralelos, como planilhas e documentos informais, aumentando a fragmentação dos dados e a complexidade da análise histórica. Nesse contexto, a capacidade de integrar e correlacionar múltiplas fontes de informação torna-se fundamental, especialmente quando o objetivo é avançar para análises mais profundas, como a identificação de padrões e a realização de análises de causa raiz. Assim, desenvolver métodos automatizados capazes de interpretar e extrair conhecimento desses diferentes repositórios representa um passo estratégico para



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

transformar grandes volumes de dados não estruturados em conhecimento aplicável à gestão da manutenção e à tomada de decisão baseada em evidências.

Nos últimos anos, a inteligência artificial (IA) e o processamento de linguagem natural (PLN) revolucionaram a maneira como interagimos com informações. Esses avanços tornaram possível a automação de tarefas que antes exigiam intervenção humana, como a interpretação de registros textuais complexos. Impulsionados por grandes centros de pesquisa, os modelos de linguagem em larga escala (LLMs - Large Language Models) atualmente demonstram a capacidade de compreender, sintetizar e gerar conteúdos em linguagem natural com uma precisão que, de maneira inédita, se aproxima da capacidade de raciocínio humana (Brown et al., 2020; Vaswani et al., 2017).

Mais recentemente, esses avanços possibilitaram o surgimento de arquiteturas fundamentadas em sistemas multiagentes, nos quais múltiplos agentes autônomos e especializados atuam de forma coordenada para resolver problemas de maior complexidade. Embora o conceito de sistemas multiagentes já seja aplicado desde a década de 1990 em diversos domínios, a adoção de agentes baseados em LLMs é um fenômeno extremamente recente, com as primeiras aplicações práticas e pesquisas relevantes emergindo apenas a partir de 2023/2024 (Guo et al., 2024). Nessa nova abordagem, os agentes não apenas tomam decisões autônomas, mas também compreendem e geram linguagem natural, tornando-se capazes de integrar diferentes fontes e formatos de dados, além de colaborar em análises complexas. Estudos recentes demonstram que sistemas multiagentes baseados em LLMs apresentam desempenho



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

superior à atuação isolada de agentes especialistas, sobretudo em contextos que demandam integração de conhecimentos dispersos, tomada de decisão colaborativa e interpretação de dados ambíguos ou incompletos (Nori et al., 2025). Essa abordagem tem expandido as possibilidades de automação, viabilizando a análise semântica avançada de registros textuais de manutenção e oferecendo suporte efetivo à gestão de ativos em cenários reais.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma aplicação pioneira desenvolvida na CPTM, na qual foi concebida uma arquitetura baseada em sistemas multiagentes especializados para atuar sobre registros textuais de falhas e ordens de serviço de manutenção. O sistema é composto por diferentes agentes autônomos, cada um projetado para desempenhar funções específicas. A principal inovação reside na capacidade desses agentes de compreender e interpretar linguagem natural, viabilizando a extração automática de palavras-chave, padrões e relações entre equipamentos, componentes e modos de falha, mesmo a partir de campos de texto livre e de bases complementares, como planilhas e registros informais, conforme ilustrado na Figura 1.

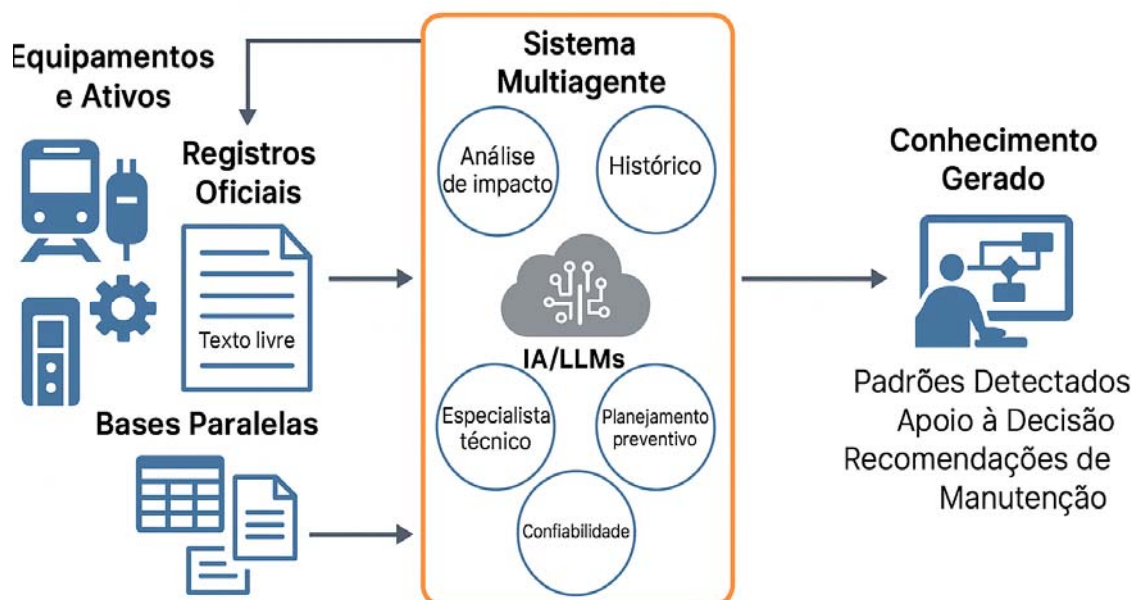


Figura 1: - Fluxo de Dados e Atuação do Sistema Multiagente. Fonte: Elaboração própria.

Ao integrar múltiplas fontes e promover a colaboração entre agentes com diferentes especializações, o sistema amplia significativamente o alcance e a robustez das análises, superando limitações impostas pela ausência de telemetria e pela fragmentação das informações. Além disso, a arquitetura proposta favorece a modularidade e a escalabilidade, permitindo futuras integrações com ferramentas analíticas externas, como modelos estatísticos e algoritmos de aprendizado de máquina, de modo a apoiar diagnósticos mais precisos e estratégias de manutenção baseadas em dados.

Dessa maneira, o projeto representa um avanço importante na digitalização e estruturação dos dados de manutenção, ao posicionar a abordagem multiagente como



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

uma ferramenta estratégica para transformar grandes volumes de informações técnicas em conhecimento aplicável à gestão de ativos e à tomada de decisão operacional

DIAGNÓSTICO

O sistema de manutenção da CPTM utiliza registros estruturados em sua base de dados, adotando campos padronizados para a classificação de avarias, causas e intervenções, os quais são preenchidos de acordo com protocolos operacionais estabelecidos. Paralelamente a esses campos estruturados, o sistema oferece áreas específicas para complementação em texto livre, possibilitando que os profissionais registrem detalhes e particularidades de cada ocorrência tanto na abertura das ordens de serviço quanto na descrição das intervenções realizadas.

A existência dos campos de texto livre é especialmente relevante, pois permite a captura de nuances operacionais, sintomas atípicos e informações contextuais que dificilmente seriam registrados apenas pelas categorias pré-definidas. Esse nível de detalhamento contribui para diagnósticos mais precisos e para uma compreensão mais aprofundada dos eventos, sendo fundamental tanto para análises retrospectivas quanto para a melhoria contínua dos processos de manutenção.

Apesar dessas vantagens, a subjetividade e a heterogeneidade presentes nesses relatos, aliadas ao grande volume de registros gerados diariamente, tornam a análise manual dessas informações uma tarefa desafiadora e pouco escalável. O esforço necessário para



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

triar, normalizar e consolidar dados provenientes de diferentes fontes demanda tempo significativo das equipes técnicas, o que pode atrasar ou dificultar a identificação de padrões de falha e de causas recorrentes, conforme ilustrado na Figura 2. Desafios relacionados ao tratamento de grandes volumes de dados não estruturados, bem como à necessidade de automação na análise dessas informações para apoiar o diagnóstico, a investigação de causas e a tomada de decisão em manutenção, são amplamente discutidos na literatura internacional sobre sistemas industriais complexos (Du et al., 2024; Nori et al., 2025).

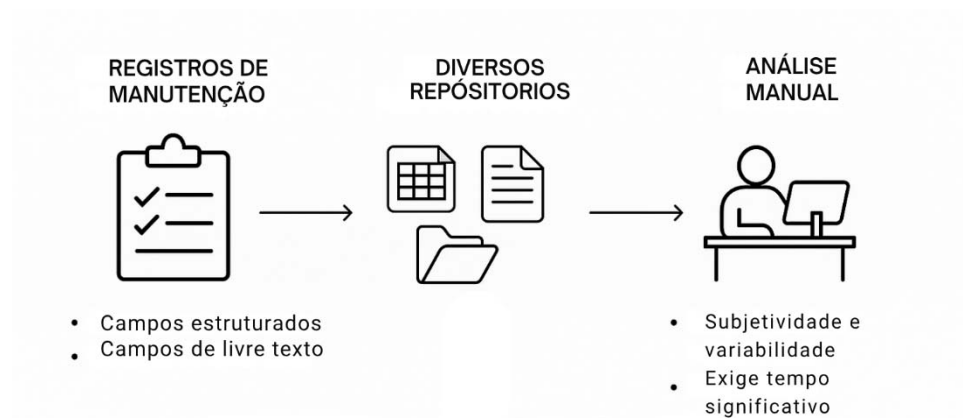


Figura 2: - Desafios dos registros de manutenção. Fonte: Elaboração própria.

Além disso, é comum que os campos de texto livre sejam utilizados para registrar informações não relacionadas diretamente ao atendimento técnico, como nomes de pessoas, contatos telefônicos e recados administrativos. Esse tipo de registro introduz ruído ao conjunto de dados e impõe desafios significativos quanto à privacidade e ao tratamento adequado das informações. A adoção de técnicas de pré-processamento, filtragem e anonimização torna-se, portanto, essencial para assegurar tanto a qualidade



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

das análises quanto a proteção dos dados sensíveis, em conformidade com princípios éticos e requisitos de segurança internacionalmente reconhecidos. No contexto brasileiro, destaca-se a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), que estabelece diretrizes rigorosas para o uso e o compartilhamento de informações pessoais.

A análise de falhas e de suas causas, bem como a avaliação de padrões recorrentes, exige uma abordagem estruturada, capaz de lidar com grandes volumes de registros, integrar diferentes tipos de dados e identificar relações não evidentes à primeira vista. Lafraia (2020) destaca que a efetividade da gestão de ativos está diretamente relacionada à qualidade das informações e à sistematização dos processos de análise, de modo a subsidiar decisões técnicas e estratégicas. Nesse contexto, a identificação da causa raiz de um problema torna-se essencial para o êxito das ações corretivas e preventivas. Conforme ressalta Montgomery (2020), a determinação precisa dessas causas constitui o alicerce para intervenções eficazes, possibilitando que as soluções adotadas incidam sobre a origem do problema, e não apenas sobre seus sintomas.

Diante desse cenário, a implementação de soluções inovadoras, como sistemas multiagentes inteligentes capazes de interpretar linguagem natural e integrar múltiplos repositórios de dados, configura-se como uma alternativa promissora. Tais soluções têm o potencial de apoiar o diagnóstico, a análise de causas e a gestão do conhecimento em manutenção, otimizando o uso do tempo, aprimorando a precisão das análises e promovendo maior eficiência na tomada de decisão operacional.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

SISTEMA MULTIAGENTE INTELIGENTE PARA MINERAÇÃO DE DADOS DE MANUTENÇÃO

Arquitetura Básica de um Agente Inteligente

Um agente inteligente pode ser projetado para atuar em diferentes domínios de conhecimento, adaptando sua base de informações conforme as demandas específicas de cada contexto de aplicação. A Figura 3 apresenta a arquitetura funcional desse agente. Tal agente integra LLMs, memória contextual, acesso a ferramentas e métodos avançados de gestão do conhecimento, como a Geração Aumentada por Recuperação (RAG) e o GraphRAG. Essas capacidades permitem que o agente compreenda linguagem natural, recupere informações atualizadas em bases externas, raciocine sobre relações estruturadas por meio de grafos semânticos, persista o contexto ao longo das interações e atue de forma autônoma sobre sistemas digitais. Dessa forma, o agente pode interagir tanto com humanos quanto com outros agentes para executar tarefas complexas em diferentes áreas, como manutenção, saúde, jurídico ou educação, bastando, para isso, a configuração adequada de sua base de conhecimento (Bommasani et al., 2021; Lewis et al., 2020; Han et al., 2025; Liu et al., 2023; Yao et al., 2022; Ferber, 1999; Russell e Norvig, 2021).



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

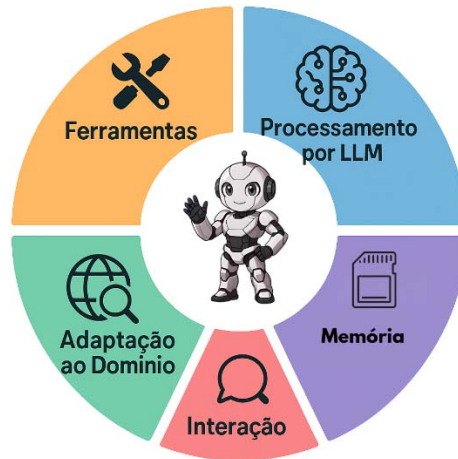


Figura 3 – Arquitetura funcional de um agente inteligente. Fonte: Elaboração própria.

Neste estudo, os agentes foram configurados para utilizar o modelo GPT-4.1-mini da OpenAI. A arquitetura adotada é flexível e permite facilmente a substituição por outros modelos, conforme as necessidades específicas de custo, desempenho ou contexto da aplicação. Dessa forma, o sistema pode ser personalizado para incorporar avanços futuros em modelos de linguagem (LLMs) ou adaptado para diferentes cenários, buscando sempre a melhor relação custo-benefício.

Importância da Divisão de Tarefas em Sistemas Multiagentes

A divisão de tarefas é um dos fundamentos centrais dos sistemas multiagentes, pois permite que problemas complexos sejam decompostos em sub-tarefas menores, mais gerenciáveis e especializadas. Conforme destacado por Ferber (1999) e Wooldridge et al. (2000), a fragmentação das atividades contribui para a atribuição de papéis claros a cada agente, promovendo flexibilidade, escalabilidade e adaptabilidade ao sistema.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Em contextos que envolvem grandes volumes de dados não estruturados, como na análise de registros de manutenção, essa abordagem contribui diretamente para a eficiência operacional, mitigando a sobrecarga de processamento e permitindo uma distribuição mais racional do esforço computacional.

Enxames de Agentes: Paralelismo, Colaboração e Eficiência

A adoção de enxames de agentes, que consiste em grupos de agentes atuando em paralelo sobre diferentes eventos ou componentes do problema, proporciona ganhos expressivos de eficiência e colaboração. Inspirado em conceitos de inteligência coletiva e sistemas distribuídos (Du et al., 2024), esse modelo viabiliza o processamento simultâneo de múltiplos registros, reduzindo significativamente o tempo total de análise.

Além disso, a abordagem baseada em enxames contribui para contornar limitações inerentes aos modelos de linguagem de larga escala, como o risco de contextos excessivamente longos ou a sobreposição de informações, uma vez que cada agente do enxame trabalha com um subconjunto específico dos dados. Esse mecanismo favorece o uso de modelos LLM menores e mais especializados, otimizando os recursos computacionais e promovendo maior precisão analítica.

Relação com Limitações e Potenciais dos LLMs

Embora os modelos de linguagem de larga escala (LLMs) apresentem grande potencial para análise de dados complexos, seu desempenho é limitado pela quantidade de



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

informações que conseguem processar simultaneamente. De acordo com Kostka e Chudziak (2025), a divisão do problema em tarefas menores, aliada à atuação de agentes especializados, contribui para superar essas restrições de contexto, além de otimizar o uso dos recursos computacionais.

Esse fracionamento do processamento permite configurar cada LLM de acordo com as demandas específicas de cada etapa, favorecendo a especialização dos agentes e prevenindo a perda ou diluição de informações relevantes. Como resultado, a abordagem multiagente amplia as possibilidades de aplicação dos LLMs em ambientes industriais, tornando os sistemas mais escaláveis, eficientes e adaptáveis às exigências dos dados técnicos.

Funcionamento Prático da Arquitetura Multiagente

A arquitetura do sistema multiagente foi desenvolvida para orquestrar a colaboração entre agentes especialistas, organizando a execução das tarefas conforme a complexidade e o volume de dados a serem processados. Inspirada nas recomendações clássicas de análise e design orientados a agentes (Wooldridge et al., 2000; Ferber, 1999) e alinhada às tendências atuais em agentes baseados em LLMs e context-awareness (Du et al., 2024; Kostka e Chudziak, 2025), a solução foi estruturada em módulos de agentes distribuídos em “enxames”, promovendo escalabilidade, especialização e robustez.

O processo tem início com o agente de impacto operacional, responsável por utilizar uma ferramenta conectada a um sistema de inteligência artificial para classificar os



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

equipamentos conforme o índice de criticidade de manutenção, identificando aquele que será objeto da análise de falhas. Na sequência, este agente aciona o agente de busca do histórico de manutenção, incumbido de listar todos os registros de eventos de falha relacionados ao equipamento selecionado, por meio de consultas à base de dados.

A partir da lista de eventos obtida, o agente de busca de histórico determina o número de agentes necessários para compor os enxames que atuarão nas próximas etapas. No primeiro enxame, os agentes de coleta e padronização de informações são encarregados de reunir todas as informações relativas a uma falha específica, estruturando os dados em um formato predefinido. Posteriormente, esses relatórios padronizados alimentam o segundo enxame, formado por agentes de limpeza de dados, cuja função é tratar os campos de texto livre, removendo ruídos e aprimorando a qualidade dos registros.

Na etapa seguinte, os relatórios tratados são encaminhados ao enxame de agentes de aprimoramento técnico, especializados em interpretar o contexto dos registros e enriquecer tecnicamente os campos de complemento, aplicando conhecimentos avançados sobre o funcionamento dos equipamentos. Em seguida, os engenheiros de síntese de falhas elaboram relatórios sintéticos, destacando as informações essenciais para o diagnóstico técnico. Após essa síntese, o enxame de engenheiros de análise de falhas aplica métodos estruturados, como os 5 Porquês e o Diagrama de Ishikawa, para investigar a causa raiz de cada evento, propondo recomendações corretivas e preventivas.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O resultado desse fluxo colaborativo é consolidado pelo engenheiro-chefe, que integra os relatórios de síntese e de análise de falhas em um documento técnico único. Esse documento apresenta o resumo dos eventos analisados, as principais causas e modos de falha, além de um plano de ação detalhado e priorizado.

Todo esse fluxo de interação e colaboração entre os diferentes agentes e enxames está sintetizado na Figura 4, que ilustra as principais entradas, saídas e conexões do sistema multiagente para mineração de dados de manutenção.

Essa abordagem, ao aliar a decomposição e especialização de tarefas à coordenação eficiente entre agentes, está alinhada aos princípios fundamentais da engenharia de sistemas multiagentes. Tal estratégia viabiliza flexibilidade, escalabilidade e eficiência na análise de grandes volumes de dados heterogêneos (Wooldridge et al., 2000; Ferber, 1999; Du et al., 2024; Kostka e Chudziak, 2025). Além disso, essa estrutura possibilita a incorporação de avanços recentes, como a colaboração mediada por linguagem natural (Gao et al., 2025) e o raciocínio distribuído sobre bases de conhecimento especializadas.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

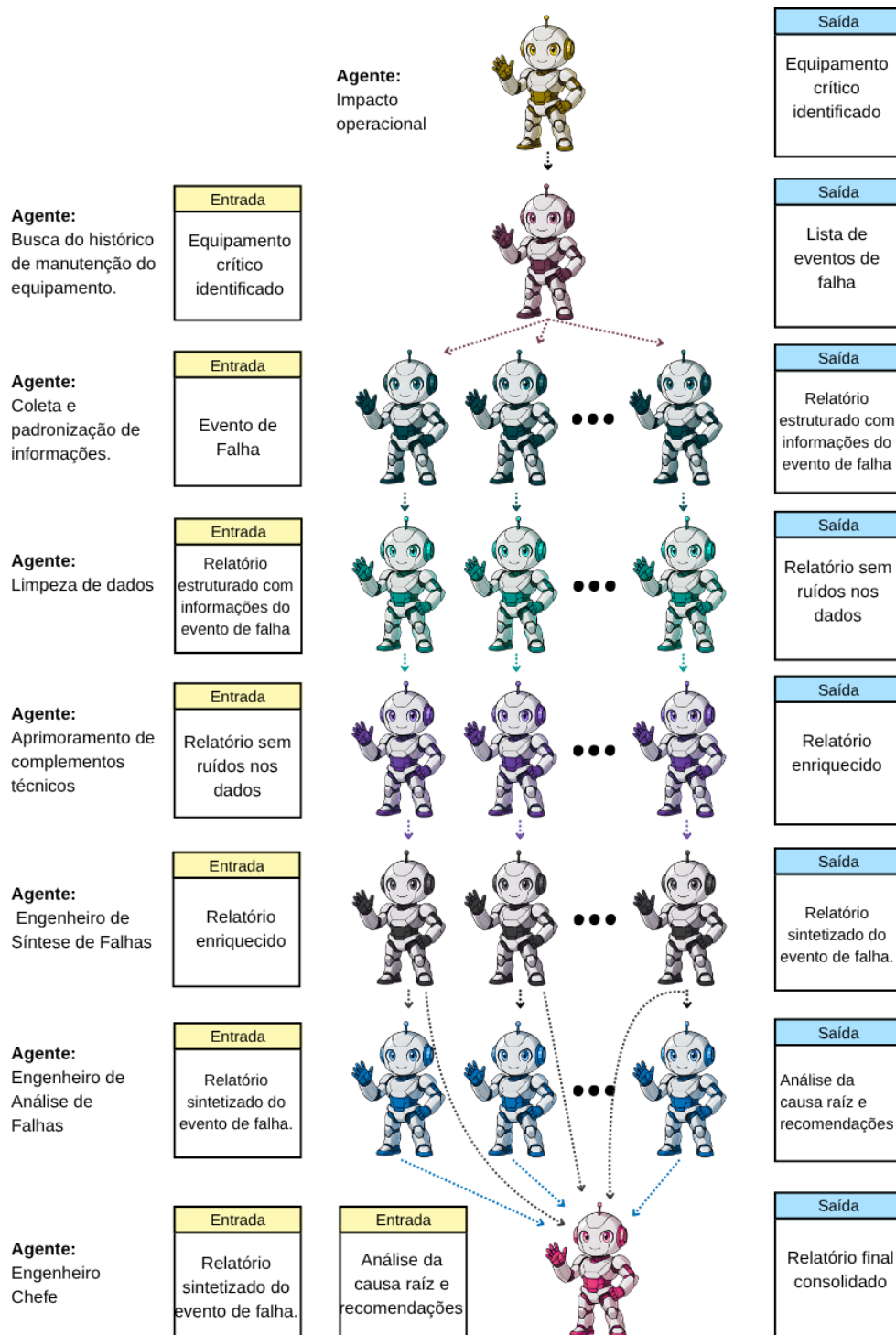


Figura 4 – Fluxograma do funcionamento prático da arquitetura multiagente. Fonte:

Elaboração própria.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Aplicação Piloto e Seleção dos Equipamentos

A implementação prática do sistema multiagente está sendo conduzida no contexto de um projeto piloto voltado aos elevadores instalados nas estações da CPTM. O escopo contempla a análise de dados operacionais de 87 equipamentos, considerando, em cada ciclo, os três meses completos mais recentes. Neste artigo, apresenta-se a análise referente ao período de abril a junho de 2025. Como o sistema ainda se encontra em processo de aprimoramento, diferentes intervalos trimestrais poderão ser adotados em ciclos futuros, conforme o avanço das aplicações.

Até o momento, foram processados 344 eventos de falha e 434 registros de manutenção (OSM), relativos ao total de ativos avaliados. A definição dos equipamentos prioritários ficou sob responsabilidade do agente de impacto operacional, que utiliza uma ferramenta de inteligência artificial para classificar os ativos com base em seu nível de criticidade para a manutenção. Diferentemente dos agentes baseados em LLMs, essa ferramenta adota um modelo de aprendizado de máquina não supervisionado, fundamentado em técnicas de análise fatorial e clusterização. Essa abordagem reforça o potencial de integração entre diferentes paradigmas de IA, como modelos preditivos, visão computacional e sistemas simbólicos, possibilitando uma solução híbrida e expansível, conforme ilustrado na Figura 5. Com base nessa classificação, foram



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

selecionados quatro elevadores considerados críticos para a análise de falhas conduzida pelos demais agentes do sistema.

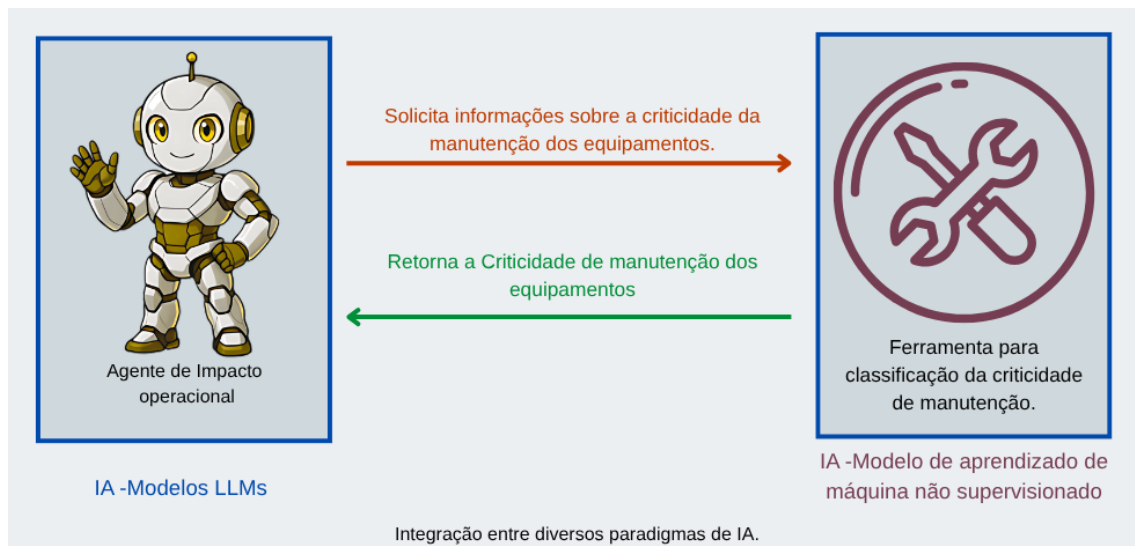


Figura 5 – Integração entre o agente de impacto operacional e a ferramenta de classificação de criticidade de manutenção. O agente identifica a necessidade de análise e aciona uma ferramenta externa baseada em aprendizado não supervisionado, recebendo como resposta a lista de equipamentos classificados como críticos para manutenção. Fonte: Elaboração própria.

Estrutura do Relatório Técnico Gerado

O relatório técnico elaborado pelo sistema multiagente adota uma estrutura padronizada, concebida para facilitar tanto a interpretação quanto a aplicação prática das informações pelas equipes de manutenção e gestão. Conforme apresentado na Figura 6.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

	1 - Resumo Técnico dos Eventos Analisados Visão geral do histórico e sintomas
	2 - Modos de Falha Observados Lista padronizada com códigos e descrições
	3 - Hipóteses das Causas Raiz (5 Porquês – Síntese) Cadeias de causa e efeito estruturadas
	4 - Análise dos Indicadores de Tempo Tempo de indisponibilidade, reparo e acesso.
	5 - Plano de Ação Integrado e Prioritário Medidas corretivas e preventivas com prioridade
	6 - Recomendações Técnicas Sugestões adicionais, melhorias e ajustes operacionais
	7 - Conclusão Síntese das análises

Figura 6 – Estrutura do relatório técnico gerado pelo sistema multiagente. Fonte:

Elaboração própria.

Essa padronização assegura maior clareza nos diagnósticos, rastreabilidade das ações realizadas e suporte à priorização das intervenções, independentemente do equipamento analisado. Além disso, o sistema possibilita gerar relatórios em diferentes formatos, como HTML e PDF, facilitando a integração com fluxos digitais e outros sistemas de gestão.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Estudo de Caso

Como estudo de caso, foi selecionado o elevador EL01BAS, classificado como crítico na matriz de priorização. O sistema multiagente analisou 16 eventos distintos de falha, identificando 14 modos de falha indexados. Destacaram-se dois modos recorrentes: desalinhamento do conjunto de fechamento da porta e desajuste no botão de comando elétrico da porta, ambos com duas ocorrências cada.

A Tabela 1 apresenta parte dos modos de falha identificados nesse equipamento, incluindo códigos, descrições, frequência e os números dos eventos associados.

Tabela 1 – Amostra dos modos de falha identificados no Elevador EL01BAS. Fonte: Elaboração Própria.

Código modo de falha	Descrição do modo de falha	Qtde de falhas	Nºs das falhas
MF-03	Desalinhamento mecânico do conjunto de fechamento da porta	2	[2xx28, 227xx]
MF-09	Botão de comando elétrico da porta solto ou desajustado	2	[xx653, 22xx1]
MF-08	Obstrução na porta com atuação do sistema de segurança	1	[2xx33]
MF-14	Botão do painel de comando desencaixado por vandalismo	1	[212xx]

Entre os sintomas mais frequentes registrados, destacam-se falhas no nivelamento hidráulico da cabine, interrupções no fechamento das portas e acionamento do sistema de segurança devido a obstruções. A análise técnica evidenciou tanto causas sistêmicas,



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

como desgaste de componentes e ajustes incorretos, quanto fatores externos, incluindo vandalismo e interferências físicas.

A seguir, é apresentado exemplos de trechos sintéticos extraídos do relatório técnico referente a esse estudo de caso:

- Hipótese das Causas Raiz (5 Porquês – Síntese):

“A indisponibilidade prolongada do elevador decorre principalmente do tempo elevado de acesso da equipe técnica ao local, superior ao tempo efetivo de reparo.”

- Plano de Ação Integrado e Prioritário:

“Revisar o fluxo de acionamento das equipes para priorizar ocorrências em equipamentos críticos e otimizar o tempo de deslocamento.”

- Recomendação Técnica:

“A proteção contra vandalismo e interferências externas deve ser reforçada para evitar falhas não sistêmicas que impactam a operação e a segurança.”

- Conclusão:

“O equipamento EL01BAS apresenta falhas recorrentes, principalmente nos sistemas mecânicos e elétricos das portas, no sistema hidráulico de nivelamento e nos componentes eletrônicos sensoriais. A análise demonstrou que grande parte da indisponibilidade é decorrente de gargalos logísticos e da necessidade



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

de melhoria de inspeções preventivas específicas. Dessa forma, é imprescindível implementar um plano de ação prioritário que contemple a otimização logística, a atualização dos procedimentos de manutenção, a proteção contra fatores externos, a fim de melhorar significativamente a confiabilidade e disponibilidade do elevador.”

Dessa forma, o relatório técnico gerado pelo sistema não apenas subsidia decisões objetivas, mas também serve como um guia prático para direcionar as ações de manutenção. Sua estrutura favorece a colaboração entre agentes inteligentes e o corpo técnico, permitindo a análise dos problemas sob diferentes perspectivas e promovendo uma abordagem mais abrangente e estratégica na gestão das intervenções. Assim, o sistema contribui para uma manutenção orientada por evidências, integrando conhecimento automatizado e experiência operacional.

Custo Associado ao Uso das LLMs

O custo associado ao uso de modelos de linguagem de larga escala (LLMs) depende diretamente do tipo de modelo selecionado, do volume de dados processados e da quantidade de falhas analisadas pelos agentes. Embora todos os agentes utilizem as LLMs em algum momento de suas operações, nem todas as etapas do fluxo operacional exigem o uso intensivo desses modelos. Em diversos casos, os agentes recorrem a ferramentas complementares para executar tarefas específicas, preservando as LLMs apenas para situações em que a interpretação avançada de linguagem natural é



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

essencial, tais como análise detalhada de falhas e síntese de recomendações técnicas. Essa combinação estratégica de modelos e ferramentas permite equilibrar precisão, eficiência e custos, garantindo que o custo operacional permaneça significativamente abaixo daquele requerido pelo trabalho manual equivalente, especialmente em ambientes com grandes volumes de dados e exigência de respostas rápidas.

Custo-Benefício do Sistema Multiagente

A análise de custo-benefício evidencia ganhos expressivos em relação ao tempo de elaboração dos relatórios. Considerando o universo de 87 elevadores analisados, a produção manual dos relatórios exigiria aproximadamente 600 horas de trabalho técnico, enquanto os agentes automatizados realizaram o mesmo processo em cerca de 14 horas. Esse resultado representa um aumento de velocidade de 97,6% no processamento das informações. Além de liberar a equipe técnica para as atividades efetivas de manutenção, a automatização permite que as ações sejam direcionadas diretamente às causas raiz dos problemas identificados, o que contribui para o aumento da confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

Limitações e Pontos de Atenção

A aplicação de sistemas multiagentes apresenta desafios relevantes, como a possibilidade de interpretações equivocadas, conhecidas como alucinações, e restrições na análise de grandes volumes de dados textuais. Para mitigar esses riscos, o projeto adota estratégias como a utilização de enxames de agentes, a divisão das tarefas em



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

etapas menores, a incorporação de ferramentas especializadas e a gestão estruturada do conhecimento técnico. Essas medidas aumentam a robustez e a precisão das análises, além de contribuir para o controle das limitações operacionais ao longo do processo.

Perspectivas de Aprimoramento

O desenvolvimento e a aplicação do sistema multiagente revelam oportunidades significativas de evolução. Entre as principais perspectivas de aprimoramento, destacam-se o aperfeiçoamento contínuo do domínio de conhecimento dos agentes, a calibração das ferramentas de interpretação textual e a expansão das bases de dados utilizadas. Ressalta-se, ainda, o potencial de integração com outros sistemas de apoio à decisão, como modelos preditivos, análises estatísticas e plataformas de gestão de ativos. Essas melhorias têm como objetivo não apenas elevar a precisão e a utilidade dos relatórios técnicos, mas também favorecer a escalabilidade da solução e sua adaptação a diferentes tipos de equipamentos e cenários operacionais, fortalecendo, assim, a gestão da manutenção orientada por dados e evidências.

CONCLUSÕES

A aplicação do sistema multiagente baseado em modelos de linguagem natural no contexto ferroviário demonstrou ganhos expressivos em eficiência, padronização e qualidade das análises de manutenção. A automação na elaboração dos relatórios



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

técnicos permitiu uma redução de mais de 97% no tempo necessário para análise, liberando a equipe para atividades mais estratégicas e impactando positivamente a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos. Esses resultados reforçam o potencial das soluções baseadas em IA para aprimorar a gestão de ativos e apoiar decisões fundamentadas em dados no setor ferroviário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOMMASANI, Rishi; HUDSON, Drew A.; ADELI, Ehsan et al. On the Opportunities and Risks of Foundation Models. arXiv preprint arXiv:2108.07258v3, Stanford Center for Research on Foundation Models (CRFM), Stanford University, 12 jul. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2108.07258>. Acesso em: 16 jul. 2025.

BROWN, Tom B.; MANN, Benjamin; RYDER, Nick et al. Language Models are Few-Shot Learners. arXiv preprint arXiv:2005.14165v4, [s.l.], 22 jul. 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.14165>. Acesso em: 4 jul. 2025.

DU, Hung; THUDUMU, Srikanth; VASA, Rajesh; MOUZAKIS, Kon. A Survey on Context-Aware Multi-Agent Systems: Techniques, Challenges and Future Directions. arXiv preprint arXiv:2402.01968, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2402.01968>. Acesso em: 15 jul. 2025.

FERBER, Jacques. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley, 1999.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

GAO, Xiangbo; WU, Keshu; ZHANG, Hao; TIAN, Kexin; ZHOU, Yang; TU, Zhengzhong.

Automated Vehicles Should be Connected with Natural Language. arXiv preprint

arXiv:2507.01059v1, Texas A&M University, 2025. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/2507.01059v1>. Acesso em: 12 jul. 2025.

GUO, Taicheng; CHEN, Xiuying; WANG, Yaqi; CHANG, Ruidi; PEI, Shichao; CHAWLA,

Nitesh V.; WIEST, Olaf; ZHANG, Xiangliang. Large Language Model based Multi-Agents:

A Survey of Progress and Challenges. Proceedings of the Thirty-Third International Joint

Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-24), 2024.

HAN, Haoyu; WANG, Yu; SHOMER, Harry et al. Retrieval-Augmented Generation with

Graphs (GraphRAG). arXiv preprint arXiv:2501.00309v2, 8 jan. 2025. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/2501.00309>. Acesso em: 15 jul. 2025.

KOSTKA, Adam; CHUDZIAK, Jarosław A. Synergizing Logical Reasoning, Knowledge

Management and Collaboration in Multi-Agent LLM System. arXiv preprint

arXiv:2507.02170v1, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2507.02170v1>. Acesso

em: 12 jul. 2025.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. Manual de Gestão de Ativos. Rio de Janeiro: Ed. do

Autor, 2020.

LEWIS, Patrick; PEREZ, Ethan; PIKTUS, Aleksandra et al. Retrieval-Augmented Generation

for Knowledge-Intensive NLP Tasks. arXiv preprint arXiv:2005.11401v4, 2021. Disponível

em: <https://arxiv.org/abs/2005.11401>. Acesso em: 15 jul. 2025.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

LIU, Jiale; ZENG, Yifan; HØJMARK-BERTELSEN et al. Memory-Augmented Agent Training for Business Document Understanding. arXiv preprint arXiv:2412.15274, 17 dez. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2412.15274>. Acesso em: 15 jul. 2025.

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to Statistical Quality Control. 8. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2020.

NORI, Harsha; DASWANI, Mayank; KELLY, Christopher; et al. Sequential Diagnosis with Language Models. arXiv, v. 2, 3 jul. 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.22405v2>. Acesso em: 13 jul. 2025.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4. ed. Pearson, 2021.

VASWANI, Ashish; SHAZEER, Noam; PARMAR, Niki et al. Attention Is All You Need. In: Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA, 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1706.03762>. Acesso em: 14 jul. 2025.

WOOLDRIDGE, Michael; JENNINGS, Nicholas R.; KINNY, David. A Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. In: Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents (Agents'97). Marina del Rey, CA: ACM Press, p. 69–76, 1999.

YAO, Shunyu; ZHAO, Jeffrey; YU, Dian et al. REACT: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models. In: International Conference on Learning Representations (ICLR), 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.11401>. Acesso em: 16 jul. 2025.