



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Mineração de Processos: Otimizando a Gestão de RSU em Cooperativas com a Metodologia PM2 e Análise de Logs

Roberto Defacio Padroni da Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná

Carolina Cassiana Maess

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná

Thaís Gaissler Vellozo Maceno

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná

Silvana Pereira Detro

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná

Marcell Mariano Corrêa Maceno

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná

Resumo: Este estudo avalia processos de triagem de resíduos sólidos urbanos (RSU) em cooperativas, utilizando a metodologia PM2 e o software Disco com base em um *log* artificial, devido à escassez de dados reais nessa área. Por meio da mineração de processos, analisaram-se mapas de frequência/performance, variantes e gargalos operacionais. O processo revelou que 75% dos resíduos seguiram o fluxo principal, enquanto 25% apresentaram desvios por inconsistências, erros humanos ou encerramentos antecipados. A triagem manual foi responsável por 4.208 erros humanos, gerando retrabalhos em 680 casos e comprometendo a conformidade nos demais. Observou-se um alto índice de reclassificações, como 452 unidades de plástico tratadas como papel, evidenciando falhas na triagem inicial. A pesagem apresentou 96% de registros corretos, mas 4% exigiram ajustes devido a problemas técnicos. Em média, os materiais permaneceram 93 minutos armazenados, destacando gargalos nesse estágio. Além disso, 60% da carga operacional foi concentrada em 15 dos 60 operadores. Os resultados demonstram a relevância da mineração de processos como ferramenta para identificar ineficiências, propor melhorias e reforçar a rastreabilidade nos fluxos operacionais. Conclui-se que a otimização dos processos em cooperativas deve priorizar automação na triagem, redistribuição de carga entre operadores e estratégias para reduzir desvios e retrabalhos.

Palavras-chave: Mineração de Processos, PM2, RSU, Triagem, Disco.

Process Mining: Optimizing MSW Management in Cooperatives with the PM2 Methodology and Log Analysis

Abstract: This study evaluates municipal solid waste (MSW) sorting processes in cooperatives, using the PM2 methodology and Disco software based on an artificial log, due to the scarcity of real data in this area. Through process mining, frequency/performance maps, variants, and operational bottlenecks were analyzed. The process revealed that 75% of the waste followed the main flow, while 25% deviated due to inconsistencies, human errors, or premature terminations. Manual sorting was responsible for 4,208 human errors, generating rework in 680 cases and compromising compliance in the remainder. A high rate of reclassifications was observed, such as 452 plastic units misclassified as paper, highlighting flaws in initial sorting. Weighing showed 96% of correct records, but 4% required adjustments due to technical issues. On average, materials remained stored for 93

minutes, emphasizing bottlenecks at this stage. Additionally, 60% of the operational workload was concentrated on 15 out of 60 workers. The results demonstrate the relevance of process mining as a tool to identify inefficiencies, propose improvements, and strengthen traceability in operational flows. It is concluded that process optimization in cooperatives should prioritize automation in sorting, workload redistribution among operators, and strategies to reduce deviations and rework.

Keywords: Process Mining, PM2, MSW, Sorting, Disco.

1. Introdução

O Brasil pode ser considerado um grande gerador de resíduos sólidos urbanos (RSUs), tendo uma massa total gerada em 2023 de 80.957.467 t, correspondente 382 kg/hab.ano (ABREMA, 2024). Entretanto, desta massa total gerada, somente 6.731.389 t foram coletadas e encaminhadas para reciclagem, o que corresponde a cerca de 8,3% do total de RSU enviados para reciclagem (ABREMA, 2024).

Conforme a gravimetria nacional feita no Panorama da Abrelpe de 2020, este número está bem abaixo dos 33,6% de resíduos com potencial de reciclagem que poderiam ser separados na geração dos RSUs (ABRELPE, 2020).

Estes números ressaltam a dificuldade do país em coletar e reciclar os seus resíduos sólidos urbanos recicláveis, mas também mostram um potencial para aumento da atividade de coleta de reciclagem dos RSUs. No Brasil, a coleta de RSUs recicláveis normalmente ocorre pelo serviço público de coleta ou pela ação de catadores informais. Os materiais coletados são encaminhados para unidades de triagem (ABREMA, 2024), que tem como foco a segregação e a acumulação de resíduos passíveis de reciclagem.

Estas cooperativas recebem os resíduos e realizam as atividades de separação, prensagem, armazenamento e comercialização (FERREIRA et al., 2022). Na execução dos processos em cooperativas, é comum a existência de problemas, tais como: realização de todo o processo de separação de forma manual, falta de demarcação da área de operação, falta de área específica para estoque, falta de infraestrutura adequada e falta de informação documentada, como checklists, instruções de trabalho, dentre outros (GUIMARÃES, 2021).

Considerando os problemas na gestão de processos em cooperativas, pode-se dizer que a ferramenta de mineração de processos pode ser útil para minimizar estes referidos problemas. A mineração de processos visa descobrir, rastrear e melhorar os processos de uma empresa (KULIBABA, 2022), e ela pode trazer ganhos de robustez e de eficiência para o processo (PERES et al., 2023). A utilização da mineração de processos possibilita acompanhar os indicadores de desempenho de processo, bem como identificar os gargalos de produção e possíveis restrições de recursos (SYED et al., 2020; DINKOWSKI, 2025).

A mineração de processos se utiliza de informações de uma empresa, e que são extraídas através dos chamados log de eventos (KULIBABA, 2022). O *log* de eventos é definido como um registro histórico de dados, e que contém informações como atividades realizadas, pessoas vinculadas a atividade, tempos de início e fim de atividade (DUMAS; GARCÍA-BAÑUELOS, 2005; KULIBABA, 2022).

Cabe mencionar que existem sete benefícios da aplicação da mineração de processos em organizações, sendo eles: descoberta do modelo real de execução de processo aplicável a uma empresa; Definir se o processo atende a regras e procedimentos; Analisar interações entre pessoas e processos; Identificar gargalos de processo; Acompanhar a produtividade das pessoas do processo; Realizar a previsão de tempos de ciclo; e Identificar o relacionamento entre variáveis do processo (KULIBABA, 2022).

Neste sentido, este artigo teve por objetivo avaliar por meio da mineração um processo de separação e tratamento de resíduos identificando *gaps* e eventuais melhorias utilizando a metodologia PM2 e análise com o software Disco.

2. Metodologia

Nesta seção são apresentadas as etapas metodológicas contemplando as subatividades da metodologia PM2, além da descrição do processo em análise no estudo. Técnicas de mineração podem ser utilizadas para descobrir automaticamente modelos de processos, verificar a conformidade dos modelos de processos com a realidade e estender ou aprimorar modelos de processos utilizando dados de execuções reais de processos (Van Der Aalst, 2011).

Segundo Van Eck et al. (2015) a metodologia PM2 orienta organizações que realizam projetos de mineração de processos com o objetivo de melhorar o desempenho de processos ou a conformidade com normas e regulamentos. Os objetivos de um projeto de mineração de processos podem ser muito concretos, como, por exemplo, alcançar uma redução de custos de 10% para um determinado processo, ou mais abstratos, como, por exemplo, obter *insights* valiosos sobre o desempenho de diversos processos. Por meio do PM2, esses objetivos são traduzidos em questões de pesquisa concretas, que são refinadas e respondidas iterativamente, resultando em descobertas que servem de base para ideias de melhoria para o processo selecionado. Vale destacar, que não foram encontrados na literatura estudos aplicando mineração de processos em cooperativas que tratam RSU, sendo necessário desenvolver o *log* artificial em estudo.

2.1 Descrição das etapas do PM2

De acordo com Dos Santos et al. (2025), a aplicação do PM2 começa pela elaboração das perguntas de pesquisa, etapa denominada de planejamento. Essa etapa é muito importante pois pode garantir assertividade na coleta de dados, bem como a conformidade do processo e/ou a melhora em seu desempenho. A segunda fase consiste na extração de dados do sistema, ou *log* de dados. Se esse conjunto de informações não responder às perguntas previamente elaboradas ou questionamentos subsequentes, esse processo deve ser repetido. Na sequência, é conduzido o processamento de dados, nesta fase o *log* de dados é organizado para posterior análise. O quarto estágio é caracterizado pela entrada dos dados na ferramenta de mineração de processos para gerar as saídas.

Essa análise feita pelo software pode ocorrer de três formas, a primeira consiste em um Modelo de Descoberta, gerando automaticamente um diagrama que permite visualizar a sequência de atividades do processo como ela realmente ocorre, com caminhos paralelos e decisões identificadas pelo registro nos *logs* de evento; outra saída possível é o Modelo de Verificação de Conformidade, no qual a ferramenta compara o que realmente acontece no processo com o que idealmente aconteceria, de acordo com uma regra de negócio ou um modelo teórico, permitindo um diagnóstico dos desvios do processo analisado; uma terceira possibilidade, mais avançada, é a geração de um Modelo de Melhoria do Processo, que, com base na análise de conformidade, pode projetar uma versão otimizada do processo.

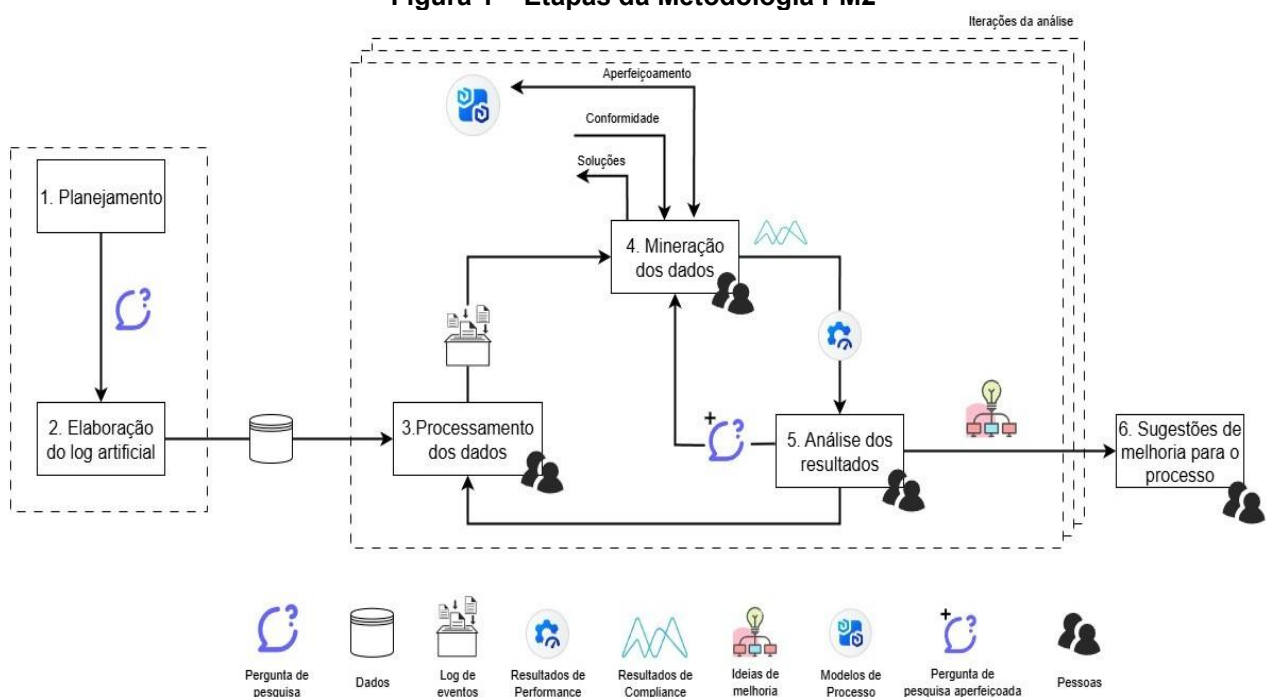
Na quinta etapa do método proposto, os dados são examinados a fim de responder às perguntas elaboradas e apresentar ideias de melhoria. Se os resultados não forem satisfatórios, a metodologia sugere voltar ao terceiro ou quarto estágio. O sexto, e último, passo da metodologia proposta requer a elaboração de percepções para modificar o processo atual.

2.2 Aplicação da metodologia PM2 a partir de um log de dados artificial

Este artigo tem como objetivo analisar um *log* de eventos artificial desenvolvido com o suporte do modelo de linguagem ChatGPT, tendo em vista a escassez de *logs* robustos de

eventos reais no contexto da sustentabilidade. Conforme destacado por Detro (2017), logs de eventos artificiais podem ser utilizados para suprir a ausência de registros completos, para trabalhar com logs inexistentes ou aqueles que apresentam excesso de ruídos. A autora ainda complementa que essa abordagem possibilita a investigação detalhada de diferentes cenários, permitindo verificar se os resultados desejados foram alcançados. Assim, o principal foco deste trabalho foi examinar o desempenho e a variabilidade do processo de triagem realizado por uma cooperativa de resíduos sólidos urbanos (RSU), utilizando um log de eventos anual processado no software Disco. Por meio de técnicas de mineração de processos (como mapas de frequência e performance, análise de variantes, *endpoints*, *loops* e recursos) e de conformidade (utilizando IMf e alinhamentos), busca-se identificar gargalos, desvios, retrabalhos e encerramentos antecipados. A Figura 1, adaptada a partir do estudo de Van Eck et al. (2015), ilustra o framework a ser aplicado nos softwares selecionados.

Figura 1 – Etapas da Metodologia PM2



Fonte: Os autores (2025).

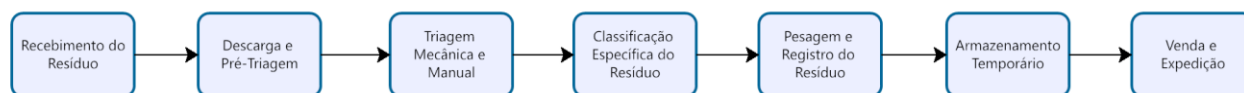
3. Aplicação da Metodologia PM2 na Cooperativa de Resíduos

Esta seção foi construída com base na Figura 1, sendo constituída das etapas de planejamento, elaboração do *log* artificial, processamento dos dados, mineração do processo e análise dos resultados, com exceção de sugestões de melhoria para o processo que foi abordado no item 4 que aborda a conclusão.

3.1 Planejamento

Foi escolhida uma operação de cooperativa de triagem de resíduos sólidos urbanos caracterizada por um processo dinâmico, marcado por múltiplas etapas e pela presença de variações que refletem tanto aspectos técnicos quanto sociais. O macro entendimento do processo pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Macro Etapas do Processo da Cooperativa



Fonte: Os autores (2025).

O ciclo inicia-se no recebimento dos resíduos, etapa em que os caminhões provenientes da coleta são pesados e avaliados quanto à conformidade. Nesse momento, diferentes possibilidades podem ocorrer: cargas aceitas seguem normalmente para a descarga, enquanto resíduos perigosos ou hospitalares levam à rejeição imediata, e casos de excesso de peso exigem ajustes antes do prosseguimento. Após essa etapa, ocorre a descarga e a pré-triagem, em que o material é inspecionado de forma preliminar. Essa fase abre espaço para novas ramificações, pois resíduos volumosos, como móveis e pneus, necessitam de tratamento diferenciado, enquanto a presença de resíduos orgânicos em excesso conduz ao encaminhamento para compostagem ou aterro. Da mesma forma, eletrônicos são redirecionados para fluxos específicos de “e-lixo” e materiais contaminados são segregados para evitar que comprometam a qualidade dos recicláveis.

Superada a pré-triagem, o fluxo segue para a triagem mecânica e manual, realizada em esteiras ou diretamente pelos cooperados. Essa etapa, embora central para a segregação inicial, é permeada por variações importantes. Em condições normais, o processo segue o fluxo esperado, mas falhas nas esteiras podem obrigar a adoção de triagem manual emergencial. Além disso, erros humanos durante a seleção resultam em retrabalhos posteriores, e desvios ocasionais introduzem caminhos alternativos não previstos no desenho ideal do processo.

Na sequência, a classificação específica subdivide os materiais previamente separados em categorias de maior valor de mercado. Plásticos são diferenciados em PET (Polietileno Tereftalato), PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e PP (Polipropileno), papéis em papel branco, jornal e papelão, metais em alumínio, ferroso e não ferroso, enquanto vidros são segregados conforme a coloração. Apesar desse detalhamento, parte dos lotes pode ser comprometida por contaminações ou pela falta de operadores, o que leva determinados fluxos ao descarte como rejeito.

A etapa de pesagem e registro confere rastreabilidade ao processo e subsidia a geração de indicadores. No entanto, também apresenta exceções que foram consideradas na modelagem do log. Enquanto o registro correto representa a prática desejável, falhas na balança ou lançamentos incorretos exigem retrabalho ou levam a registros estimados, comprometendo a confiabilidade da informação. No armazenamento temporário, os materiais aguardam a formação de lotes comerciais, mas esse estágio tampouco é linear. Quando o fluxo segue normalmente, o material é estocado até o volume mínimo para venda; contudo, limitações de espaço podem antecipar expedições, perdas por deterioração ou contaminação podem inviabilizar o aproveitamento de lotes, e situações como furtos ou danos acidentais geram baixas inesperadas.

O ciclo se encerra na venda e expedição, etapa em que os materiais são destinados ao mercado. Essa fase também foi representada no log por diferentes desfechos: parte dos lotes é comercializada diretamente com recicladores homologados, enquanto outra parcela é negociada por atravessadores. Em alguns casos, compradores rejeitam os materiais por não conformidade, exigindo redirecionamento, e em períodos de queda nos preços de mercado, as cooperativas optam por prolongar o armazenamento até que surjam condições mais favoráveis de comercialização.

Ao estruturar essas etapas e ramificações no *log*, buscou-se representar com maior fidelidade a complexidade operacional das cooperativas. O processo não é estático nem

linear, mas permeado por exceções, falhas técnicas, fatores humanos e influências externas do mercado. Essa modelagem possibilita que a mineração de processos identifique padrões recorrentes, desvios de conformidade e gargalos, ao mesmo tempo em que permite avaliar a resiliência do sistema frente a diferentes cenários. Assim, o log gerado, com mais de cem mil casos, não apenas simula a operação de um ano da cooperativa, mas também constitui uma base robusta para análises científicas orientadas à melhoria da eficiência, da rastreabilidade e da sustentabilidade na gestão de resíduos sólidos urbanos.

3.2 Elaboração do log artificial

O processo descrito da cooperativa de reciclagem, apresentado no item 3.1, foi incorporado no Chat GPT. A partir disso, foi solicitada a geração de um *log* artificial, simulando a operação da cooperativa com mais de 40.000 *cases*. O *log* contém as seguintes informações: *Case ID*, que identifica cada processo; *Activity*, que representa a etapa do processo, incluindo possíveis ramificações; *Resource*, que indica os recursos envolvidos; e *Start Timestamp*, que registra a data e hora simulada para cada atividade ao longo do ano de 2024. Assim, o log foi gerado com o objetivo de ser processado na etapa seguinte.

3.3 Processamento dos dados

Segundo Van Eck et al. (2015), o principal objetivo da etapa de processamento de dados é criar *logs* de eventos com diferentes visualizações dos dados de eventos obtidos e processá-los de forma que sejam ideais para a etapa de mineração e análise. Além dos dados de eventos como entrada principal, também é possível usar modelos de processo como entrada para filtrar os dados de eventos. As saídas são registros de eventos usados nas etapas de mineração e análise.

Para auxiliar o processamento, foi utilizada a ferramenta Disco na versão 4.2.6 para as análises. Vale destacar também que conforme observado por Van Der Aalst (2016), a qualidade dos dados é crucial para o sucesso da mineração de processos, pois dados de eventos incompletos ou não confiáveis comprometem significativamente os resultados obtidos.

3.4 Mineração dos dados

A partir do log de evento consolidado e previamente higienizado (padronização de rótulos, ordenação por *timestamp* e verificação de unicidade por *Case ID*), procedeu-se à descoberta e análise do processo no software Disco. O conjunto resultante compreendeu 40.000 *cases*, 239.745 eventos e 34 atividades distintas, distribuídos em 5.442 variantes. Esse resultado corresponde a aproximadamente uma média de 6 eventos por *case*, evidenciando que parte das instâncias não percorre todas as macroetapas e que há ocorrências de desvios e retrabalhos. A duração média por *case* é de aproximadamente 3,9 horas indicando um ciclo operacional curto, porém com alta variabilidade entre trajetórias, coerente com cenários de rejeição precoce, saltos de etapa (p. ex., volumosos) e laços de reclassificação.

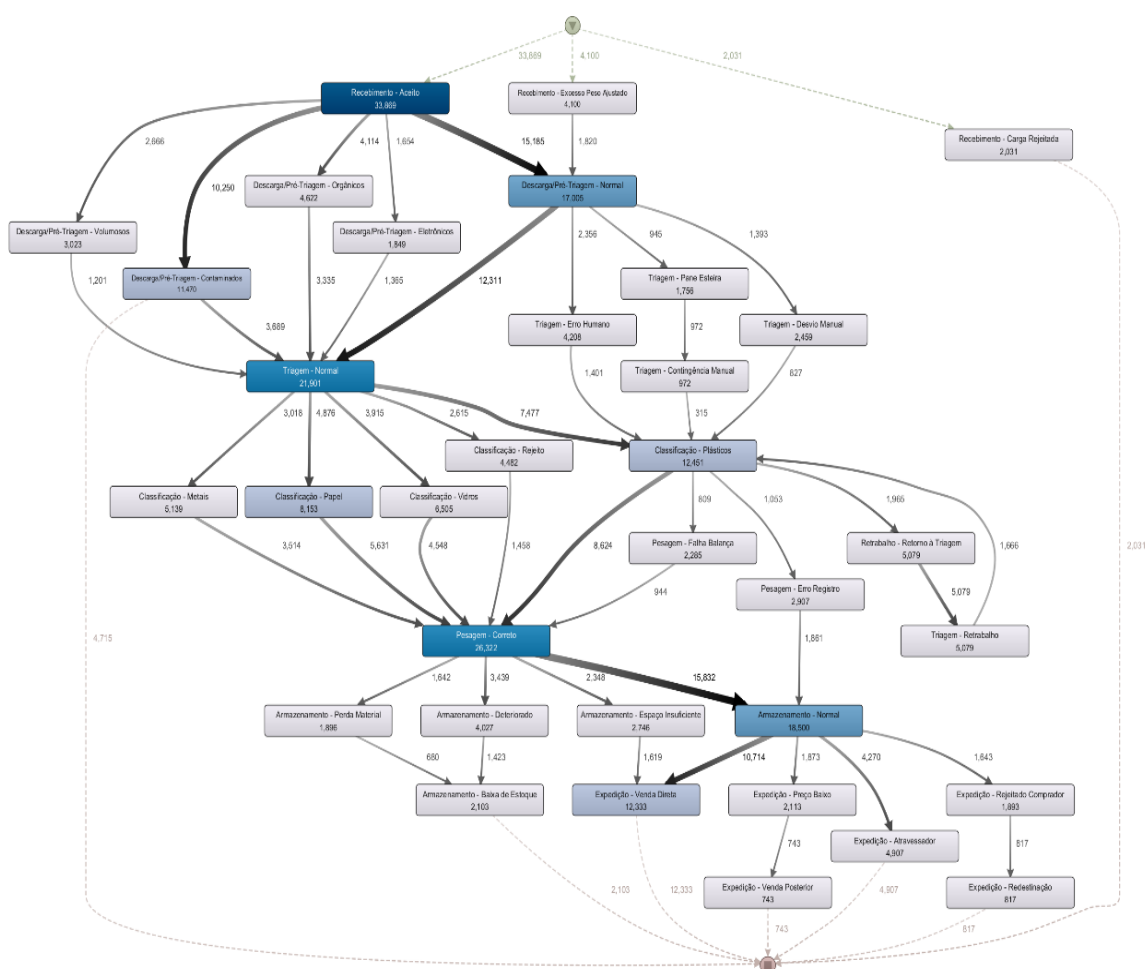
3.5 Análise dos Resultados

A Figura 3 apresenta o processo construído no software Disco com suas ramificações e caminhos possíveis. Ele foi iniciado com 33.189 recebimentos aceitos, sendo que 46,9% (15.585) seguem para Descarga/Triagem Normal e 30,9% (10.250) para volumosos,

enquanto os demais se distribuem em ópticos, itinerários e contêineres. Na etapa de triagem, o caminho predominante foi a Triagem Normal, responsável por 21.041 casos (≈65% do total). Outros fluxos menores incluem erros humanos (6.230), contaminações (972), descarte manual (2.459) e erro de esteira (1.399). Após a triagem normal, os materiais passam para a classificação por tipo: Papel (6.813 – 32%), Metais (6.139 – 29%), Vidros (5.358 – 25%) e Plásticos (2.395 – 11%), além de 747 rejeitos.

Observa-se que o fluxo principal foi contínuo e eficiente, levando a material aproveitado e comercializado. Já os desvios e exceções representam cerca de 20–25%, refletindo a importância do controle de qualidade. Assim, o processo mostra forte predominância do fluxo normal, mas com mecanismos estruturados para tratar inconsistências e rejeitos.

Figura 3 – Fluxo de Processo - Disco



Fonte: Os autores (2025).

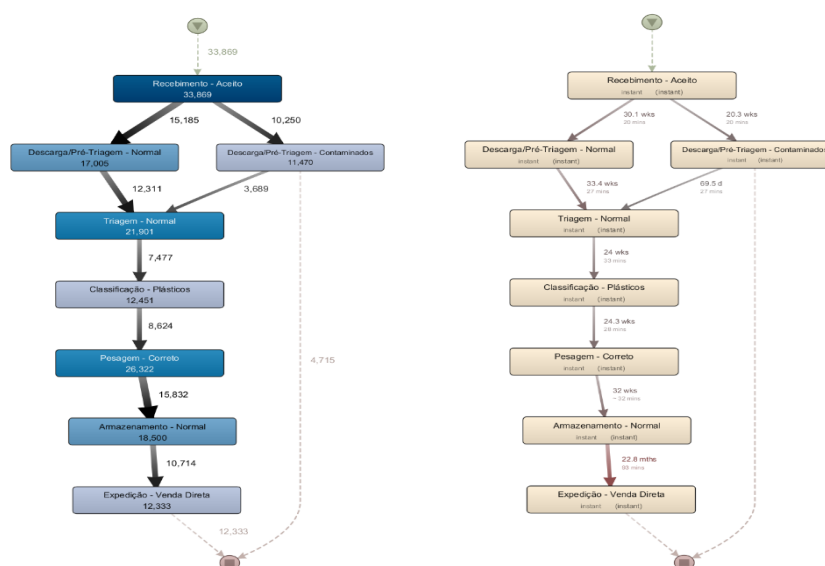
3.5.1 Casos mais frequentes e duração das atividades

No software Disco, foi realizada uma filtragem de 21% dos casos, permitindo identificar as atividades que seguem o fluxo principal, apresentadas na Figura 4. Nesse recorte, observou-se que 75% dos produtos recebidos foram aceitos para processamento, reforçando a predominância desse fluxo principal. Na etapa de Descarga e Pré-triagem, destaca-se a identificação de produtos contaminados, que são direcionados diretamente para o final do fluxo, representando aproximadamente 40% dos casos processados nessa fase. Os materiais não contaminados seguem para a etapa de Triagem - Normal, onde passam por uma análise mais detalhada.

Após completada a triagem, os produtos seguem para a Classificação de Plásticos, sendo posteriormente encaminhados para as etapas subsequentes de Pesagem - Correto, Armazenamento - Normal e, finalmente, Venda - Direta, que marca o fim do processo de fluxo principal.

Uma análise comparativa da duração das atividades revelou que a atividade Armazenamento - Normal apresenta o maior tempo médio de execução entre todas as etapas, demandando 93 minutos em média por processamento. Esse resultado aponta um possível gargalo no fluxo, sugerindo a necessidade de análise mais detalhada para identificar as causas desse impacto temporal no desempenho do processo. Essa visão geral destaca a eficiência e, ao mesmo tempo, as perdas do processo, como no desvio de produtos contaminados, e sugere oportunidades para aprimoramentos na gestão e no aproveitamento dos materiais processados.

Figura 4 – Casos mais frequentes – Disco



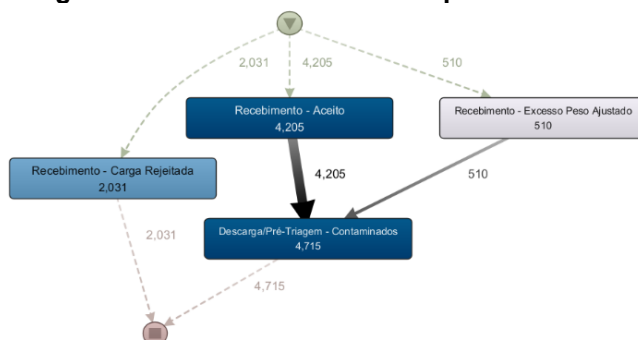
Fonte: Os autores (2025).

3.5.2 Encerramentos antecipados

Durante a análise dos dados, optou-se por filtrar os fluxos "Recebimento – Carga Rejeitada" e "Descarga/Pré-Triagem – Contaminados", tendo em vista que ambos representam processos com encerramentos antecipados e podem ser observados na Figura 5. Os resultados indicam que um total de 4.715 eventos foram aceitos no sistema, dos quais 510 apresentaram excesso de peso que foi ajustado, permitindo o prosseguimento das etapas subsequentes. Contudo, esse dado é crítico, pois cargas com excesso de peso ajustado deveriam, em tese, ter sido rejeitadas já na etapa inicial de recebimento, conforme os

critérios estabelecidos. Esse cenário aponta para potenciais falhas no processo de triagem e recebimento de materiais, sugerindo que as regras de aceitação aplicadas possam não estar suficientemente rigorosas ou que existam desvios no cumprimento dos protocolos estabelecidos.

Figura 5 – Encerramentos antecipados – Disco

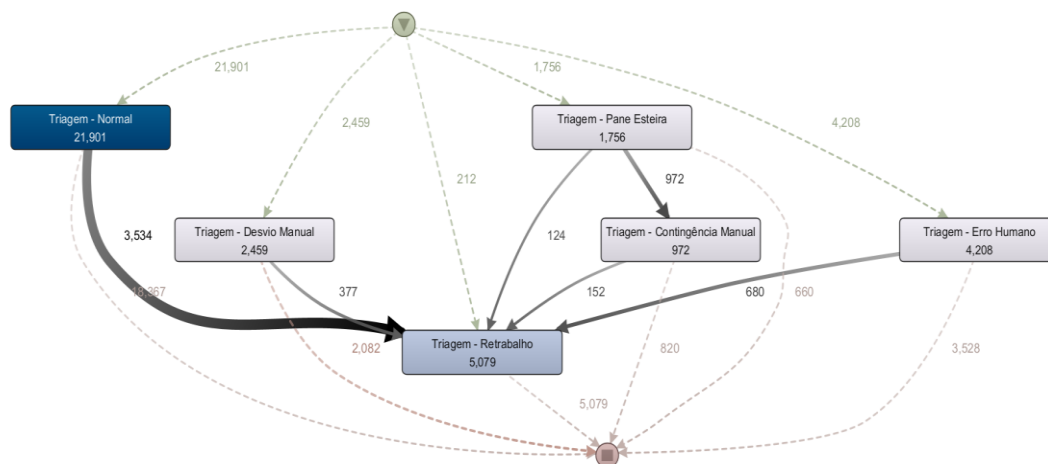


Fonte: Os autores (2025).

3.5.3 Etapa de Triagem de Resíduos

Na Figura 6 é possível observar que a etapa de "Triagem - Erro Humano" surge como uma das principais origens de desvios, contabilizando 4.208 ocorrências, o que expõe uma fragilidade significativa no sistema. Esses erros podem ser atribuídos a falhas operacionais, como equívocos cometidos por operadores ou instruções inadequadas sobre os critérios de triagem. Do total de casos dessa categoria, 680 foram encaminhados para retrabalho, demandando alocação adicional de tempo e recursos para correção, enquanto os 3.528 casos restantes seguiram para a conclusão do processo apresentando incertezas quanto à conformidade. Essa evidência destaca a necessidade de maior rigor no controle e na verificação de etapas subsequentes. A recorrência de "Triagem - Desvio Manual", com 2.459 eventos, reforça a dependência do processo de intervenções humanas em cenários onde o fluxo automatizado apresenta limitações. Embora esse desvio não caracterize necessariamente uma falha, suas implicações são relevantes: 377 casos de desvio manual necessitam de retrabalho, indicando que as intervenções humanas, mesmo quando necessárias, frequentemente introduzem inconsistências ou erros no sistema.

Figura 6 – Etapa de Triagem de Resíduos – Disco

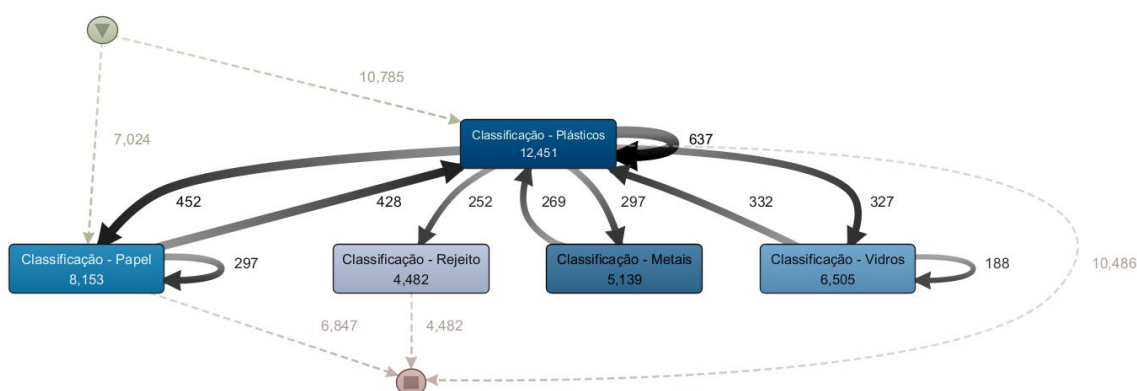


Fonte: Os autores (2025).

3.5.4 Etapa de Classificação de Resíduos

Na Figura 7 é possível identificar alta frequência de fluxos cruzados entre as categorias de classificação, o que sugere deficiências na triagem inicial e na precisão dos processos subsequentes. Por exemplo, durante a classificação de plásticos, que concentra 10.785 unidades recebidas, foi observado que 452 unidades foram redirecionadas para a classificação de papel, 332 unidades de vidros para plásticos e 297 unidades de plásticos para metais. Esses números indicam que uma proporção relevante de materiais é processada em categorias inadequadas, obrigando reclassificações e gerando sobrecarga em etapas que deveriam ser mais precisas. A origem desses fluxos cruzados pode ser atribuída a equívocos provenientes das interações humanas na triagem inicial e à falta de rigor nas etapas de verificação automatizada.

Figura 7 – Etapa de Classificação de Resíduos – Disco

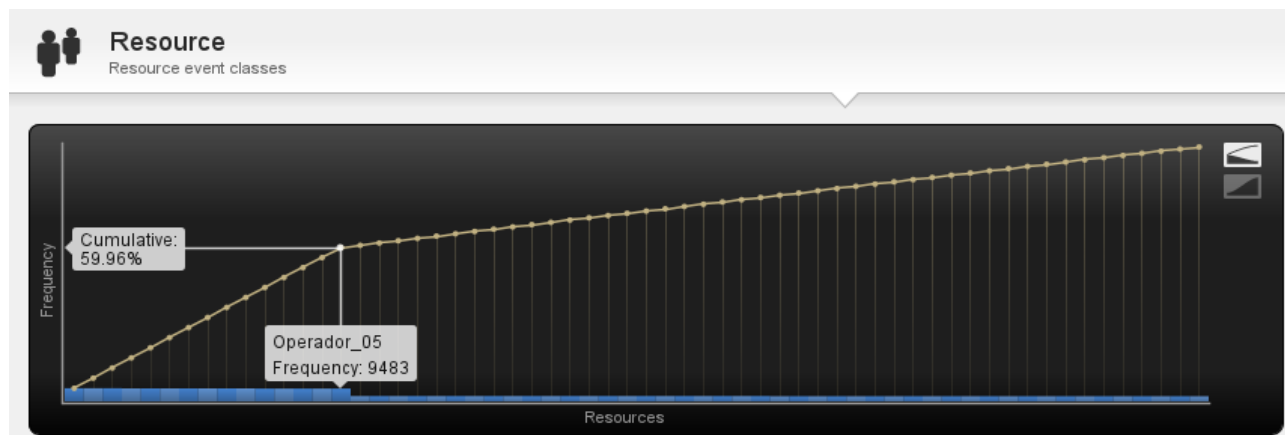


Fonte: Os autores (2025).

3.5.5 Utilização de Recursos

Na Figura 8 verifica-se que, aproximadamente 60% do volume processual recai sobre 15 dos 60 operadores, o que reforça a necessidade de políticas de balanceamento de carga (treinamento cruzado, revezamento por turno e redistribuição de tarefas) para mitigar concentração e reduzir tempos de espera.

Figura 8 – Utilização de Recursos – Disco



Fonte: Os autores (2025).

4. Conclusão

Este estudo demonstrou como a aplicação da mineração de processos, utilizando a metodologia PM2, pode gerar *insights* significativos para a gestão e melhoria operacional de cooperativas de triagem de resíduos sólidos urbanos (RSU), um tema que ainda carece de maior aprofundamento na literatura. Embora existam estudos relacionados à mineração de processos em contextos industriais e corporativos, não foram encontrados direcionamentos das análises para áreas de sustentabilidade, especialmente cooperativas de reciclagem, marcadas pela alta variabilidade de fluxos e forte dependência de intervenções humanas. Este trabalho preenche esse *gap* ao aplicar técnicas de mineração a um *log* artificial detalhado, gerado devido à escassez de logs reais robustos disponíveis na área.

Entre os principais achados, destaca-se que 75% dos resíduos processados seguiram o fluxo principal, enquanto cerca de 25% se desviaram devido a inconsistências, erros humanos ou encerramentos prematuros. A etapa de triagem manual, marcada por 4.208 ocorrências classificadas como "Erro Humano", revelou-se uma das principais fontes de desvios, exigindo retrabalhos em 680 dos casos, além de comprometer a conformidade em 3.528. Esses resultados expõem a necessidade de maior rigor nos processos operacionais e evidenciam que os erros humanos são um reflexo das limitações de automação e das lacunas de capacitação dos operadores. Além disso, foi identificada uma alta frequência de fluxos cruzados entre etapas, como 452 unidades de plásticos processadas na classificação de papel e 332 unidades de vidros classificados como plásticos. Esses resultados indicam deficiências no alinhamento entre triagem e classificação, algo raramente abordado de forma detalhada pelos estudos existentes. Por outro lado, verificou-se uma predominância de eficiência na pesagem (96% de registros corretos), embora 4% demandam retrabalho devido a falhas técnicas, comprometendo a rastreabilidade e evidenciando gargalos como os longos tempos de armazenamento, que alcançam, em média, 93 minutos por material. Outro ponto importante, foi que 60% do volume processado foi concentrado em apenas 15 dos 60 operadores, expondo a necessidade de revisar e balancear a carga de trabalho para minimizar impactos na produtividade.

4. Recomendações para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se validar os achados deste estudo utilizando *logs* reais de eventos em cooperativas, permitindo maior representatividade prática. Além disso, investigar estratégias de automação para reduzir erros humanos, particularmente nas etapas de triagem e classificação, e incorporar indicadores ambientais para uma visão mais ampla de sustentabilidade. Estudos focados em treinamento e redistribuição de tarefas operacionais também são necessários para mitigar o desequilíbrio de cargas de trabalho. Por fim, é essencial explorar o custo-benefício das intervenções sugeridas, visando identificar melhorias economicamente viáveis para o setor de resíduos sólidos urbanos.

Referências

- ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/download/96475/?tmstv=1733786378>. Acesso em: 29 set. 2025.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/download/90934/?tmstv=1718136285>. Acesso em: 29 set. 2025.
- DETRO, Silvana Pereira. A framework for managing process variability through process mining and semantic reasoning: An application in healthcare. 2017. Tese de Doutorado. **Université de Lorraine; Pontifical Catholic University of Parana (PUC-PR)**.
- DINKOWSKI, T.G. **A evolução da mineração de processos no Brasil: Uma revisão sistemática da literatura**. Porto Alegre, 84 p., 2025. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul.
- DOS SANTOS, Adenilson Furquim; LOURES, Eduardo de F. Rocha; SANTOS, Eduardo A. Portela. Application of the PM² methodology in the analysis of assembly processes. **Procedia CIRP**, v. 132, p. 159-164, 2025.
- DUMAS, M.; GARCÍA-BAÑUELOS, L. Process mining reloaded: Event structures as a unified representation of process models and event logs. In: In: Devillers, R., Valmari, A. (eds) **Application and Theory of Petri Nets and Concurrency**. Springer, Cham, 2015. p. 33-48.
- FERREIRA, D.H.L.; KINTSCHNER, F.E.; SUGAHARA, C.R. Sistema de controle de produção e de estoque aplicado às cooperativas de reciclagem. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 18, n. 51, p. 151-165, 2022.
- GUIMARÃES, L.Q.S. 2021. **As oportunidades de melhoria nos processos operacionais em cooperativas de catadores de materiais recicláveis**. Salvador, 87 p., 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica Do Salvador.
- KULIBABA, J.C.Z. **Estudo sobre mineração de processos: histórico e tendências do mercado**. Curitiba, 26 p., 2022. Monografia (Especialização) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná.
- PERES, S.M.; FANTINATO, M.; SANTOS, E.A.P. Mineração de Processos: do que se trata? E o Brasil, está no jogo? **Computação Brasil**, Porto Alegre, n. 49, p. 6–9, 2023.
- SYED, R., LEEMANS, S.J.; EDEN, R.; BUIJS, J.C. Process Mining Adoption - A Technology Continuity Versus Discontinuity Perspective. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUSINESS PROCESS MANAGEMENT, Seville. **Anais...** Seville, 2020, p. 1 -16.
- VAN DER AALST, W. M. P, Process Mining: Discovery, Conformance, and Enhancement of Business Processes, **Springer**, 2011.
- VAN DER AALST, Wil. Data science in action. In: Process mining: Data science in action. Berlin, Heidelberg: **Springer Berlin Heidelberg**, 2016. p. 3-23.
- VAN ECK, Maikel L. et al. PM: a process mining project methodology. In: **International conference on advanced information systems engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 297-313.