

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL**

**REDUÇÃO DO TEMPO DE CICLO DA MANUTENÇÃO QUINZENAL EM FROTA  
FLORESTAL DE VEÍCULOS PESADOS POR MEIO DE ESTUDO DE TEMPOS E  
SIMULAÇÃO**

**TRÊS LAGOAS - MS**

**2026**

## RESUMO

A gestão eficiente da manutenção automotiva pesada é crítica para a competitividade de operações florestais, nas quais paradas não programadas elevam custos de oportunidade e reduzem a disponibilidade operacional. Este estudo propõe melhorias para o processo de manutenção preventiva quinzenal (P15) em oficina automotiva de frota florestal em Mato Grosso do Sul, mediante integração de estudo de tempos e movimentos, diagnóstico qualitativo e simulação de eventos discretos. Foram cronometradas 35 manutenções P15 ao longo de 12 semanas (junho-agosto/2025), identificando tempo médio observado de 115 minutos. O diagnóstico qualitativo via Diagrama de Ishikawa com 15 entrevistados apontou método e layout como causas principais de ineficiências (67% das menções). O modelo de simulação em Arena foi parametrizado com distribuições normais  $N(\mu, \sigma)$  derivadas dos dados empíricos e validado estatisticamente (tempo médio simulado 115,02 min vs. observado 115,00 min;  $p = 0,787$ ). O cenário proposto integrou reorganização de layout (redução de percurso total de 418,9 m para 183 m), implementação de procedimentos operacionais padronizados e reordenação da sequência de inspeções. Os resultados demonstraram redução de 25,45% no tempo médio de ciclo (de 115,02 min para 85,75 min;  $p < 0,001$ ), diminuição da utilização do Box P15 de 81,0% para 58,9% e eliminação do tempo de espera. A análise de sensibilidade com variação de  $\pm 10\%$  nos parâmetros críticos confirmou robustez dos resultados. O estudo indica viabilidade técnica da implementação e oferece protocolo metodológico replicável para operações similares de manutenção automotiva pesada.

Palavras-chave: Manutenção Preventiva. Simulação de Eventos Discretos. Estudo de Tempos e Movimentos. Manutenção Automotiva

## ABSTRACT

Efficient management of heavy automotive maintenance is critical for the competitiveness of forestry operations, in which unscheduled downtime increases opportunity costs and reduces operational availability. This study proposes improvements to the biweekly preventive maintenance (P15) process in an automotive workshop for a forestry fleet in Mato Grosso do Sul, through the integration of time and motion study, qualitative diagnosis, and discrete event simulation. Thirty-five P15 maintenances were timed over a 12-week period (June-August/2025), identifying an observed average time of 115 minutes. Qualitative diagnosis via Ishikawa Diagram with 15 interviewees indicated method and layout as the main causes of inefficiencies (67% of mentions). The Arena simulation model was parameterized with normal distributions  $N(\mu, \sigma)$  derived from empirical data and statistically validated (simulated mean time 115.02 min vs. observed 115.00 min;  $p = 0.787$ ). The proposed scenario integrated layout reorganization (total path reduction from 418.9 m to 183 m), implementation of standardized operating procedures, and reordering of inspection sequence. Results demonstrated a 25.45% reduction in average cycle time (from 115.02 min to 85.75 min;  $p < 0.001$ ), decrease in Box P15 utilization from 81.0% to 58.9%, and elimination of waiting time. Sensitivity analysis with  $\pm 10\%$  variation in critical parameters confirmed robustness of results. The study indicates technical feasibility of implementation and offers a replicable methodological protocol for similar heavy automotive maintenance operations.

Keywords: Preventive Maintenance. Discrete Event Simulation. Time and Motion Study. Heavy Automotive Maintenance.

## 1 INTRODUÇÃO

O setor florestal de Mato Grosso do Sul consolidou-se como polo estratégico da indústria de celulose brasileira, com operações que dependem criticamente da disponibilidade contínua de frotas de veículos pesados para o transporte de madeira. Nesse contexto, a gestão da manutenção automotiva pesada deixa de ser atividade de suporte e assume papel central na competitividade das operações, uma vez que paradas não programadas elevam custos de oportunidade e reduzem o aproveitamento da capacidade produtiva (MACHADO; GURGEL; GAMEIRO, 2015). A oficina analisada integra esse cenário como unidade de manutenção de empresa líder do setor, sediada em Mato Grosso do Sul, responsável por frota superior a 90 veículos pesados e por elevado volume anual de manutenções preventivas programadas. Diante da criticidade operacional dessa atividade, a manutenção preventiva assume papel central como mecanismo de preservação da confiabilidade da frota, da regularidade do fluxo logístico e da redução de indisponibilidades ao longo do ciclo operacional.

A manutenção preventiva consolidou-se, ao longo do século XX, como resposta à necessidade de preservar a confiabilidade de sistemas produtivos e reduzir falhas em equipamentos críticos. Suas raízes remontam aos princípios da administração científica de Taylor, centrados na racionalização do trabalho, na decomposição das tarefas em elementos mensuráveis e na padronização de métodos (TAYLOR, 1911). A partir da década de 1970, essa lógica foi aprofundada com a difusão da Manutenção Produtiva Total, que integra práticas de manutenção planejada à filosofia de melhoria contínua, buscando maximizar a eficiência global dos equipamentos por meio da participação ativa de operadores e equipes multidisciplinares (MOUBRAY, 2000; AHUJA; KHAMBA, 2008). Nesse cenário, a manutenção automotiva pesada em operações florestais passa a demandar abordagens sistemáticas de análise e melhoria de processos para sustentar níveis elevados de disponibilidade.

Em frotas automotivas pesadas, planos preventivos estruturados em ciclos programados fazem com que intervenções de menor complexidade e maior frequência, como a manutenção preventiva de quinze dias (P15), concentrem parcela relevante das atividades da oficina e exerçam efeito acumulado sobre a disponibilidade da frota e os custos operacionais (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2016). Nesse contexto, compreender em detalhe o desempenho do ciclo P15 torna-se fundamental para identificar oportunidades de melhoria com maior potencial de impacto sobre o sistema como um todo.

Considerando esse efeito acumulado, este trabalho concentra-se especificamente na manutenção P15 como objeto de investigação. A oficina investigada realiza aproximadamente

1.800 manutenções preventivas P15 por ano, o que corresponde a mais de 70% das intervenções preventivas programadas na unidade. O tempo médio observado para execução da P15 é de 115 minutos por ciclo e o custo de oportunidade associado à indisponibilidade dos veículos atinge R\$ 3.495,48 por hora, de modo que ineficiências na organização do layout, na padronização dos procedimentos e na sequência das atividades impactam significativamente a produtividade e o desempenho econômico da operação florestal. Nesse cenário, torna-se necessário empregar métodos de análise capazes de quantificar tempos de execução, identificar gargalos operacionais e avaliar, de forma controlada, alternativas de reorganização do processo antes de sua implementação na oficina.

Em resposta a essa necessidade, a literatura em Engenharia de Produção indica que a combinação de estudo de tempos e movimentos com simulação de eventos discretos constitui abordagem promissora para diagnóstico e melhoria de processos complexos de manutenção, por integrar mensurações empíricas detalhadas com experimentação de cenários em modelos computacionais (BANKS et al., 2010; LAW; KELTON, 2007; VENTER, 2017). O estudo de tempos e movimentos permite decompor o processo em atividades elementares, medir tempos de execução, identificar desperdícios e estabelecer tempos-padrão para planejamento e controle (BARNES, 1980; NIEBEL; FREIVALDS, 2009). A simulação de eventos discretos, por sua vez, representa computacionalmente o fluxo de veículos, recursos e atividades, possibilitando comparar configurações de layout e sequências de trabalho quanto a indicadores como tempo de ciclo, filas e utilização de recursos. Trabalhos recentes relatam ganhos relevantes com essa integração em contextos de manutenção industrial e florestal (CARVALHO et al., 2016; MACIEL et al., 2024), embora aplicações documentadas em oficinas de manutenção automotiva pesada ainda sejam pouco frequentes no cenário nacional.

Nesse contexto, formula-se a seguinte questão de pesquisa: qual configuração de layout e quais procedimentos de trabalho podem ser propostos para a oficina de manutenção, a partir da aplicação integrada de estudo de tempos e movimentos e simulação de eventos discretos, de modo a reduzir os tempos de execução e os custos das manutenções preventivas P15? Essa questão insere-se principalmente na área de Engenharia de Operações e Processos da Produção, ao tratar de análise de processos, estudo de tempos, organização do trabalho e configuração de layout em sistema de manutenção automotiva pesada.

A partir dessa questão, define-se como objetivo geral propor melhorias para o processo de manutenção preventiva P15 por meio da aplicação integrada de estudo de tempos e movimentos e simulação de eventos discretos, com foco na redução dos tempos de execução.

Para viabilizar esse propósito, o estudo busca, inicialmente, caracterizar quantitativamente o processo atual de manutenção P15 mediante estudo de tempos e movimentos, identificando tempos de execução e padrões de movimentação; em seguida, desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos parametrizado com dados empíricos da oficina; e, por fim, elaborar recomendações técnicas para implementação das melhorias propostas, com ênfase na configuração do layout e na padronização dos procedimentos de trabalho.

A relevância da pesquisa justifica-se em três dimensões complementares. Do ponto de vista prático, a manutenção de frotas em operações florestais constitui atividade crítica para a disponibilidade operacional e para a competitividade do sistema logístico, e a metodologia proposta apresenta potencial de replicação em outras unidades da empresa e em organizações que enfrentem desafios semelhantes de organização de oficinas de manutenção. Sob a perspectiva metodológica, a integração entre estudo de tempos e movimentos e simulação de eventos discretos ainda é pouco explorada em estudos de manutenção automotiva pesada no contexto brasileiro, de modo que a aplicação combinada dessas técnicas em caso real contribui para consolidar um caminho de análise e melhoria de processos nessa área (CARVALHO et al., 2016; MACIEL et al., 2024; VENTER, 2017). Em termos acadêmicos, o trabalho oferece um referencial metodológico que documenta, de forma encadeada, as etapas de diagnóstico, modelagem, experimentação de cenários e proposição de melhorias, contribuindo para o avanço do conhecimento em Engenharia de Produção sobre a gestão de processos de manutenção em ambientes industriais complexos.

Quanto à caracterização metodológica, trata-se de pesquisa aplicada, de natureza predominantemente quantitativa, com apoio qualitativo para o diagnóstico inicial, classificada quanto aos objetivos como exploratória e explicativa e conduzida por meio de estudo de caso único em oficina de manutenção automotiva pesada (YIN, 2015). A coleta de dados ocorreu ao longo de 12 semanas, entre junho e agosto de 2025, combinando cronometragem de 35 manutenções P15 com 15 entrevistas semiestruturadas com colaboradores da oficina, o que permitiu integrar evidências quantitativas e qualitativas na análise dos resultados. Por fim, este artigo está organizado em cinco seções: além desta introdução, a seção 2 descreve os procedimentos metodológicos; a seção 3 apresenta o referencial teórico sobre manutenção automotiva pesada, estudo de tempos e movimentos e simulação de eventos discretos; a seção 4 expõe e discute os resultados obtidos; e a seção 5 reúne as conclusões, limitações e perspectivas para pesquisas futuras.

## 2 MÉTODO APLICADO

Este estudo configura-se como pesquisa aplicada, uma vez que a produção de conhecimento está orientada à solução de um problema concreto de engenharia de produção: a redução do tempo de ciclo da manutenção preventiva P15 em oficina automotiva pesada vinculada a uma operação florestal (GIL, 2017; YIN, 2015). A natureza aplicada decorre do vínculo direto entre os resultados obtidos e a tomada de decisão gerencial na unidade estudada. A abordagem é predominantemente quantitativa, sustentada na mensuração sistemática de tempos de processo, no tratamento estatístico dos dados e na modelagem por simulação de eventos discretos (BARNES, 1980; NIEBEL; FREIVALDS, 2009; LAW; KELTON, 2007; BANKS et al., 2010). Elementos qualitativos, obtidos por meio de entrevistas e organizados em Diagrama de Ishikawa, foram incorporados de modo complementar para identificar causas de ineficiência e orientar a seleção de variáveis relevantes à modelagem (ISHIKAWA, 1985; BARDIN, 2011).

Quanto aos objetivos, a pesquisa é simultaneamente exploratória e explicativa: é exploratória por examinar de forma aprofundada um processo específico – a manutenção P15 em oficina de frota florestal – em contexto pouco documentado na literatura nacional, e é explicativa por buscar relações entre método de trabalho, arranjo físico e desempenho temporal, testando o efeito de intervenções propostas sobre indicadores de operação (GIL, 2017; VERGARA, 2016). Em termos de procedimento técnico, adota-se estudo de caso único, desenvolvido em ambiente real de produção e associado à experimentação de cenários alternativos por simulação computacional, abordagem recomendada para fenômenos contemporâneos sobre os quais o pesquisador tem pouco controle (YIN, 2015; LAW; KELTON, 2007).

O universo do estudo corresponde ao conjunto das manutenções preventivas realizadas na oficina, tomando-se como população de interesse as manutenções P15 executadas em um ano, estimadas em cerca de 1.800 intervenções, que constituem a maior parcela das atividades preventivas da unidade. A amostra quantitativa foi formada por 35 manutenções P15 cronometradas entre junho e agosto de 2025, no turno diurno, selecionadas conforme a janela de coleta e a disponibilidade operacional da equipe. No eixo qualitativo, participaram 15 colaboradores diretamente envolvidos no processo de manutenção, distribuídos entre funções operacionais e gerenciais, de modo a abarcar diferentes perspectivas sobre o fluxo de trabalho e favorecer a triangulação das evidências (YIN, 2015; CRESWELL; CRESWELL, 2021). O delineamento adota, assim, o princípio de representatividade analítica do processo, em vez de

pretender extrapolação estatística para outras unidades ou organizações (YIN, 2015).

Como instrumentos de pesquisa, utilizaram-se roteiro de entrevista semiestruturada, Diagrama de Ishikawa, cronômetro digital e planilhas estruturadas de registro. O roteiro de entrevista foi elaborado para captar informações sobre a execução da manutenção P15 e a percepção de gargalos no processo, sendo aplicado individualmente aos 15 colaboradores selecionados, com registros escritos sistemáticos das respostas. O Diagrama de Ishikawa foi empregado como instrumento de sistematização do diagnóstico qualitativo, permitindo organizar as causas levantadas nas entrevistas nas categorias clássicas de máquina, material, mão de obra, método, meio ambiente e medição, o que facilitou a identificação de convergências entre relatos e a priorização de dimensões críticas a serem tratadas nas análises subsequentes (ISHIKAWA, 1985; CESAR, 2011).

No eixo quantitativo, a coleta baseou-se em cronoanálise direta, conforme protocolos clássicos de estudo de tempos e movimentos (BARNES, 1980; NIEBEL; FREIVALDS, 2009). Utilizou-se cronômetro digital para medir os tempos de 35 manutenções P15, observadas em condições normais de operação ao longo de 12 semanas. O processo foi decomposto em etapas operacionais – entrada no box, preparação, execução, inspeção, lavagem, finalização e saída – e cada etapa teve seus tempos registrados em planilhas previamente estruturadas, concebidas para assegurar consistência de registro, permitir o cálculo de indicadores estatísticos e fornecer os parâmetros de entrada necessários à modelagem de simulação (GROOVER, 2010).

A análise de dados foi conduzida em três planos articulados: qualitativo, quantitativo e integrado. No plano qualitativo, as respostas às entrevistas foram submetidas à análise de conteúdo categorial, com codificação das falas segundo os 6Ms do Diagrama de Ishikawa e quantificação da frequência de menções por categoria, evidenciando a predominância de causas relacionadas a método de trabalho e layout, o que orientou a concentração das propostas de intervenção nessas dimensões (BARDIN, 2011; ISHIKAWA, 1985). No plano quantitativo, os tempos observados nas 35 manutenções P15 foram consolidados em planilhas eletrônicas e analisados por estatística descritiva, com cálculo de tempo médio observado, desvio padrão e coeficiente de variação. A consistência da amostra foi verificada por comparação entre o tempo médio observado e registros históricos da oficina, não sendo identificada diferença estatisticamente significativa ( $p = 0,787$ ), o que respalda o uso da amostra na parametrização do modelo de simulação. A partir dos tempos observados, foram calculados o tempo normal e o tempo padrão da manutenção P15, adotando-se fator de ritmo igual a 1,0 e fator de tolerância de 15%, em consonância com referências clássicas de estudo de tempos em atividades de

manutenção (BARNES, 1980; NIEBEL; FREIVALDS, 2009). No plano integrado, os resultados obtidos nos eixos qualitativo e quantitativo foram combinados para selecionar as atividades e causas a serem endereçadas na experimentação de cenários: relacionaram-se as categorias mais recorrentes no Diagrama de Ishikawa às etapas do processo que concentravam maior tempo de execução, de forma a priorizar intervenções com maior potencial de impacto sobre o tempo de ciclo total (CARVALHO et al., 2016; MACIEL et al., 2024).

A modelagem do processo de manutenção P15 foi desenvolvida no software Arena, seguindo a abordagem de simulação de eventos discretos (LAW; KELTON, 2007; BANKS et al., 2010). O modelo representou o fluxo do veículo desde a chegada à oficina até a liberação, incluindo fila para o box de manutenção, execução das atividades de preparação, manutenção e inspeção, lavagem e saída. Os tempos de processamento foram parametrizados com base na média ( $\mu$ ) e no desvio-padrão ( $\sigma$ ) calculados a partir das 35 cronometragens, ajustados a distribuições normais  $N(\mu, \sigma)$

O intervalo entre manutenções foi configurado como determinístico, igual a 120 minutos, refletindo a programação praticada pela oficina para a entrada de veículos. O horizonte de simulação foi de 180 dias, com período de aquecimento de 30 dias e 50 replicações, adotando-se intervalo de confiança de 95% para os indicadores analisados (BANKS et al., 2010; SARGENT, 2013). A validação do modelo baseline foi realizada por comparação entre o tempo médio de manutenção obtido na simulação (115,02 minutos) e o tempo médio observado em campo (115,00 minutos), não havendo diferença estatisticamente significativa ( $p = 0,787$ ). Para avaliar a robustez dos resultados, realizou-se análise de sensibilidade com variação de  $\pm 10\%$  nos parâmetros críticos. Os indicadores de tempo de ciclo, utilização do Box P15 e tempo de espera foram avaliados sob cada configuração, mantendo-se 50 replicações. Os resultados confirmaram comportamento estável do modelo: variações de  $\pm 10\%$  nos tempos de execução geraram alterações proporcionais no tempo de ciclo e na utilização do Box, sem alterar qualitativamente as conclusões sobre a necessidade de intervenção no processo.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Fundamentos da manutenção automotiva pesada**

A manutenção é o conjunto de ações destinadas a manter ou recolocar um item em condição de desempenhar a função requerida (MÁRQUEZ, 2007). Em sistemas de transporte, a manutenção automotiva pesada é estratégica porque afeta diretamente confiabilidade, segurança e disponibilidade da frota (MOUBRAY, 2000; VIANA, 2018). A gestão da

manutenção evoluiu de intervenções corretivas para abordagens preventivas, preditivas e centradas em confiabilidade, articuladas a indicadores de desempenho (MÁRQUEZ, 2007; MOUBRAY, 2000). A literatura descreve três gerações principais: manutenção corretiva, manutenção preventiva baseada em tempo ou uso e, mais recentemente, práticas preditivas e de Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), que definem estratégias a partir da criticidade das funções e consequências de falha (MOUBRAY, 2000). Em frotas pesadas, essas abordagens coexistem, com ênfase crescente em planos preventivos estruturados e, quando possível, em monitoramento de condição (MÁRQUEZ, 2007; VIANA, 2018).

Nesse cenário, a Manutenção Produtiva Total (TPM) surge como estrutura que integra essas práticas em um programa organizado de melhoria contínua. A difusão da TPM reforça esse movimento ao propor a maximização da eficiência global por meio da eliminação de perdas e do envolvimento de operadores e equipes de manutenção (AHUJA; KHAMBA, 2008). No pilar de Manutenção Planejada, buscam-se planos preventivos claros, padronização de rotinas e redução de intervenções emergenciais, com impacto direto na disponibilidade dos equipamentos (AHUJA; KHAMBA, 2008). Os autores destacam que a TPM visa “maximizar a eficiência global dos equipamentos por meio da eliminação sistemática de perdas, com participação ativa de todos os níveis da organização” (AHUJA; KHAMBA, 2008, p. 710, tradução própria).

Contudo, a eficácia dessas políticas de manutenção depende também de como o trabalho é organizado e executado no nível operacional. Dessa forma, a eficiência dos processos depende do desenho do sistema de serviço: arranjo físico, métodos, padronização de atividades e fluxos bem definidos (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2016). Nessa ótica, a manutenção automotiva pesada é vista como um sistema produtivo de serviços, cujo desempenho em tempo de ciclo, utilização de recursos e cumprimento de prazos pode ser melhorado por princípios da engenharia de produção, como redução de desperdícios e racionalização de fluxos (WOMACK; JONES, 1996; AHUJA; KHAMBA, 2008). Como o tempo de ciclo é um indicador central nesse tipo de sistema, torna-se necessário empregar técnicas que permitam medi-lo e decompor o trabalho em suas etapas constituintes, entre as quais se destaca o estudo de tempos e movimentos.

O estudo de tempos e movimentos é uma ferramenta clássica da Engenharia de Métodos para analisar e melhorar processos de trabalho (BARNES, 1980; NIEBEL; FREIVALDS, 2009). Seu objetivo é desenvolver métodos mais eficientes, eliminar movimentos desnecessários e estabelecer tempos-padrão que sirvam de base a planejamento, custos e

controle (SILVA, 2023). Barnes (1980, p. 3, tradução própria) define o estudo de movimentos e tempos como “um estudo metódico de sistemas de trabalho com o objetivo de projetar e padronizar métodos de trabalho ótimos, incorrendo em menor custo e identificando o tempo gasto por pessoas qualificadas e competentes”. Seus fundamentos remontam à Administração Científica de Taylor e aos estudos de movimento do casal Gilbreth, que destacaram a decomposição das tarefas, a observação detalhada e a redução de gestos desnecessários, relacionando fadiga e produtividade (TAYLOR, 1911).

Em linha com esse foco em eficiência, Silva (2023) observa que o estudo de tempos e movimentos também é denominado engenharia de métodos, medida do trabalho, cronoanálise ou MTM, sempre com foco em identificar o método mais eficiente e definir o tempo padrão de execução. A autora afirma que o uso de tempos e movimentos “permite a uma organização uma visão global de todos os processos produtivos, sendo de suma importância para o seu desenvolvimento e, a partir de uma análise sistemática do trabalho, gera vários benefícios que levarão ao aumento da produtividade e eficiência operacional” (SILVA, 2023, p. 23). Tempos-padrão confiáveis são fundamentais para programar a produção, dimensionar recursos e avaliar desempenho (MARTINS; LAUGENI, 2005).

Operacionalmente, o estudo de tempos parte da observação do processo global, que é desdobrado em atividades e elementos mensuráveis, cronometrados em múltiplos ciclos para cálculo de tempos médios, avaliação de ritmo e determinação do tempo normal e do tempo padrão, este último obtido pela inclusão de tolerâncias para descanso, necessidades pessoais e fadiga (CONTADOR, 1998; BARNES, 1980; PEINADO; GRAEML, 2007; RESENDE; MARTINS; ROCHA, 2016). Ferramentas como fluxogramas e diagramas de percurso apoiam a identificação de gargalos, deslocamentos excessivos e problemas de layout (BARNES, 1980; PUREZA, 2019). Nesse sentido, o estudo de tempos e movimentos fornece base quantitativa e visual para identificar perdas, separar atividades que agregam e não agregam valor e orientar decisões de padronização, balanceamento e reorganização física do trabalho (SILVA, 2023; FERREIRA et al., 2018), razão pela qual permanece atual em contextos de manufatura e serviços, incluindo operações de manutenção, nas quais tempo de intervenção, deslocamentos e sequência de tarefas influenciam diretamente o desempenho global do sistema (BARNES, 1980; GROOVER, 2010). Como complemento a essa abordagem quantitativa do processo, a literatura de qualidade propõe o uso de ferramentas voltadas à identificação estruturada das causas dos problemas observados. O Diagrama de Ishikawa, ou diagrama de causa e efeito, é uma ferramenta da qualidade voltada à identificação e organização das possíveis causas de um

problema (ISHIKAWA, 1985). A técnica parte de um efeito indesejado e estrutura, de forma sistemática, fatores que podem contribuir para sua ocorrência, favorecendo a análise de causas-raiz (CESAR, 2011). Em processos industriais e de manutenção, é amplamente empregado pela simplicidade de uso e pela capacidade de transformar percepções dispersas em um quadro visual organizado (MACIEL et al., 2024; CARVALHO et al., 2016). As causas são usualmente agrupadas em seis categorias conhecidas como 6Ms: Máquina, Material, Mão de Obra, Método, Meio Ambiente e Medidas (ISHIKAWA, 1985), o que facilita a discussão multidisciplinar e evita que a análise se concentre apenas em fatores imediatos (CESAR, 2011).

Quando associado a entrevistas e observação do processo, o diagrama torna-se um instrumento robusto para priorizar causas predominantes em sistemas complexos, como oficinas de manutenção. Para tratar qualitativamente as falas de operadores e gestores, a análise de conteúdo proposta por Bardin (2011) é frequentemente utilizada em conjunto com o Diagrama de Ishikawa. Bardin (2011, p. 48) define a análise de conteúdo como

...um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando obter, por procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção dessas mensagens.

Essa combinação permite não apenas listar causas, mas também identificar recorrências, convergências e prioridades de intervenção em problemas de desempenho de manutenção (ISHIKAWA, 1985; CESAR, 2011).

Complementando esse conjunto de ferramentas de diagnóstico qualitativo e quantitativo, a literatura destaca a simulação de eventos discretos como abordagem adequada para testar, em ambiente virtual, os efeitos das intervenções propostas nos processos de manutenção. A simulação de eventos discretos é uma técnica de modelagem de sistemas dinâmicos em que as mudanças de estado ocorrem em pontos específicos no tempo, como chegadas, inícios e terminos de atividades e formação de filas (BANKS et al., 2010; LAW; KELTON, 2007). Nessa abordagem, constrói-se um modelo lógico-computacional do sistema real, permitindo experimentar alternativas de operação sem interferir diretamente na prática (LAW; KELTON, 2007). Law e Kelton (2007) ressaltam que a simulação é especialmente útil quando há variabilidade, múltiplos recursos e interações complexas, sendo “uma metodologia indispensável de resolução de problemas para muitas situações reais” (LAW; KELTON, 2007, p. 1, tradução própria). Banks et al. (2010) destacam que sua principal vantagem está em representar a lógica operacional do sistema, preservando dependências e incertezas presentes

no ambiente real.

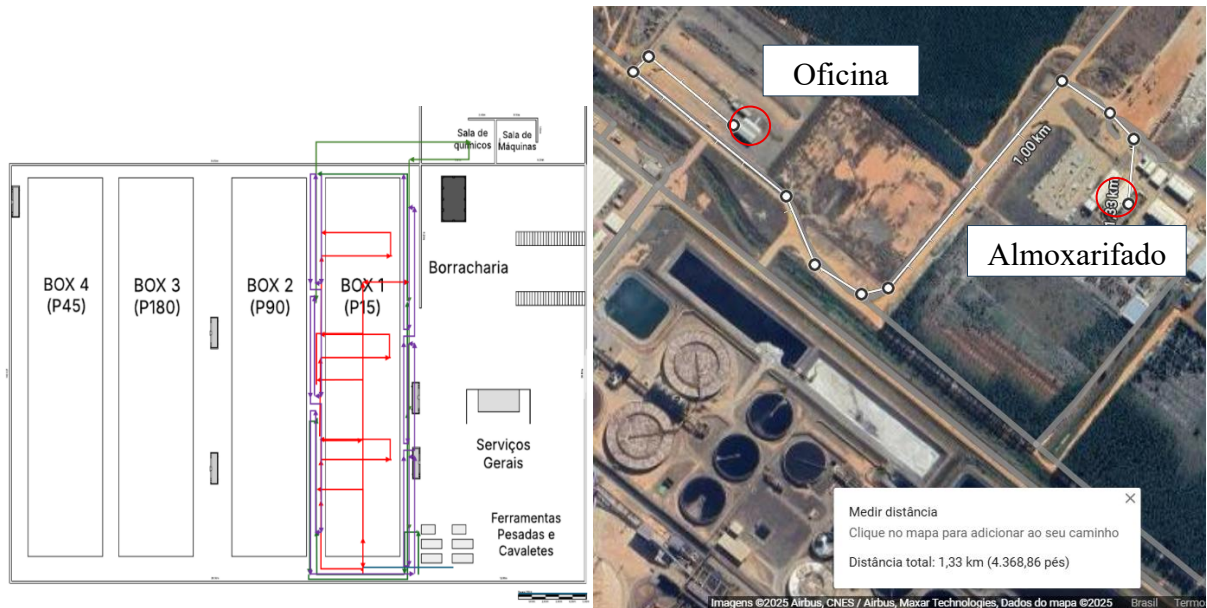
Em manutenção, a simulação de eventos discretos é utilizada para avaliar políticas de agendamento, dimensionamento de equipes, uso de boxes, tempos de fila e impactos de mudanças de layout ou sequência operacional (CARVALHO et al., 2016; MACIEL et al., 2024). O desenvolvimento do modelo envolve, em linhas gerais, a formulação do problema, a construção do modelo conceitual, a coleta de dados, a implementação, a verificação, a validação e a experimentação de cenários (BANKS et al., 2010; SARGENT, 2013). A validação normalmente combina comparação entre resultados simulados e dados observados com a avaliação de especialistas familiarizados com o sistema (SARGENT, 2013; LAW; KELTON, 2007). Quando alimentada por dados de estudo de tempos e articulada a ferramentas de análise de causas, a simulação amplia a capacidade de prever o efeito de intervenções antes da implementação, quantificando potenciais ganhos em tempo de ciclo, filas e utilização de recursos (CARVALHO et al., 2016; MACIEL et al., 2024). Dessa forma, consolida-se como instrumento relevante de apoio à decisão em projetos de melhoria de processos de manutenção.

## **4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS**

### **4.1 Estrutura da Oficina**

A oficina de manutenção automotiva pesada estudada está instalada em uma unidade florestal de empresa do setor de celulose, em Mato Grosso do Sul. No que se refere à infraestrutura produtiva, a oficina dispõe de quatro boxes de manutenção especializados por tipo de intervenção: Box 1 (P15), Box 2 (P90), Box 3 (P180) e Box 4 (P45). No turno diurno, cada box é operado por três mecânicos e, no turno noturno, por dois mecânicos, compondo a base de recursos diretamente alocada às manutenções preventivas. A área total construída é de 5.000 m<sup>2</sup>, incluindo boxes de manutenção, áreas de apoio e instalações administrativas, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Planta baixa da oficina de manutenção (C) / Distância do almoxarifado em relação à oficina

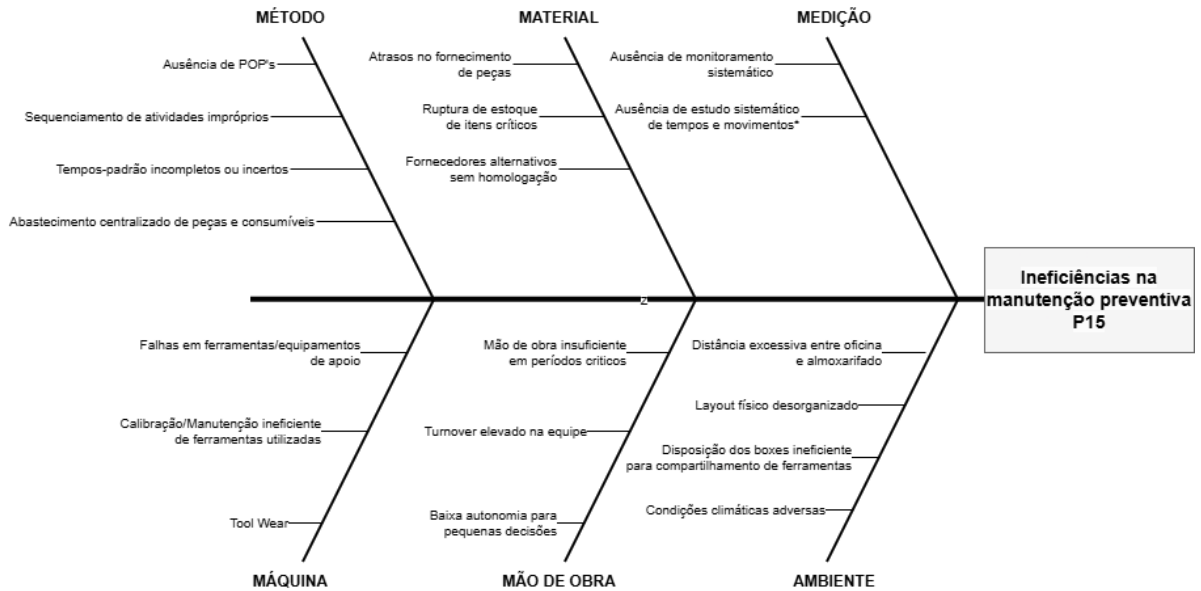


Fonte: Elaboração própria e Google Maps (2025)

#### 4.1.1 Aplicação do Diagrama de Ishikawa

As 15 entrevistas foram categorizadas nos 6Ms do Diagrama de Ishikawa, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de Ishikawa: causas dos problemas de eficiência na oficina



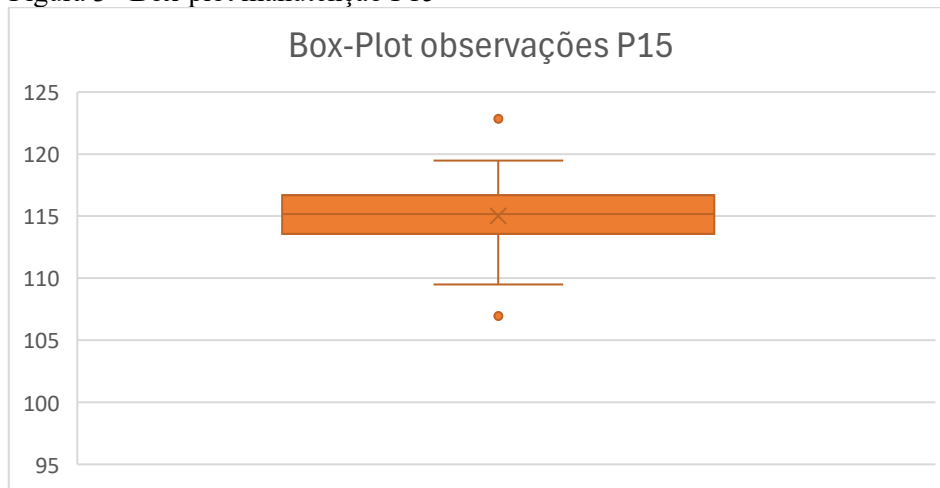
Fonte: Elaboração própria (2025)

#### 4.2 Resultados Do Estudo De Tempos e Movimentos

A cronoanálise de 35 manutenções P15 indicou tempo médio observado de 115,00 minutos, desvio-padrão de 3,92 minutos e coeficiente de variação de 3,41%, caracterizando

baixa variabilidade entre os ciclos cronometrados. O box-plot (Figura 3) reforça essa leitura ao mostrar distribuição aproximadamente simétrica e ausência de valores extremos relevantes.

Figura 3 –Box-plot manutenção P15



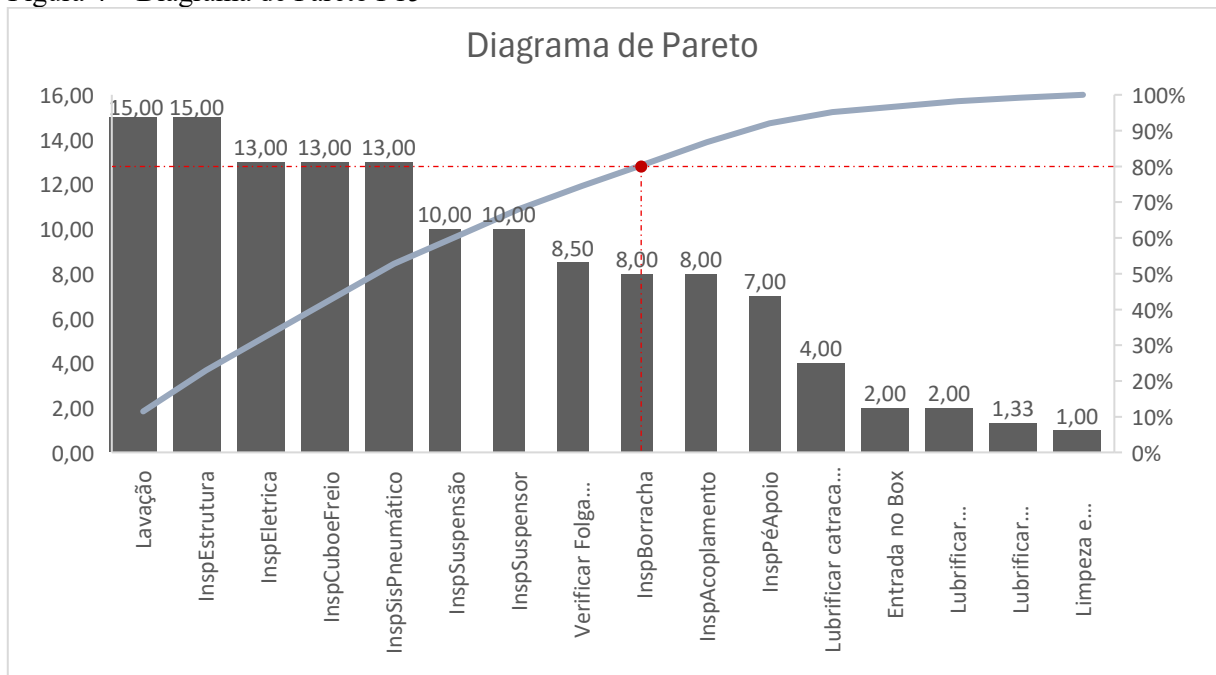
Fonte: Elaboração própria (2025)

É importante distinguir o tempo de ciclo observado do somatório das médias por atividade. O tempo de 115,00 minutos corresponde ao intervalo entre início e liberação da P15, enquanto a soma das médias das atividades representa o esforço total de trabalho registrado, sem considerar que várias tarefas ocorrem ao mesmo tempo.

No processo estudado, dois mecânicos executam manutenções em paralelo enquanto o inspetor realiza o bloco de inspeções; o veículo só é liberado após a conclusão conjunta dessas frentes. Por isso, a soma das médias por atividade não deve ser lida como tempo cronológico total da P15, pois parte desse conteúdo de trabalho é concomitante.

Nessa ótica, o box-plot descreve a variabilidade do tempo de ciclo real, ao passo que o diagrama de Pareto (Figura 4) serve para priorizar as atividades que mais consomem tempo de trabalho.

Figura 4 – Diagrama de Pareto P15



Fonte: Elaboração própria (2025)

#### 4.2.1 Tempos Cronometrados

Para cada um dos 16 elementos da manutenção P15 foram calculados tempo médio observado (TMO), desvio-padrão ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação ( $CV = \sigma/TMO \times 100\%$ ), com base nos 35 ciclos cronometrados, conforme recomendado por Barnes (1980) para avaliar a consistência de cronometragens industriais.

Os resultados (Tabela 1) indicam que 15 das 16 atividades apresentam CV inferior a 20%, caracterizando boa repetibilidade. Barnes (1980, p. 267) estabelece que coeficientes abaixo de 20% indicam consistência adequada para determinação de tempos-padrão. Apenas Entrada no Box ( $CV = 21,45\%$ ) superou ligeiramente esse patamar, devido a variações no posicionamento do veículo, confirmando a adequação da cronoanálise para parametrização do modelo de simulação.

O tempo-padrão foi calculado adotando fator de ritmo (FR) igual a 1,0, uma vez que os ciclos representaram desempenho normal de operadores treinados, sem aceleração ou retardamento (BARNES, 1980; NIEBEL; FREIVALDS, 2009). Barnes (1980, p. 301) define FR como "procedimento para ajustar o tempo médio observado ao tempo requerido por operador qualificado trabalhando em ritmo normal", correspondendo à "velocidade de trabalho sem esforço especial ou tensão" (NIEBEL; FREIVALDS, 2009, p. 355).

Sobre o tempo normal ( $TN = TMO \times FR = 115,0$  min) aplicou-se fator de tolerância de 15% para necessidades pessoais, fadiga e demoras inevitáveis. Niebel e Freivalds (2009, p. 419)

especificam que "tolerâncias para fadiga tipicamente variam entre 10% e 15% para trabalhos em pé, com movimentação de cargas moderadas e condições de oficina", ajustando-se ao perfil da P15. O procedimento resultou em TP de 132,25 minutos (Tabela 1), utilizado como referência no cenário baseline da simulação. Esse valor considera o paralelismo entre atividades de manutenção (dois mecânicos) e inspeções (um inspetor), de modo que o somatório aritmético individual (150,45 min) representa conteúdo total de trabalho, não o tempo de ciclo real.

Tabela 1 — Tempos-padrão da manutenção preventiva P15 de forma sequencial.

<b>Atividade</b>	<b>TMO (min)</b>	<b><math>\sigma</math> (min)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>TP (min)</b>
Lavação	15,00	1,85	12,53	17,25
Entrada no Box	2,00	0,42	21,45	2,30
Verificar folga nos cubos de roda	8,50	0,63	7,42	9,78
Lubrificar Ajustador Automático e Bucha do eixo S	2,00	0,15	7,55	2,30
Lubrificar catraca de amarração	4,00	0,29	7,36	4,60
Lubrificar componentes de trava 5ª roda	1,33	0,10	7,67	1,53
Inspeção Borracharia	8,00	0,84	10,46	9,20
Inspeção Elétrica	13,00	1,07	8,28	14,95
Inspeção Estrutura	15,00	1,15	7,61	17,25
Inspeção Acoplamento	8,00	0,90	11,36	9,20
Inspeção do Cubo e freio	13,00	1,15	8,94	14,95
Inspeção Suspensão	10,00	0,77	7,87	11,50
Inspeção Suspensor	10,00	0,79	7,82	11,50
Inspeção Sistema Pneumático	13,00	1,23	9,29	14,95
Inspeção Pé de apoio	7,00	0,83	11,76	8,05
Limpeza e liberação	1,00	0,19	19,36	1,15
<b>TOTAL P15</b>	-	-	-	-
<b>Sem paralelismo</b>	<b>130,83</b>	-	-	<b>150,45</b>
<b>Com paralelismo</b>	<b>115,00</b>			<b>132,25</b>

Fonte: Elaboração própria (2025). Nota: TP conforme Barnes (1980): FR=1,0, FT=15%.

#### 4.2.2 Análise de Movimentos e Deslocamentos

A análise dos deslocamentos no ciclo P15 permitiu mensurar a parcela do tempo associada à movimentação interna na oficina. As distâncias foram medidas diretamente no layout e convertidas em tempo com base em velocidade média de caminhada de 1,2 m/s, em linha com protocolos experimentais de análise de marcha que adotam essa velocidade como referência fixa para estudos controlados (SANTOS et al., 2022), resultando em percurso total de 418,9 m por ciclo, equivalentes a 349,3 s, ou 5,82 min por manutenção, isto é, 5,1% do tempo médio observado de 115,0 min.

A Tabela 2 apresenta a distribuição dessas distâncias por operador, evidenciando maior participação dos mecânicos, com 186,7 m por ciclo (44,6%), seguidos do inspetor, com 149,4 m (35,7%), e das operações auxiliares, com 82,8 m (19,7%). A Tabela 3 complementa essa leitura ao agrupar as atividades conforme o padrão de movimentação, mostrando que as maiores distâncias médias concentram-se nas categorias de busca de componentes leves, busca de ferramentas pesadas e busca múltipla, esta última com média de 115,0 m e tempo médio de 1,60 min por ocorrência.

Tabela 2 — Distâncias totais percorridas no ciclo P15.

<b>Operador</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>% do Ciclo</b>
Mecânicos	186,7	44,6%
Inspetor (9 inspeções)	149,4	35,7%
Operações auxiliares	82,8	19,7%
<b>TOTAL CICLO P15</b>	<b>418,9</b>	<b>100%</b>

Fonte: Elaboração própria (2025).

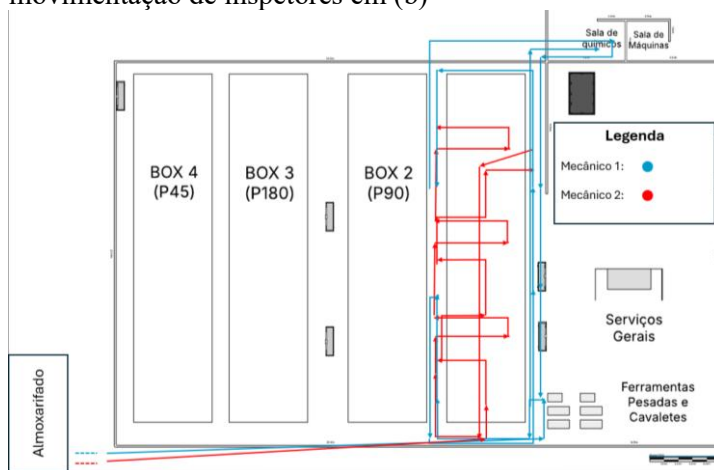
Tabela 3 — Categorização de atividades P15 por padrão de movimentação.

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>	<b>Atividades</b>	<b>Distância média (m)</b>	<b>Tempo médio (min)</b>
Cat. 1	Sem deslocamento externo	6	17,5	0,24
Cat. 2	Busca componentes leves	4	52,5	0,73
Cat. 3	Busca ferramentas pesadas	3	32,5	0,45
Cat. 4	Busca múltipla	3	115,0	1,60

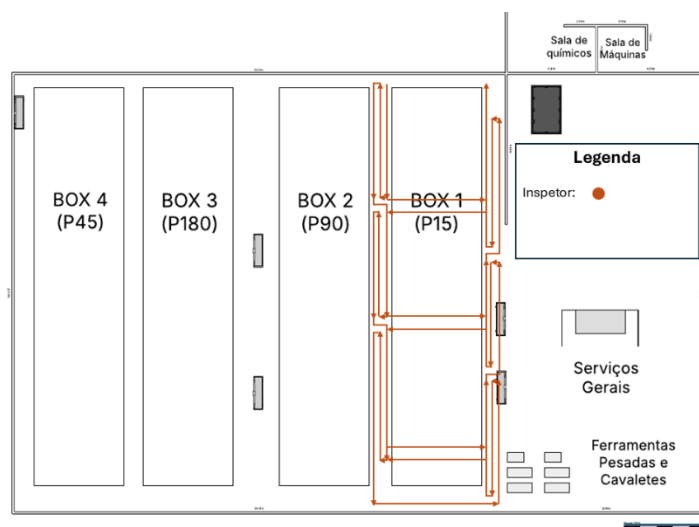
Fonte: Elaboração própria (2025)

A Figura 5 ilustra visualmente esses percursos no layout da oficina. Na Figura 5a, o diagrama de espaguete evidencia os deslocamentos dos mecânicos entre o Box P15, a área de ferramentas e o almoxarifado, enquanto a Figura 5b mostra o circuito sequencial de inspeções realizado pelo inspetor ao redor do veículo. Em conjunto, os resultados indicam que a principal perda não decorre da execução técnica em si, mas da dispersão espacial de materiais, ferramentas e pontos de apoio. O tempo total em deslocamento (5,1% do TMO) situa-se abaixo do limite de 40% estabelecido por Groover (2010) como ponto crítico a partir do qual problemas de layout passam a dominar o tempo de ciclo; contudo, a existência de estoques dispersos e trajetos de até 53 m justifica as intervenções de layout propostas, uma vez que essas perdas são evitáveis por reorganização espacial dos recursos.

Figura 5 –Diagrama de espaguete da movimentação de mecânicos em (a) e Diagrama de espaguete da movimentação de inspetores em (b)



a)



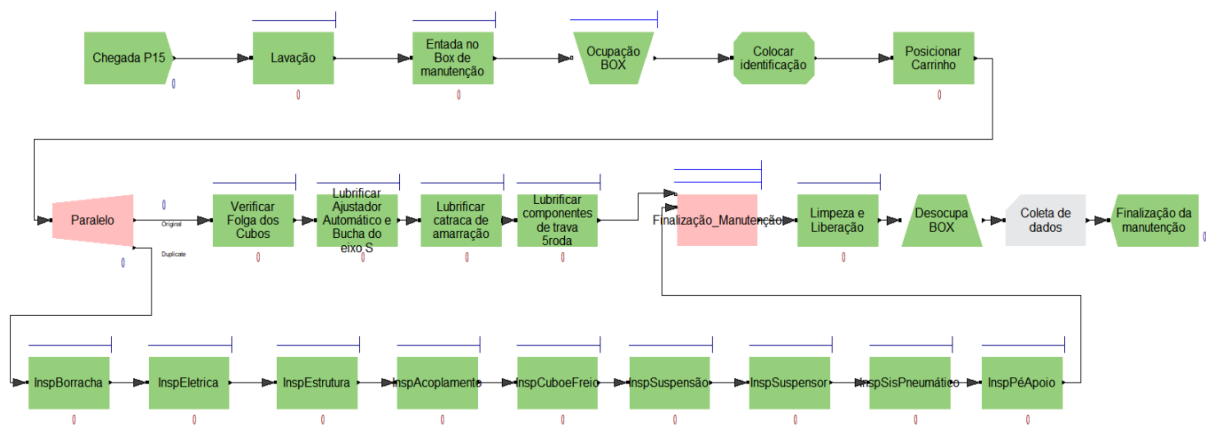
b)

Fonte: Elaboração própria (2025)

### 4.3 Simulação de eventos discretos

A simulação de eventos discretos do ciclo P15 foi desenvolvida no software Arena, versão 16.20.00, edição Student, licenciada para uso educacional, que utiliza o mesmo motor de simulação da versão profissional e, portanto, garante equivalência lógica e estatística dos resultados dentro dos limites de escala da licença acadêmica. A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático do modelo, no qual o veículo entra no sistema em intervalos programados, segue para lavagem, aguarda disponibilidade do Box P15 em fila e, em seguida, é processado por dois mecânicos em paralelo na manutenção física (troca de óleo, filtros, lubrificação), enquanto um inspetor executa nove verificações sequenciais (freios, pneus, suspensão, componentes elétricos). O módulo Batch sincroniza a conclusão dessas frentes de trabalho, assegurando que o veículo só seja liberado após o término completo da manutenção e da inspeção.

Figura 6 — Diagrama esquemático do modelo de simulação.



Fonte: Autoria própria e dados da simulação (2025).

Os tempos de processamento das atividades foram representados por distribuições normais  $N(\mu, \sigma)$ , em que a média  $\mu$  e o desvio-padrão  $\sigma$  de cada operação foram estimados diretamente a partir da cronoanálise das 35 manutenções P15. A partir do tempo médio observado de ciclo de 115,0 minutos, adotou-se fator de tolerância de 15%, compatível com as recomendações de Barnes (1980) e de Niebel e Freivalds (2009) para trabalhos em pé com movimentação moderada, obtendo-se tempo-padrão global de 132,25 minutos, que foi utilizado como referência de engenharia de métodos para o cenário baseline, mantendo-se, contudo, a variabilidade empírica observada por meio dos desvios-padrão estimados em campo.

Do ponto de vista operacional da simulação, o modelo foi configurado com chegadas determinísticas a cada 120 minutos entre manutenções P15, refletindo o cronograma de programação adotado pela equipe de manutenção ao longo do turno. Considerou-se horizonte

de simulação de 180 dias, com período de aquecimento de 30 dias e 50 repetições, empregando intervalo de confiança de 95% para os indicadores analisados; nessa configuração, o tempo médio simulado de ciclo manteve-se compatível com o tempo-padrão de 132,25 minutos e a utilização média do Box P15, em torno de 81%, indicou operação próxima ao limite de capacidade do recurso.

Em termos de capacidade do recurso, o Box P15 foi representado no modelo de simulação como recurso de capacidade unitária, de modo que sua utilização corresponde à fração do tempo em que esse recurso permaneceu efetivamente ocupado processando manutenções P15 em relação ao tempo total de disponibilidade no horizonte de simulação. A taxa de aproximadamente 83% reportada nos resultados do Arena decorre, portanto, da razão entre o tempo acumulado de ocupação do recurso e o tempo total simulado, agregada sobre as 50 repetições do experimento.

A partir do modelo baseline validado, foram definidos dois cenários experimentais para investigar o impacto de alterações de layout e de métodos sobre o tempo de ciclo da manutenção P15 e a utilização dos recursos. O Cenário 1 (baseline) representa a configuração de referência da oficina, com tempo-padrão global de 132,25 minutos para a P15, chegadas determinísticas a cada 120 minutos e alocação de 1 Box P15, 2 mecânicos em paralelo e 1 inspetor. O Cenário 2 (Layout + Padronização + Realocação) reúne três intervenções complementares, derivadas das causas críticas apontadas pelo Diagrama de Ishikawa e pela análise de movimentos, e atua simultaneamente sobre os deslocamentos internos, as esperas operacionais e a sequência das inspeções.

Do ponto de vista operacional, o Cenário 2 propõe, em primeiro lugar, uma reorganização física do layout, aproximando os pontos de armazenagem de ferramentas, consumíveis e equipamentos de apoio do Box P15 e instituindo uma etapa padronizada de posicionamento do carrinho de apoio antes do início da manutenção, o que reduz as distâncias médias percorridas em atividades de busca. Em segundo lugar, introduzem-se procedimentos operacionais padronizados para preparação, execução e finalização da P15, substituindo variações informais por uma sequência única de passos e reduzindo o tempo gasto em deslocamentos e ajustes desnecessários durante o serviço. Por fim, a sequência das nove inspeções é reordenada de modo a agrupar verificações por lado do veículo e por sistema (freios, suspensão, pneus, componentes elétricos), eliminando trajetos redundantes evidenciados nos diagramas de deslocamento e encurtando os percursos totais do inspetor ao redor do conjunto cavalo-carreta.

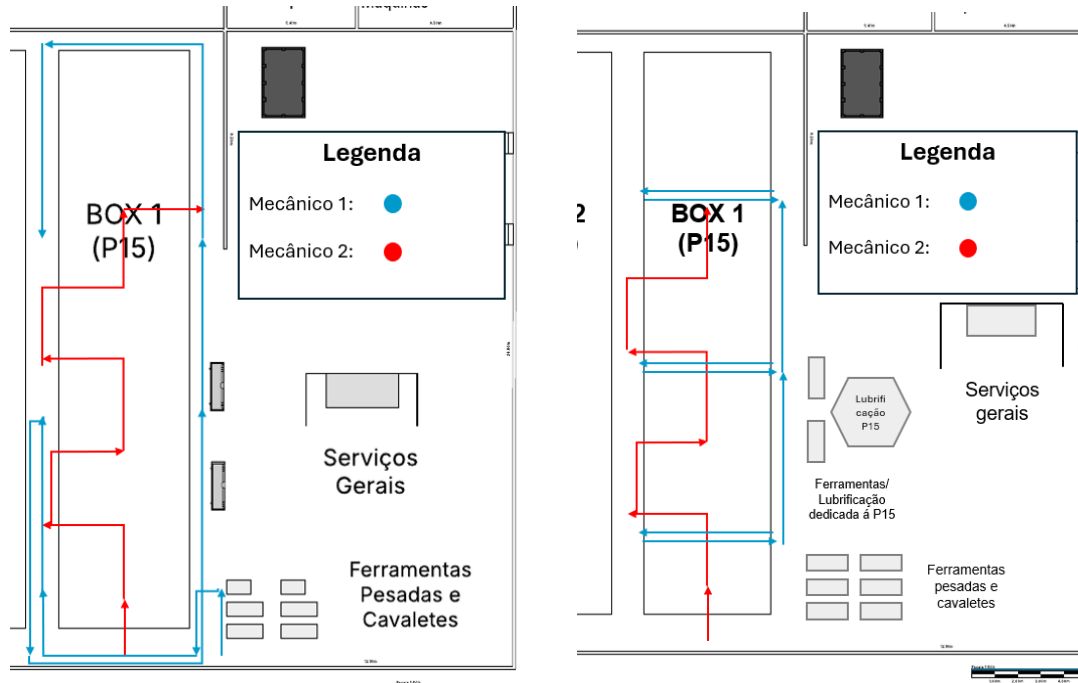
Para o Cenário 2, os parâmetros das distribuições normais foram construídos a partir dos tempos-padrão de cada atividade, estimados nos 35 ciclos cronometrados e consolidados na Tabela 1. Os fatores de redução  $r_i$  aplicados a cada grupo de atividades foram definidos com base nas oportunidades de encurtamento de percurso identificadas na análise de movimentos, concentradas nas categorias 2, 3 e 4 da Tabela 3, que reúnem as atividades de maior deslocamento, e nas mudanças de layout e sequência de inspeções propostas nas Figuras 6a–6b. Em termos operacionais, cada fator  $r_i$  representa a proporção do tempo médio do Cenário 1 que permanece no Cenário 2 (por exemplo,  $r_i = 0,80$  indica redução de 20% do tempo médio daquela atividade), sendo aplicado diretamente sobre o tempo médio original de cada atividade, enquanto os desvios-padrão foram mantidos inalterados, uma vez que as intervenções atuam sobre o valor esperado do tempo de execução sem alterar a variabilidade inerente ao processo.

#### **4.4 Análise Comparativa e Discussão dos Resultados**

O modelo baseline, construído a partir do tempo-padrão global de 132,25 min (calculado com  $FR = 1,0$  e  $FT = 15\%$  sobre o tempo médio observado de 115,0 min), foi validado com tempo médio de ciclo simulado de 115,02 min, estatisticamente equivalente ao observado em campo ( $p = 0,787$ ). Esse resultado serve como referência para a comparação com o Cenário 2, que integra reorganização do layout, implementação de POPs e reordenação da sequência de inspeção, conforme representado na Figura 7. No Cenário 2, o tempo médio de ciclo foi reduzido para 85,75 min, diferença de 29,27 min ( $-25,45\%$ ) altamente significativa ( $p < 0,001$ ; IC 95%), confirmando que as intervenções produziram mudança estrutural no desempenho do processo.

Figura 7 — Comparativo baseline vs. cenário 2; (i) Verificação folga no cubo de roda; (ii) Lubrificação no ajustador automático e bucha do eixo S; (iii) Lubrificação da 5ª roda e catracas de amarração; (iv) Inspeções.

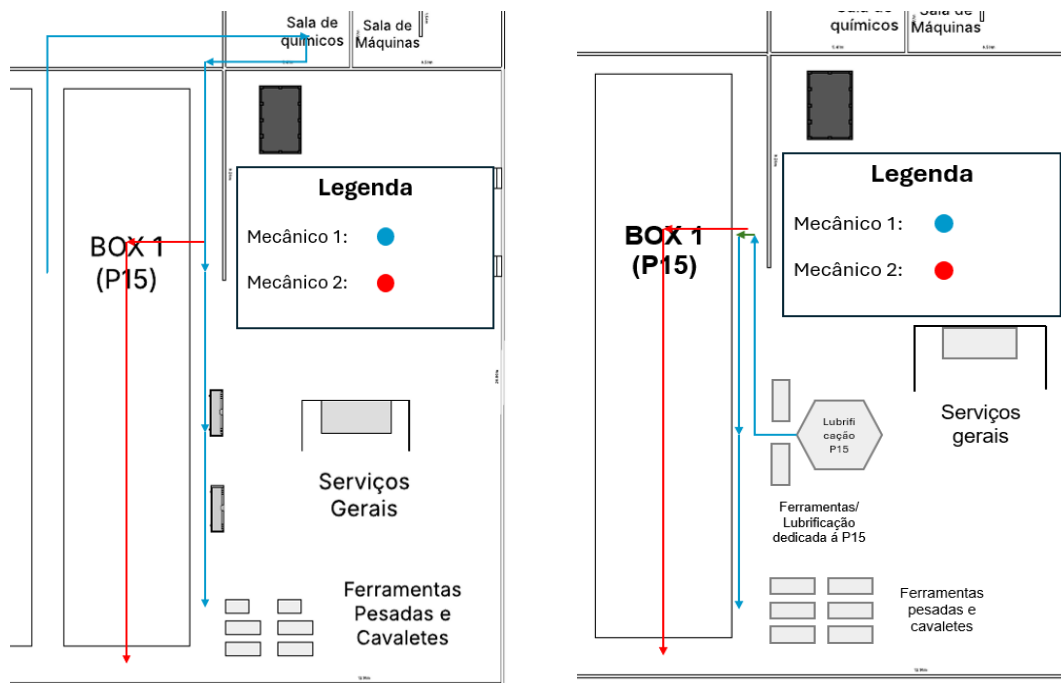
(i)



a)

b)

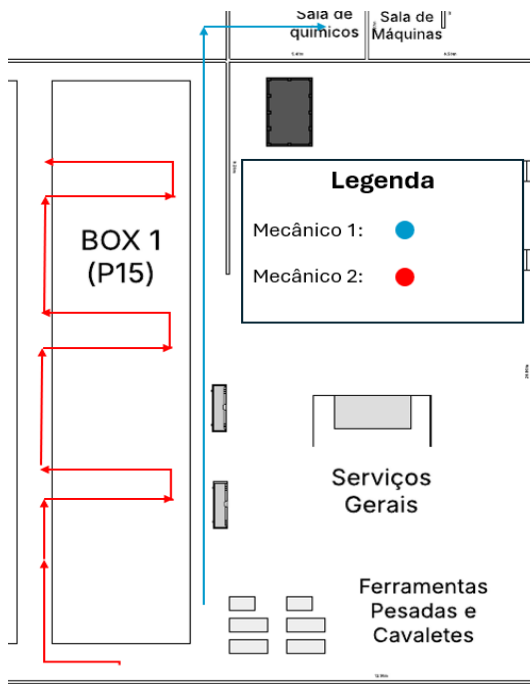
(ii)



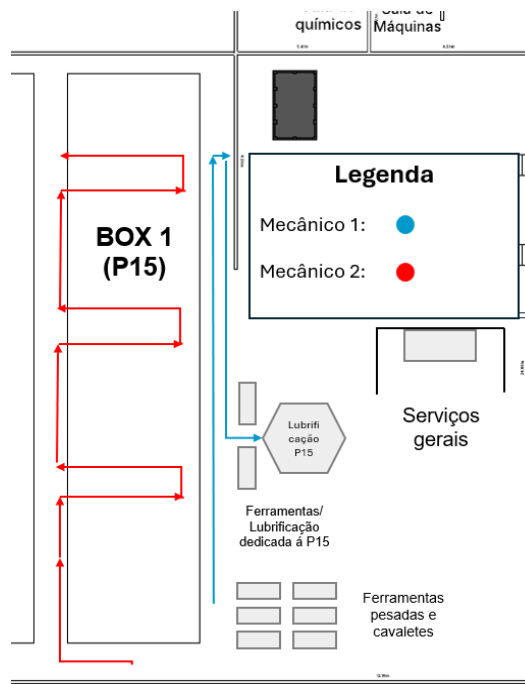
c)

d)

(iii)

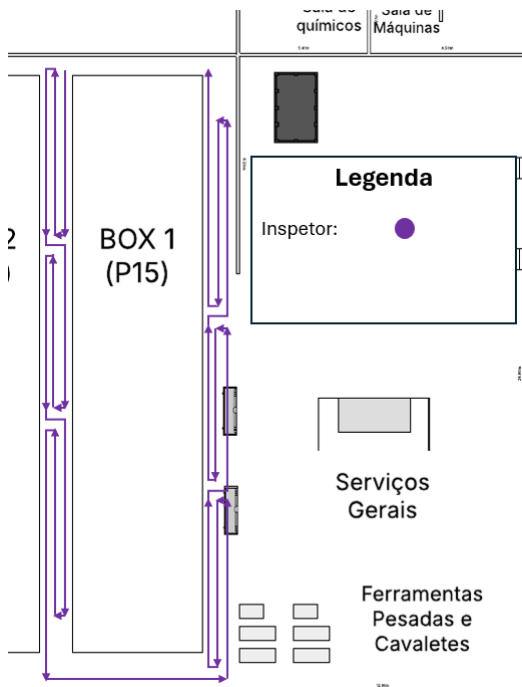


e)

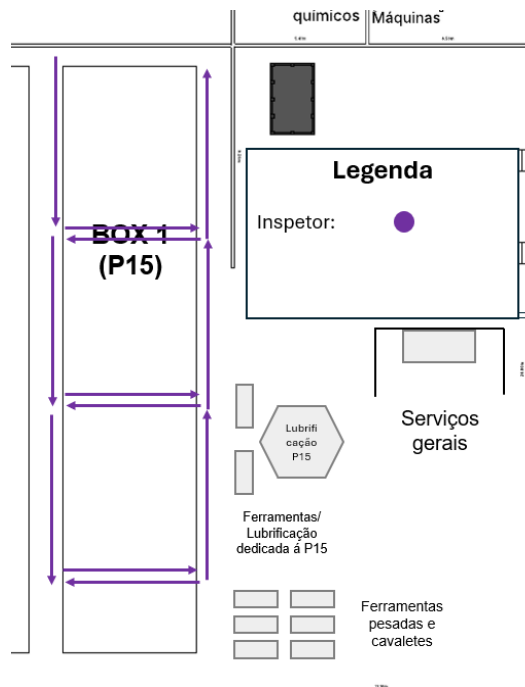


f)

(iv)



g)



h)

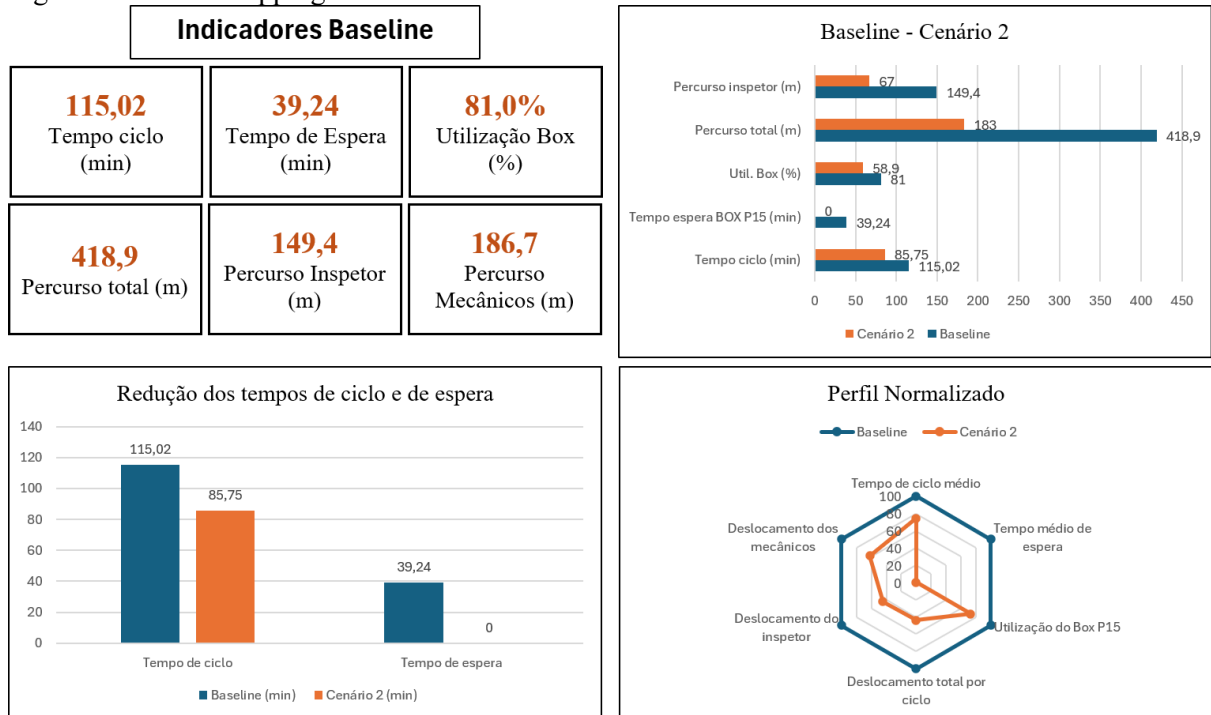
Fonte: Autoria Própria (2025).

Ao decompor de onde vieram esses ganhos, verifica-se que as tarefas de lubrificação apresentaram redução média de 34,8% e os blocos de inspeção, de 39,7%. No baseline, o percurso total por ciclo era de 418,9 m (5,82 min), distribuídos entre mecânicos (186,7 m), inspetor (149,4 m) e operações auxiliares (82,8 m), com destaque para as atividades de busca múltipla, que acumulavam até 115,0 m por ocorrência (Tabela 3, Cat. 4). A reorganização física do layout, ao aproximar ferramentas e consumíveis do Box P15, reduziu os deslocamentos nas categorias 2, 3 e 4 (busca de componentes leves, ferramentas pesadas e busca múltipla), encurtando o percurso total de 418,9 m para aproximadamente 183 m — redução de 236 m, ou 56,2%. Simultaneamente, a reordenação das inspeções por lado do veículo encurtou o circuito do inspetor de 149,4 m para 67 m, eliminando retornos e cruzamentos ao redor do conjunto. O resultado agregado é que o tempo de execução efetiva das atividades caiu, reduzindo a parcela não produtiva do ciclo, representada por deslocamentos e esperas no box.

Esse encurtamento do tempo de execução das atividades, combinado com o novo fluxo de trabalho, alterou também a dinâmica de ocupação dos recursos. A utilização programada (Scheduled Utilization) do Box P15, definida como a razão entre o tempo acumulado de ocupação do recurso e o total de tempo disponível no horizonte de simulação, passou de 81% no baseline para 58,9% no Cenário 2. Esse recuo representa maior capacidade de absorção de variabilidade operacional sem formação de fila. O reflexo mais direto aparece no tempo de espera da entidade Frota: no baseline, o tempo médio de espera era de 39,24 min — ou seja, quase um terço do ciclo total correspondia a espera e não a processamento. No Cenário 2, esse valor caiu a aproximadamente zero, o que significa que o veículo passou a entrar e ser atendido de forma contínua, sem acúmulo entre etapas.

A partir da Figura 8, observa-se que a reorganização do fluxo e do arranjo físico resultou em um perfil normalizado mais equilibrado, com melhoria conjunta dos indicadores de tempo e de deslocamento quando comparados ao baseline.

Figura 8 – Factor Mapping Baseline e Cenário 2.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Em síntese, a consistência dos resultados decorre do fato de que a comparação foi realizada sobre um baseline previamente validado em relação ao sistema real, com tempo médio simulado de 115,02 min estatisticamente equivalente ao observado em campo de 115,0 min ( $p = 0,787$ ), e sob condições experimentais controladas de chegadas determinísticas a cada 120 min, horizonte de 180 dias, aquecimento de 30 dias, 50 repetições e intervalo de confiança de 95%. Nesse contexto, o Cenário 2 conservador reduziu o tempo de ciclo para 85,75 min, com ganho absoluto de 29,27 min (25,45%), ao mesmo tempo em que diminuiu a utilização agendada do Box P15 de aproximadamente 81,0% para cerca de 58,9% e praticamente eliminou o wait time da entidade Frota, de 39,24 min para valor próximo de zero, evidenciando que as intervenções propostas não apenas encurtaram atividades isoladas, mas também aumentaram a estabilidade do fluxo e reduziram a pressão sobre o recurso crítico do sistema.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo alcançou seu objetivo geral ao propor e validar, por meio de simulação de eventos discretos, melhorias para o processo de manutenção preventiva P15 em oficina automotiva de frota florestal pesada, integrando estudo de tempos e movimentos, análise qualitativa por Diagrama de Ishikawa e modelagem computacional para quantificar o impacto

de intervenções estruturais sobre o tempo de ciclo, a utilização de recursos e a formação de filas internas. A trajetória metodológica partiu da determinação do tempo-padrão global de 132,25 min (FR = 1,0; FT = 15% sobre o TMO de 115,0 min), utilizado como referência de engenharia para o dimensionamento teórico do processo. A validação do modelo, contudo, foi conduzida em relação ao tempo médio observado de 115,0 min, assegurando aderência às condições efetivas de operação. O modelo baseline apresentou tempo médio de ciclo simulado de 115,02 min, estatisticamente equivalente ao observado ( $p = 0,787$ ), confirmando a adequação dos parâmetros de entrada e da lógica de modelagem, e a partir desse modelo validado foram implementadas três intervenções complementares no Cenário 2: reorganização do layout, reduzindo o percurso total de 418,9 m para aproximadamente 183 m (-56,2%), com eliminação das atividades de busca de maior deslocamento; implementação de Procedimentos Operacionais Padronizados, substituindo práticas informais por sequência única de preparação, execução e finalização; e reordenação da sequência de inspeção, encurtando o circuito do inspetor de 149,4 m para 67 m e eliminando retornos ao redor do conjunto cavalo-carreta.

A simulação do Cenário 2 demonstrou redução do tempo médio de ciclo para 85,75 min, diferença de 29,27 min (-25,45%;  $p < 0,001$ ; IC 95%), indicando mudança estrutural no desempenho do processo. A decomposição dos ganhos revelou que as tarefas de lubrificação apresentaram redução média de 34,8% e os blocos de inspeção, de 39,7%, evidenciando que os ganhos decorreram de reorganização espacial e lógica que eliminou movimentos desnecessários. Além da redução do tempo de ciclo, a utilização agendada do Box P15 caiu de aproximadamente 81,0% para 58,9%, gerando maior folga operacional, enquanto o tempo médio de espera da entidade Frota foi praticamente eliminado, passando de 39,24 min para valor próximo de zero, configurando atendimento contínuo sem acúmulo entre etapas. Esses resultados evidenciam que as intervenções não apenas encurtaram atividades isoladas, mas também aumentaram a estabilidade do fluxo e reduziram a pressão sobre o recurso crítico do sistema, transformando um processo com alta taxa de ocupação e formação recorrente de fila em um processo com capacidade residual para absorção de variabilidade operacional.

Do ponto de vista prático, o trabalho demonstra que a integração de cronoanálise, diagramas de percurso e simulação de eventos discretos permite avaliar, de forma controlada e sem interrupção da operação corrente, o impacto de mudanças de layout e padronização de procedimentos sobre o desempenho de processos de manutenção automotiva pesada. Sob a perspectiva metodológica, a pesquisa contribui com um referencial que documenta as etapas de diagnóstico qualitativo, quantificação de tempos e movimentos, parametrização de modelo e

experimentação de cenários, oferecendo um protocolo replicável para contextos de manutenção de frotas pesadas, especialmente em operações florestais, mineração e transporte de carga, nas quais a disponibilidade de equipamentos críticos afeta diretamente a continuidade operacional. Embora os resultados quantitativos sejam aplicáveis especificamente à unidade estudada, a abordagem metodológica é transferível para outros contextos, uma vez que a lógica de decomposição de processos, identificação de desperdícios e experimentação por simulação constitui prática amplamente reconhecida na literatura de engenharia de produção.

O delineamento adotado impõe limitações quanto ao escopo: a coleta de dados restringiu-se à manutenção P15 em uma única oficina, observada durante 12 semanas (junho a agosto de 2025), no turno diurno, totalizando 35 manutenções cronometradas e 15 entrevistas com colaboradores, circunscrevendo a validade dos achados a contextos com características semelhantes. A análise concentrou-se em Método e Meio Ambiente (67% das menções no Diagrama de Ishikawa), excluindo do escopo as manutenções P45, P90, P180, intervenções corretivas emergenciais (~5% das ocorrências), análise detalhada de custos financeiros e gestão de estoques. No campo qualitativo, a utilização de 15 entrevistas está sujeita a limitações inerentes a relatos de percepção, embora a triangulação entre entrevistas, cronoanálise e simulação tenha mitigado esse viés. No campo quantitativo, o modelo utilizou chegadas determinísticas a cada 120 min e não representou eventos de baixa frequência, simplificando a variabilidade real do sistema. Como estratégias de mitigação, foram adotadas triangulação de métodos, validação estatística do baseline ( $p = 0,787$ ) e análise de sensibilidade com variação de  $\pm 10\%$  nos parâmetros críticos, confirmando robustez dos resultados. Ainda assim, os resultados devem ser entendidos como comparações relativas entre cenários, não como previsões exatas do desempenho futuro em condições não modeladas.

Como desdobramentos desta pesquisa, recomendam-se três linhas de investigação: extensão do modelo para as manutenções P45, P90 e P180, verificando se as intervenções produzem ganhos proporcionais em manutenções de maior complexidade; desenvolvimento de um modelo integrado multi-box, representando o compartilhamento de recursos entre os quatro boxes da oficina e permitindo otimização conjunta de alocação e programação; e acompanhamento pós-implementação, caso as intervenções sejam implementadas, por meio de novo ciclo de cronoanálise com pelo menos 30 observações, comparação estatística entre tempos reais e simulados e documentação de lições aprendidas. A convergência dessas perspectivas permitiria consolidar um sistema de gestão da manutenção preventiva baseado em evidências quantitativas, com potencial de replicação em outras unidades da empresa e em

organizações que enfrentem desafios similares de organização de oficinas de manutenção automotiva pesada.

## REFERÊNCIAS

AHUJA, I. P. S.; KHAMBA, J. S. Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 25, n. 7, p. 709-756, 2008.

BANKS, J. et al. *Discrete-event system simulation*. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2011.

BARNES, R. M. *Motion and time study: design and measurement of work*. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.

CARVALHO, M. et al. Melhoria de manutenção preventiva mediante simulação computacional. *Revista Produção Online*, v. 16, n. 2, p. 567-584, 2016.

CEPEA — CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. Informativo florestal. 2025. Disponível em: <https://www.cepea.org.br>. Acesso em: 24 nov. 2025.

CESAR, E. A. Fundamentação e aplicação do Diagrama de Ishikawa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2011, Ponta Grossa. Anais [...]. Ponta Grossa: APREPRO, 2011.

CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. 5. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2021.

FERREIRA, F. A. C. et al. Work efficiency and harvester costs in Brazilian eucalyptus plantations. *International Journal of Forest Engineering*, v. 35, p. 21-28, 2023.

FAMASUL — FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DE MATO GROSSO DO

SUL. Boletim florestas plantadas. n. 57, 2025. Disponível em: <https://portal.sistemapamasul.com.br>. Acesso em: 24 nov. 2025.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017

GROOVER, M. P. Work systems and the methods, measurement, and management of work. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010.

ISHIKAWA, K. Guide to quality control. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1985.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation modeling and analysis. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

LIBRELATO. Linha Florestal: especificações técnicas. Série Evolut. Caxias do Sul: Librelato, 2024. Catálogo técnico.

MACHADO, C. C.; GURGEL, G. A.; GAMEIRO, A. H. Custos de transporte de madeira em caminhões: uma análise técnica e econômica. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 815–825, 2015.

MACIEL, R. et al. Aplicação de simulação de eventos discretos na gestão de manutenção florestal. Revista Brasileira de Engenharia Florestal, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2024.

MOUBRAY, J. Reliability-centered maintenance. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

MÁRQUEZ, A. C. The maintenance management framework. London: Springer, 2007.

NIEBEL, B. W.; FREIVALDS, A. Methods, standards, and work design. 12. ed. New York: McGraw-Hill, 2009.

PORTAL CELULOSE. Com celulose em destaque, Mato Grosso do Sul lidera crescimento econômico no Brasil em 2025. 2025. Disponível em: <https://portalcelulose.com.br>. Acesso em:

24 nov. 2025.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, v. 7, n. 1, p. 12-24, 2013.

SEMADESC-MS. Com expansão de 500% na área de florestas plantadas, MS mantém aporte bilionário de investimentos em celulose. 2025. Disponível em: <https://www.semadesc.ms.gov.br>. Acesso em: 24 nov. 2025.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. *Administração da produção*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

TAYLOR, F. W. *The principles of scientific management*. New York: Harper & Brothers, 1911.

VENTER, F. M. F. Using a discrete-event simulation model to identify bottlenecks and determine the efficiency in a maintenance workshop. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – University of Pretoria, Pretória, 2017.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Simon & Schuster, 1996.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.