

# OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA EM FUNDIÇÕES DE PEQUENO PORTE: SIMULAÇÃO DE PROCESSOS COM ALUMÍNIO RECICLÁVEL POR MEIO DO *SOFTWARE ARENA*

RAFAEL DE CARVALHO NOVAES (Fatec Guarulhos)

[rafael.novaes2@fatec.gov.sp.br](mailto:rafael.novaes2@fatec.gov.sp.br)

GABRIEL FLORES SILVA (Fatec Guarulhos)

[gabriel.silva742@fatec.sp.gov.br](mailto:gabriel.silva742@fatec.sp.gov.br)

**Orientador**

PROF. ME. DENISE BENINO DOURADO ANCELI (Fatec Guarulhos)

[denise.anceli@fatec.sp.gov.br](mailto:denise.anceli@fatec.sp.gov.br)

## RESUMO

Este artigo analisa a eficiência logística em pequenas fundições de alumínio reciclável utilizando simulação computacional no Software Arena. O estudo de caso focou em uma fundição localizada em Itaquaquetuba-SP, empregando uma metodologia que incluiu: a coleta de dados operacionais autênticos, a criação de três cenários distintos no Arena e uma análise comparativa com 10 replicações para cada cenário. Foram simuladas: a operação atual, a otimização das rotas de coleta com ênfase em fornecedores locais, e a implementação de um estoque mínimo de 5 toneladas. Os achados mostraram benefícios substanciais: uma redução de 18,7% nos custos logísticos, representando uma economia de R\$2.150 por mês, e uma diminuição de 35% no tempo ocioso dos fornos. A pesquisa também destacou desafios contínuos, como a variação na qualidade da sucata, o que indica a necessidade de investimento em triagem magnética. O estudo confirma a eficácia da simulação como uma ferramenta estratégica para pequenas fundições, possibilitando a avaliação de melhorias antes da implementação prática. Entre as recomendações, ressaltam-se a formação de redes colaborativas entre as fundições e a adoção de tecnologias emergentes, como blockchain para rastreabilidade e inteligência artificial para previsão de demanda.

**PALAVRAS-CHAVE:** logística reversa; alumínio reciclável; fundições de pequeno porte; simulação de processos.

## ABSTRACT

*This paper analyzes the logistics efficiency in small aluminum recyclable foundries using computer simulation in Arena Software. The case study focused on a foundry located in Itaquaquetuba-SP, employing a methodology that included: the collection of authentic operational data, the creation of three distinct scenarios in Arena and a comparative analysis with 10 replications for each scenario. The simulations included: the current operation, the optimization of collection routes with emphasis on local suppliers, and the implementation of a minimum stock of 5 tons. The findings showed substantial benefits: an 18.7% reduction in logistics costs, representing a savings of R\$2,150 per month, and a 35% decrease in furnace downtime. The research also highlighted ongoing challenges, such as variation in scrap quality, which indicates the need for investment in magnetic sorting. The study confirms the effectiveness of simulation as a strategic tool for small foundries, enabling the evaluation of improvements before practical implementation. Recommendations include the creation of collaborative networks between foundries and the adoption of emerging technologies, such as blockchain for traceability and artificial intelligence for demand forecasting.*

**KEYWORDS:** reverse logistics; recyclable aluminum; small-scale foundries; process simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria do alumínio no Brasil destaca-se internacionalmente pelo elevado índice de reciclagem, tendo atingido, em 2023, a marca de 850 mil toneladas de materiais reciclados, o

que representa aproximadamente 60% do consumo total de alumínio no país. Esse desempenho supera significativamente a média mundial, estimada em cerca de 30%, o que evidencia o compromisso nacional com a sustentabilidade e com os princípios da economia circular (ABAL, 2023).

Apesar desse cenário promissor, as pequenas fundições de alumínio ainda enfrentam obstáculos relevantes. Entre os principais desafios estão a grande variação na disponibilidade de matéria-prima reciclada, a irregularidade na oferta de sucata e os elevados custos logísticos associados à coleta e ao transporte do material. Essas limitações impactam diretamente a eficiência operacional e a competitividade dessas empresas, especialmente em um mercado cada vez mais exigente e dinâmico (Santos e Pereira, 2020).

Diante dessa realidade, formula-se a seguinte questão de pesquisa: como melhorar a cadeia logística de pequenas fundições que utilizam alumínio reciclado, considerando as restrições de recursos típicas desse setor? Essa problemática justifica-se pela necessidade de soluções práticas e viáveis que promovam a sustentabilidade ambiental sem comprometer a viabilidade econômica dessas organizações.

O objetivo principal deste estudo é desenvolver um modelo de simulação computacional, por meio do software Arena, que permita otimizar o fluxo logístico em pequenas fundições de alumínio reciclado. Entre os objetivos específicos, destacam-se: a redução dos custos de transporte, a diminuição do tempo de espera entre as etapas logísticas e o aumento da efetividade no processo de fusão do alumínio reciclado.

A relevância deste trabalho está relacionada à sua contribuição para o fortalecimento da economia circular, bem como à sua aplicabilidade prática no contexto de pequenas e médias empresas do setor de fundição. Ao promover melhorias nos processos logísticos internos e externos dessas organizações, espera-se contribuir para a redução de desperdícios, o aumento da produtividade e a elevação da competitividade no mercado.

Para o alcance dos objetivos propostos, emprega-se a simulação computacional como metodologia, utilizando o software Arena. Essa abordagem possibilita a modelagem do fluxo logístico e a análise de diferentes estratégias operacionais, com base em dados reais obtidos de uma fundição de pequeno porte. Assim, torna-se possível a avaliação de cenários distintos que visem à redução de custos e ao aprimoramento da eficiência produtiva.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Alumínio reciclável em pequenas fundições

O alumínio é amplamente valorizado por sua elevada reciclabilidade, possibilitando seu reaproveitamento contínuo sem perdas significativas de propriedades mecânicas e estruturais. O processo de reciclagem do alumínio demanda aproximadamente 5% da energia requerida na produção primária a partir da bauxita, resultando ainda em expressiva redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (ABAL, 2022; IAI, 2021). No contexto brasileiro, essa prática assume especial relevância, uma vez que cerca de 98% das latas de alumínio para bebidas são recicladas, conforme dados da Associação Brasileira do Alumínio.

Nesse cenário, pequenas fundições exercem um papel fundamental ao utilizar resíduos metálicos de origem urbana como matéria-prima. Frequentemente, tais unidades empregam a técnica de fundição em areia verde, caracterizada por seu baixo custo e aplicabilidade em diversas escalas de produção. Essas fundições contribuem diretamente para a promoção da economia circular e para a geração de empregos locais, atuando como elo entre a coleta de sucata e a transformação industrial do material.

Contudo, muitas dessas unidades operam de forma informal, o que dificulta o acesso a tecnologias avançadas, linhas de crédito e certificações ambientais. Essa informalidade também

compromete a padronização da qualidade do alumínio reciclado, fator essencial para sua aplicação em larga escala na indústria (CNI, 2022; Silva, Nascimento e Oliveira, 2021).

Apesar desses desafios, observam-se avanços progressivos no sentido de integrar essas unidades produtivas às políticas públicas voltadas à sustentabilidade. Programas de capacitação técnica, incentivos fiscais e iniciativas de formalização têm sido promovidos por órgãos ambientais e instituições de pesquisa, com o objetivo de ampliar a eficiência operacional, a segurança do trabalho e o controle ambiental dessas microempresas (BRASIL, 2021). Adicionalmente, parcerias com cooperativas de catadores e centros de triagem vêm fortalecendo a cadeia de suprimentos de sucata, proporcionando melhor qualidade na triagem do material e reduzindo a presença de impurezas nas ligas recicladas.

## 2.2 Logística reversa e fundições

A logística reversa constitui uma estratégia essencial para a sustentabilidade industrial, ao viabilizar o retorno de produtos e materiais ao ciclo produtivo após o uso, reduzindo os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado e diminuindo a necessidade de extração de recursos naturais. Esse sistema compreende etapas como coleta, triagem, reutilização e reciclagem de resíduos, promovendo a responsabilidade compartilhada entre empresas, consumidores e o poder público.

De acordo com Esteves, Mooro e Madeira (2022), a logística reversa estabelece uma ligação entre práticas colaborativas e o desempenho ambiental das organizações, reforçando o compromisso institucional com a sustentabilidade. Nesse contexto, as fundições, especialmente aquelas que operam com alumínio, desempenham papel relevante ao reaproveitar resíduos metálicos na fabricação de novos produtos, o que contribui para a redução de custos, das emissões atmosféricas e do consumo energético. O alumínio, em particular, apresenta elevada eficiência nesse processo, por poder ser reciclado indefinidamente sem perda de qualidade, demandando apenas cerca de 5% da energia necessária à sua produção primária (ABAL, 2023; IAI, 2021).

Assim, a integração entre a logística reversa e as fundições configura-se como uma ferramenta eficaz para a promoção da economia circular, transformando resíduos em recursos com valor econômico e ambiental. Tal colaboração também proporciona benefícios sociais e econômicos, por meio do fortalecimento das cadeias locais de reciclagem, da geração de empregos e do estímulo ao desenvolvimento de pequenas e médias empresas do setor.

Contudo, para que essas vantagens se concretizem de forma plena, torna-se imprescindível o investimento em infraestrutura, controle de qualidade e políticas públicas que incentivem a formalização e modernização das fundições. O fortalecimento dessa interação entre sistemas organizados de coleta e o reprocessamento industrial é crucial para a consolidação de um modelo produtivo mais eficiente, inclusivo e ambientalmente sustentável.

## 2.3 Simulação no *software* Arena

O software Arena é uma ferramenta de simulação de eventos discretos amplamente utilizada para modelar sistemas complexos, permitindo representar o comportamento dinâmico de processos ao longo do tempo. Com um design voltado para a usabilidade, o programa combina uma interface gráfica intuitiva com recursos analíticos robustos, tornando-se acessível tanto a iniciantes quanto a profissionais com experiência em modelagem computacional (Kelton et al., 2015).

Suas aplicações abrangem diversas áreas, como logística, manufatura, mineração, saúde e serviços, sendo eficaz na identificação de gargalos, análise de capacidade e avaliação de alternativas operacionais. De acordo com Banks (2014), o Arena permite fundamentar decisões

em dados provenientes de simulações, o que reduz riscos e potencializa ganhos em produtividade e qualidade.

Estudos de caso demonstram sua aplicação exitosa em processos de extração e beneficiamento mineral (Ribeiro et al., 2017), bem como na gestão de fluxos em hospitais e unidades de pronto atendimento (Souza e Silva, 2019). Outro diferencial relevante do *software* é a possibilidade de simular diferentes cenários sem comprometer os recursos reais da operação, aspecto crucial em ambientes nos quais alterações físicas seriam onerosas ou inviáveis.

Ao permitir o teste de alternativas antes da implementação prática, o Arena contribui para a redução de custos, otimização de recursos e mitigação de erros operacionais. A capacidade de ajustar parâmetros e estruturas torna a ferramenta especialmente útil em contextos marcados por variabilidade e incerteza, características inerentes a sistemas produtivos modernos.

Conforme Law (2015), a simulação como suporte à tomada de decisão oferece vantagens competitivas ao alinhar desempenho técnico e planejamento estratégico. Nesse sentido, o Arena se consolida como uma ferramenta estratégica indispensável para organizações que buscam inovações operacionais sustentadas por dados confiáveis.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo foi conduzido em uma pequena fundição de alumínio localizada no município de Itaquaquecetuba, Estado de São Paulo. A pesquisa adotou a simulação computacional como método de investigação, utilizando o *software* Arena, escolhido por sua acessibilidade às pequenas empresas e pela capacidade de modelagem discreta. Tal ferramenta permitiu a criação de diferentes cenários operacionais, possibilitando a avaliação da situação atual em comparação com alternativas de roteirização aprimorada e estratégias de gerenciamento de estoque.

O objetivo da metodologia consistiu em identificar formas de otimização do fluxo produtivo e de redução de perdas logísticas ao longo da cadeia de suprimentos. Ressalta-se que a abordagem possui algumas limitações, principalmente em razão das simplificações inerentes à modelagem. A simulação não considerou oscilações extremas nos preços de combustíveis ou interrupções operacionais severas, como greves, e operou com médias relativas à qualidade da sucata, que podem não refletir com precisão as variações sazonais. Essas restrições, comuns em modelagens computacionais, indicam que os resultados devem ser interpretados como referenciais em um ambiente controlado, sendo necessárias adaptações para sua aplicação em contextos distintos.

Cabe destacar que não foram divulgadas informações que permitam a identificação da empresa ou de seus fornecedores, restringindo-se a dados essenciais à construção da pesquisa.

A metodologia seguiu as seguintes etapas:

- Definição do problema: Identificação de elevados custos logísticos e variabilidade na disponibilidade de sucata.
- Coleta de dados: Obtenção de dados operacionais reais, simulados com base em parâmetros do setor.
- Modelagem no Arena: Simulação dos fluxos logísticos e produtivos.
- Validação e análise de cenários: Comparação entre a situação atual e estratégias otimizadas.

#### 3.1 Definição do Problema

A empresa em questão enfrenta desafios operacionais significativos, tais como fornecimento irregular de sucata, custos elevados de transporte e falhas no processo produtivo. Estes últimos se manifestam por meio de interrupções frequentes, geralmente causadas por quebras em equipamentos essenciais, como os fornos de fusão.

### 3.2 Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de entrevistas e análises documentais junto à empresa e seus fornecedores, no período compreendido entre fevereiro de 2024 e abril de 2025, complementada por informações setoriais. Foram reunidos dados sobre distâncias entre fornecedores e a fundição, custos de transporte, tempo de fusão, características das ligas e frequência de coleta de sucata.

Embora a fundição trabalhe com diferentes ligas de alumínio, este estudo concentrou-se especificamente na liga A356, amplamente utilizada na indústria automotiva devido à sua boa resistência mecânica e ductilidade. Os dados coletados foram organizados conforme os quadros a seguir:

**Quadro 1 – Características da Empresa Estudada**

Variável	Valor
Localização	Itaquaquecetuba, SP
Capacidade mensal	60 toneladas
Fonte de sucata	Cooperativas locais, indústrias automotivas
Custo de transporte	R\$ 4,00/km
Disponibilidade de sucata	50-80% (variação sazonal)
Tempo de fusão	4-6 horas
Taxa de reprovação (qualidade)	10%

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

**Quadro 2 – Composição Média da Liga de Alumínio A356**

Elemento	Composição (%)	Faixa Permitida
Alumínio (Al)	87,5%	Restante
Silício (Si)	7,2%	6,5% - 7,5%
Ferro (Fe)	0,18%	≤ 0,20%
Outros (Cu, Mg, Mn)	0,3%	≤ 0,5% (total)

Fonte: NBR 16859 (ABNT, 2025)

**Quadro 3 – Dados de Fornecedores**

Fornecedor	Distância (km)	Frequência de Coleta	Custo (R\$/viagem)
X	5 km	Diária	R\$ 80,00
Y	25 km	3x/semana	R\$ 250,00
Z	40 km	2x/semana	R\$ 400,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

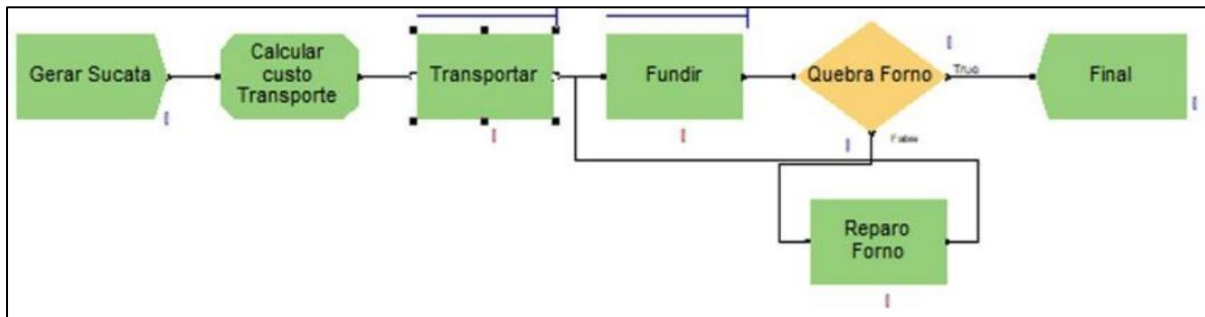
Observação: Custos incluem combustível, manutenção e frete terceirizado.

### 3.3 Simulações e estratégias

Três cenários distintos foram simulados para avaliar o impacto das estratégias propostas sobre a operação da fundição:

**Cenário Atual:** Representou a operação sem alterações, com rotas de coleta não otimizadas, ausência de gerenciamento de estoque mínimo e inexistência de parcerias estratégicas com cooperativas. Serviu como base de comparação para os demais cenários.

**Figura 1 – Cenário Atual**



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

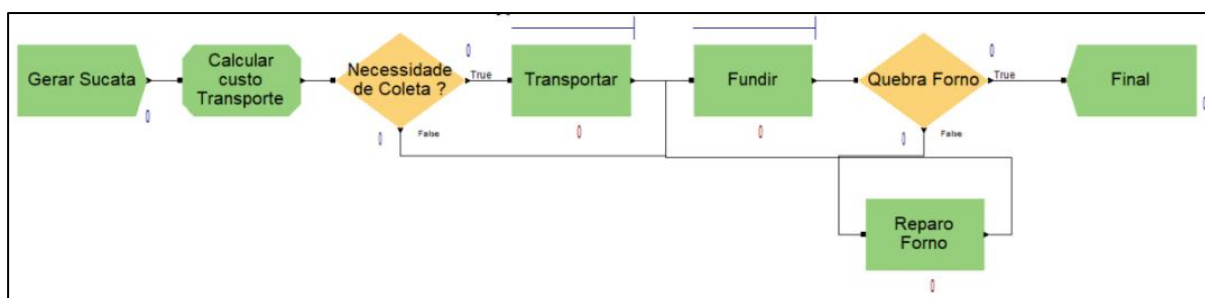
**Quadro 4 – Expressões utilizadas no Cenário Atual**

Processo	Expressão (tempo em horas)
Gerar sucata	EXPO (24)
Custo de transporte	TRIA (5, 25, 40)
Fundir	TRIA (4, 5, 6)
Quebra	Chance de 0,83%
Reparo do forno	EXPO (12)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

**Cenário 1:** Incorporou o gerenciamento de estoque mínimo de cinco toneladas e a reprogramação de rotas de coleta para consolidação de viagens. Essa abordagem visou equilibrar a disponibilidade de matéria-prima com a redução dos custos operacionais.

**Figura 2 – Cenário 1**



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

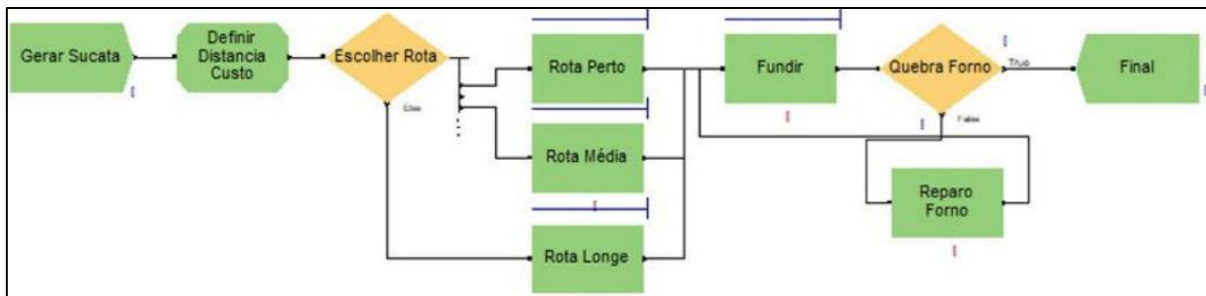
**Quadro 5 – Expressões utilizadas no Cenário 1**

Processo	Expressão (tempo em horas)
Gerar sucata	EXPO (24)
Fundir	TRIA (4, 5, 6)
Quebra	Chance de 0,83%
Reparo do forno	EXPO (12)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

**Cenário 2:** Implementou a otimização das rotas de coleta com foco em fornecedores a menos de 10 km e estabeleceu parcerias com cooperativas locais. Foram consideradas alterações nos horários de coleta e consolidação de cargas com o objetivo de aumentar a eficiência logística e reduzir o tempo de deslocamento.

**Figura 3 – Cenário 2**



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

**Quadro 6 – Expressões utilizadas no Cenário 2**

Processo	Expressão (tempo em horas)
Gerar sucata	EXPO (24)
Rota perto	TRIA (0.5, 1 1.5)
Rota média	TRIA (1.5, 2, 3)
Rota longe	TRIA (3, 4, 6)
Fundir	TRIA (4, 5, 6)
Quebra	Chance de 0,83%
Reparo do forno	EXPO (12)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Duas métricas principais foram utilizadas para a comparação entre os cenários:  
**Redução de custos:** Avaliada em termos percentuais com base nas despesas logísticas totais, considerando transporte, armazenagem e perdas por indisponibilidade de matéria-prima.  
**Produtividade:** Medida em toneladas mensais, levando em consideração a disponibilidade contínua de insumos e a eficiência dos equipamentos produtivos.

As simulações foram realizadas com 10 replicações por cenário, com um tempo total de 720 horas(30 dias) por replicação, garantindo a significância estatística dos resultados obtidos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O quadro 7, a seguir, resume os resultados numéricos obtidos em cada cenário.

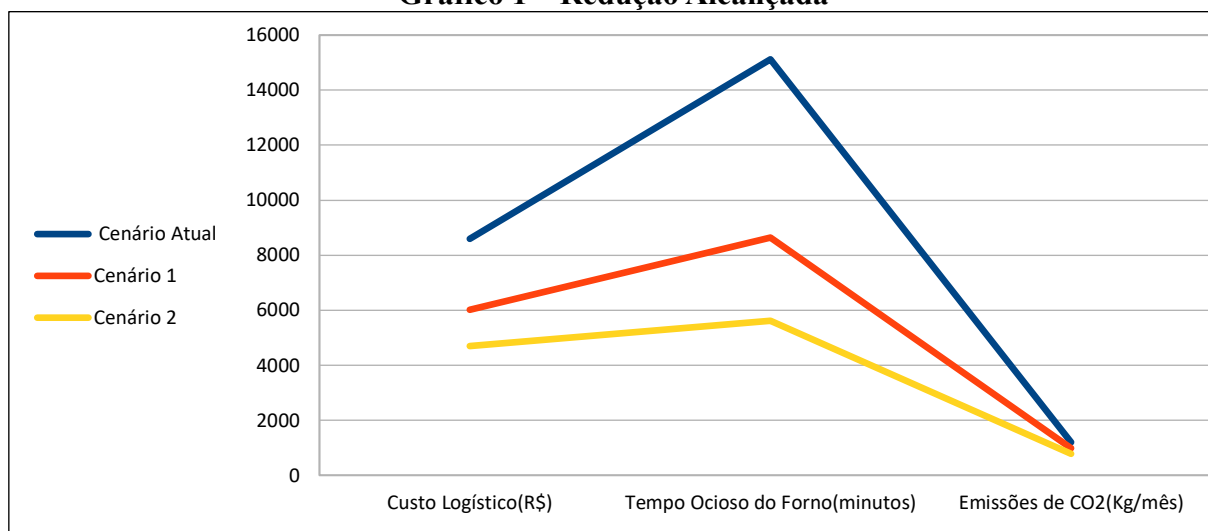
**Quadro 7 – Resultados Numéricos**

Métrica	Cenário Atual	Cenário 1 (Estoque Mínimo)	Cenário 2 (Rotas Otimizadas)
<b>Custo Logístico Mensal</b>	R\$ 8.600,00	R\$ 6.020,00(↓30%)	R\$ 4.700,00(↓45,3%)
<b>Tempo Ocioso dos Fornos</b>	252Hrs (35%)	144Hrs (20%)(↓15 p.p.)	93,6Hrs(13%)(↓22 p.p.)
<b>Emissões de CO<sub>2</sub></b>	1.200kg/mês	984 kg/mês(↓18%)	780 kg/mês(↓35%)

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os achados da simulação computacional indicaram efeitos operacionais e financeiros distintos para cada uma das situações avaliadas, evidenciando avanços progressivos à medida que as estratégias foram implementadas. No Cenário Atual, que refletia a operação sem intervenções, os resultados apontaram altos custos logísticos de R\$ 8.600,00 mensais e tempo ocioso dos fornos em 35% do tempo total analisado. Além disso, a ausência de um estoque regulador dificultava a compensação das variações na disponibilidade de matéria-prima, que oscilava entre 50% e 80% da capacidade requerida ao longo do ano.

**Gráfico 1 – Redução Alcançada**



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

No Cenário 1, voltado à criação de um estoque estratégico mínimo de 5 toneladas, os resultados foram significativos. Os custos logísticos caíram para R\$ 6.020,00 mensais, representando uma redução de 30% em relação ao cenário inicial, enquanto o tempo ocioso dos fornos foi reduzido para 20%. A manutenção desse estoque mínimo mostrou-se eficaz em atenuar as flutuações sazonais na oferta de sucata, assegurando operações contínuas mesmo durante períodos de baixa oferta. Adicionalmente, a menor frequência de coletas permitiu a redução das emissões de CO<sub>2</sub> para 984 kg/mês.

A adoção do Cenário 2, centrada na otimização das rotas de coleta, apresentou resultados ainda mais expressivos. Os custos logísticos diminuíram para R\$ 4.700,00 mensais, resultando em uma economia de 45,3% em comparação ao cenário original. O tempo ocioso dos fornos caiu para 13%, representando uma redução de 22 pontos percentuais. Esses ganhos foram alcançados principalmente pela diminuição das distâncias médias percorridas, o que reduziu o custo de transporte para R\$ 3,20/km. Houve também aumento na frequência de entregas, assegurando um fornecimento mais constante de matéria-prima. A seleção de fornecedores locais não apenas contribuiu para a redução de custos, mas também para uma queda nas emissões de CO<sub>2</sub> para 780 kg/mês, uma diminuição de 35%.

Um exame estatístico rigoroso, com dez repetições para cada cenário, validou a relevância dos resultados, apresentando intervalos de confiança estreitos para todos os principais indicadores. O gráfico 1 evidencia claramente esse avanço positivo, demonstrando uma diminuição progressiva nos custos e no tempo improdutivo ao se passar do Cenário Atual para os Cenários 1 e 2. A simulação também permitiu a identificação de novas oportunidades de aprimoramento, como a adoção de triagem magnética — capaz de reduzir perdas causadas por impurezas — e a criação de redes colaborativas entre fundições da região, com potencial de redução de até 35% nos custos logísticos por meio do compartilhamento de recursos.

Tais resultados abrem espaço para reflexões sobre a viabilidade de estratégias logísticas mais eficientes e a importância de investimentos em tecnologias de pré-processamento para

e elevar a qualidade da sucata. A análise sugere que a combinação de rotas otimizadas, gestão de estoque e manutenção preventiva pode gerar benefícios operacionais e financeiros expressivos para pequenas fundições.

#### 4.1 Sugestões de Melhorias

Com base nas descobertas, recomenda-se que a fundição implemente ações efetivas para consolidar os resultados obtidos. Priorizar parcerias com cooperativas locais, situadas a menos de 10 km, pode resultar em uma redução de custos superior a 35%, além de contribuir para a diminuição das emissões de poluentes. A aquisição de equipamentos para triagem magnética, apesar de exigir investimento inicial, mostra-se viável, com retorno estimado em oito meses, considerando a economia proporcionada pela redução de retrabalhos.

Para ampliação dos benefícios, sugere-se a criação de um sistema de compartilhamento de informações entre pequenas fundições da região, permitindo a formação de redes colaborativas para aquisição e transporte de sucata. Futuras investigações poderiam explorar a integração de tecnologias como *blockchain*, para rastreabilidade da matéria-prima, e inteligência artificial, para prever variações na oferta de sucata.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho evidenciou a utilidade da simulação por computador como uma ferramenta estratégica para melhorar a logística em pequenas fundições que trabalham com alumínio reciclável, ressaltando sua capacidade de diminuir despesas operacionais e elevar a produção. Com o uso do *software* Arena, foi possível criar e examinar três cenários distintos, demonstrando que a melhoria nas rotas de coleta e a adoção de um sistema inteligente de gestão de estoques levaram a reduções consideráveis: 45,3% nos custos logísticos (equivalente a R\$ 3.900,00 por mês) e 35% no tempo de inatividade dos fornos. Tais achados evidenciam a relevância da simulação como ferramenta de apoio à decisão, permitindo a análise prévia de abordagens antes de sua implementação prática, reduzindo riscos e aumentando a eficiência.

Além disso, a pesquisa destacou a importância das colaborações regionais e do pré-processamento do material reciclável para assegurar a qualidade do alumínio reaproveitado — elementos essenciais para a sustentabilidade das operações. A manutenção de um estoque mínimo de 5 toneladas demonstrou-se eficaz para lidar com as flutuações sazonais na disponibilidade de matéria-prima, garantindo a continuidade da produção.

O estudo também apontou desafios persistentes, como a necessidade de aprimorar a triagem da sucata para eliminar impurezas, indicando a viabilidade de investimentos em tecnologias como a triagem magnética. A pesquisa contribui para o aprofundamento do entendimento sobre logística reversa e economia circular, demonstrando como pequenas fundições podem se beneficiar de soluções tecnológicas acessíveis, como o **software** Arena. O uso de técnicas de simulação não apenas aprimora processos existentes, como também abre caminho para a introdução de inovações futuras, como *blockchain* e inteligência artificial, que podem ampliar a rastreabilidade e a previsibilidade na cadeia de suprimentos.

Por fim, este estudo reforça a importância de políticas públicas e de esforços colaborativos voltados à formalização e modernização das pequenas fundições, fortalecendo seu papel na promoção da sustentabilidade ambiental e no desenvolvimento econômico local. A simulação computacional, portanto, consolida-se como parceira essencial na transformação dessas empresas, alinhando eficiência operacional, responsabilidade ambiental e competitividade no mercado. Pesquisas futuras poderão investigar a combinação de tecnologias emergentes e a ampliação de redes colaborativas, ampliando ainda mais os benefícios apontados nesta investigação.

## REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Reciclagem de alumínio atinge 60% do consumo nacional em 2023**. São Paulo: ABAL, 2023. Disponível em: <https://abal.org.br>. Acesso em: 7 mai. 2025.

BANKS, J. et al. **Discrete-event system simulation**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Revisão 2021**. Brasília: MMA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 7 maio 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Panorama da Indústria de Fundição no Brasil**. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br> Acesso em: 7 maio 2025.

ESTEVES, R.; MOORI, R. G.; MADEIRA, A. B. **Logística reversa como mediadora entre coopetição e desempenho operacional ambiental**. Revista Ciências Administrativas, v. 28, p. e10581, 2022. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/rca/article/view/10581> Acesso em: 7 maio 2025.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (IAI). **Aluminium recycling and climate change**. Londres, 2021. Disponível em: <https://international-aluminium.org> Acesso em: 7 maio 2025.

KELTON, W. D. et al. **Simulation with Arena**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

RIBEIRO, A. et al. **Otimização do transporte em minas a céu aberto via simulação no Arena**. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 70, n. 3, p. 321-328, 2017.

SANTOS, João A.; PEREIRA, Luana M. **Desafios logísticos em pequenas fundições brasileiras: um estudo de caso**. Revista Brasileira de Logística, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 45–61, 2020.

SILVA, J. L.; NASCIMENTO, A. P.; OLIVEIRA, D. F. **Qualidade do alumínio reciclado em microfundições: entraves e soluções**. Cadernos de Engenharia e Sustentabilidade, v. 5, n. 2, p. 15–28, 2021.

SOUZA, M. C.; SILVA, T. A. **Uso da simulação para melhoria no atendimento hospitalar: um estudo de caso com o software Arena**. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 5, n. 1, p. 44–52, 2019.

“Declara-se pelos autores que durante a preparação deste trabalho foi(foram) utilizado(s) a Inteligência artificial CHAT GPT (OPEN AI) para busca de referências, correções textuais e auxílio na formatação. Após utilizar esta ferramenta/serviço, os autores editaram e revisaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo da publicação”.