



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DÁRIO SALMITO DE MELO FILHO

**ESTUDO DE CASO DO DESEMPENHO DE UMA EMPACOTADORA
AUTOMATIZADA EM LINHA DE TUBOS DE UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA**

RUSSAS
2026

DÁRIO SALMITO DE MELO FILHO

ESTUDO DE CASO DO DESEMPENHO DE UMA EMPACOTADORA
AUTOMATIZADA EM LINHA DE TUBOS DE UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo

RUSSAS

2026

DÁRIO SALMITO DE MELO FILHO

ESTUDO DE CASO DO DESEMPENHO DE UMA EMPACOTADORA
AUTOMATIZADA EM LINHA DE TUBOS DE UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 07/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. José Joabe de Andrade Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ma. Rafaella Cavalcante Regis
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a Deus e à minha família,
bases essenciais da minha caminhada, pelo
amor, apoio e força que tornaram esta
conquista possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança durante toda a minha trajetória acadêmica, especialmente nos momentos de dificuldade, cansaço e incerteza.

Aos meus pais, Dário Salmito de Melo e Ana Cristina Mourão Bezerra Melo, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor, apoio, confiança e incentivo constantes. Os ensinamentos, valores e esforços de vocês foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha família, em especial às minhas três irmãs, agradeço pelo carinho, pela presença e pelo apoio ao longo dessa caminhada. Cada palavra de incentivo e cada gesto de cuidado tiveram grande importância nessa conquista.

Agradeço também à minha companheira, pela paciência, compreensão e apoio durante essa etapa. Sua presença tornou essa caminhada mais leve e significativa, principalmente nos momentos de maior dedicação e responsabilidade.

À Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica e ao meu orientador, agradeço pelos conhecimentos transmitidos, pelas orientações e pelas contribuições para minha formação acadêmica e profissional.

À empresa Aço Cearense, agradeço pela oportunidade de vivenciar o ambiente industrial e pelo acesso às informações necessárias para o desenvolvimento deste estudo de caso.

Também agradeço aos colegas de trabalho e profissionais que contribuíram com informações, esclarecimentos técnicos e apoio durante a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso e para a conclusão desta importante etapa da minha formação.

RESUMO

O empacotamento em linhas industriais pode representar um ponto crítico para a continuidade do fluxo produtivo, sobretudo quando o final de linha limita o desempenho operacional. Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho do empacotamento automatizado associado à Máquina de Tubos 04 (MT04), em uma indústria metalúrgica, considerando seus reflexos sobre produtividade, interrupções, eficiência operacional, segurança, ergonomia e logística interna. A pesquisa foi desenvolvida por meio de estudo de caso, com abordagem quantitativa e qualitativa, utilizando dados internos referentes ao período de janeiro a novembro de 2025. A análise comparou dois períodos: janeiro a junho, anterior à estabilização da empacotadora, e julho a novembro, posterior à estabilização. Foram avaliados indicadores de produção, interrupções, OEE, Disponibilidade, Performance/Eficiência e Qualidade, além da análise de Pareto aplicada às interrupções com maior relação com o final de linha. Os resultados indicaram redução de 13,1% na média mensal de interrupções, aumento do OEE de 33,62% para 39,21% e crescimento da produção consolidada de 24,2 mil para 31,8 mil toneladas. Também se observou menor exposição operacional em atividades manuais de formação e cintagem dos fardos. Conclui-se que o período pós-estabilização apresentou melhoria no desempenho operacional da MT04, sem atribuir os resultados exclusivamente à empacotadora automatizada.

Palavras-chave: empacotamento automatizado; OEE; eficiência operacional; interrupções; linha de tubos; automação industrial

ABSTRACT

Packaging in industrial lines can represent a critical point for production flow continuity, especially when the end of the line limits operational performance. This study aimed to analyze the performance of the automated packaging system associated with Tube Machine 04 (MT04), in a metallurgical industry, considering its effects on productivity, interruptions, operational efficiency, safety, ergonomics, and internal logistics. The research was developed as a case study, with a quantitative and qualitative approach, using internal data from January to November 2025. The analysis compared two periods: January to June, prior to the stabilization of the packaging system, and July to November, after its stabilization. Production indicators, interruptions, OEE, Availability, Performance/Efficiency, and Quality were evaluated, in addition to a Pareto analysis applied to interruptions more directly related to the end of the line. The results indicated a 13.1% reduction in the monthly average of interruptions, an increase in OEE from 33.62% to 39.21%, and growth in consolidated production from 24.2 thousand to 31.8 thousand tons. A lower operational exposure to manual activities related to bundle forming and strapping was also observed. It is concluded that the post-stabilization period showed improved operational performance of MT04, without attributing the results exclusively to the automated packaging system.

Keywords: automated packaging; OEE; operational efficiency; interruptions; tube line; industrial automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência operacional do empacotamento automatizado associado à MT04.....	23
Figura 2 - Fluxograma da estratégia de análise.....	26
Figura 3 - Fronteiras do processo do empacotamento da MT04 e fluxo do final de linha.....	27
Figura 4 - Célula robotizada utilizada na manipulação e organização dos tubos no empacotamento automatizado da MT04.....	29
Figura 5 - Fardos de tubos de seção a) quadrada e retangular e b) formação hexagonal, processados no final de linha da MT04.....	30
Figura 6 - Transportadores de rolos utilizados após a formação dos fardos pela célula robotizada.....	31
Figura 7 - Sequência operacional do empacotamento automatizado associado à MT04 com identificação das etapas e principais equipamentos.....	32
Figura 8 - Proteções físicas, grade de segurança e segregação da célula robotizada do empacotamento automatizado da MT04.....	33
Figura 9 - Interrupções totais por mês no recorte jan–nov/2025.....	38
Figura 10 - Comparação das interrupções entre os períodos jan.-jun./2025 e jul.-nov./2025...	40
Figura 11 - Pareto das interrupções filtradas no período jan.-jun./2025.....	41
Figura 12 - Pareto das interrupções filtradas no período jul.-nov./2025.....	41
Figura 13 - OEE consolidado por mês no recorte jan–nov/2025.....	43
Figura 14 - Componentes do OEE (Disponibilidade) por mês no recorte jan–nov/2025.....	44
Figura 15 - Componentes do OEE (Performance) por mês no recorte jan–nov/2025.....	45
Figura 16 - Componentes do OEE (Qualidade) por mês no recorte jan–nov/2025.....	46
Figura 17 - Produção mensal no recorte jan-jun e jul-nov/2025.....	48
Figura 18 - Produção mensal no recorte jan–nov/2025.....	49
Figura 19 - Rotas internas e pontos críticos de escoamento no entorno do empacotamento da MT04.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre empacotamento manual e automatizado na MT04.....	34
Quadro 2 - Síntese das projeções quantitativas do estudo técnico de 2022.....	37
Quadro 3 - Relação entre projeções do estudo técnico e resultados observados.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das interrupções filtradas relacionadas ao final de linha entre jan.-jun./2025 e jul.-nov./2025.....	42
Tabela 2 - Indicadores consolidados por período e variação observada.....	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLP	Controlador Lógico Programável
MT04	Máquina de Tubos 04
NR	Norma Regulamentadora
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
SAP	<i>Systems, Applications and Products in Data Processing</i>
MII	<i>Manufacturing Integration and Intelligence</i>
SST	Segurança e Saúde no Trabalho
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
JAN	Janeiro
JUN	Junho
JUL	Julho
DEZ	Dezembro
NOV	Novembro
MEP	Movimentação de Estoque de Produção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>16</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>16</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Gestão de operações e desempenho em sistemas produtivos.....	17
2.2	Automação industrial aplicada ao empacotamento.....	18
2.3	Indicadores de eficiência.....	18
2.4	Interrupções/paradas e análise de Pareto.....	19
2.5	Segurança e saúde no trabalho.....	20
2.6	Logística interna, movimentação e armazenagem.....	21
3	METODOLOGIA.....	23
3.1	Objeto do estudo.....	23
3.2	Fontes de dados e indicadores.....	24
3.3	Tratamento, consistência e consolidação dos dados.....	25
3.4	Estratégia de análise.....	25
4	ESTUDO DE CASO E CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO.....	27
4.1	Caracterização do sistema analisado e fronteiras do processo.....	27
4.2	Descrição do empacotamento manual antes da automação.....	28
4.3	Descrição operacional do empacotamento automatizado associado à MT04.....	29
4.4	Segurança operacional da célula automatizada.....	32
4.5	Transição operacional: do empacotamento manual ao automatizado.....	33
4.6	Quadro comparativo entre empacotamento manual e automatizado.....	34
4.7	Critérios de comparação e organização das análises.....	35
4.8	Projeções do estudo técnico de 2022.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1	Interrupções: comportamento mensal no recorte jan–nov/2025.....	38

5.2	Comparação por períodos: interrupções (jan–jun vs jul–nov) e efeito da estabilização.....	39
5.3	Análise das interrupções filtradas relacionadas ao final de linha por Pareto.....	40
5.4	Evolução do OEE e de seus componentes.....	43
5.5	Análise da produção consolidada por período.....	47
5.6	Avaliação das projeções do estudo técnico de 2022.....	50
5.7	Segurança e ergonomia: comparação entre os cenários manual e automatizado...	51
5.8	Logística interna e restrição de escoamento no final de linha.....	52
6	CONCLUSÃO.....	55
6.1	Recomendações para trabalhos futuros.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICE A – MODELO AMOSTRAL DA BASE DE PRODUÇÃO E INDICADORES OPERACIONAIS: AGOSTO DE 2025.....	58
	APÊNDICE B – MODELO AMOSTRAL DA BASE DE INTERRUPÇÕES: AGOSTO DE 2025.....	59

1 INTRODUÇÃO

A competitividade de sistemas industriais de manufatura depende da estabilidade do fluxo produtivo, da previsibilidade operacional e da capacidade de converter recursos produtivos em produtos com regularidade. Em linhas de fabricação de tubos, o desempenho não é determinado apenas pelas etapas de conformação, corte e processamento a montante, mas também pelas operações de final de linha. Entre essas operações, o empacotamento exerce a função de consolidar o produto em fardos, organizar o material para movimentação interna e disponibilizá-lo para estocagem. Quando essa etapa não acompanha a vazão do processo anterior, o sistema tende a apresentar acúmulos, saturação de áreas, aumento de intervenções operacionais e interrupções que reduzem a capacidade efetiva do processo.

Nesse sentido, o empacotamento deve ser entendido como um subsistema produtivo e logístico. Sua função não se limita à organização física do produto, mas influencia o escoamento da linha, o uso de recursos de movimentação, a ocupação de área e a regularidade do abastecimento do estoque. Em termos de Engenharia de Produção, trata-se de uma etapa com potencial de atuar como restrição do sistema, pois perdas localizadas no final de linha podem se propagar para o fluxo anterior e comprometer indicadores de produtividade, eficiência e confiabilidade operacional (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018).

O final de linha tem como função consolidar os tubos em fardos, realizar a cintagem, permitir a pesagem, favorecer a drenagem de fluido residual e disponibilizar o conjunto para movimentação interna por ponte rolante e posterior estocagem. Esse arranjo possui relevância mecânica por constituir uma sequência de etapas interdependentes, nas quais o desempenho da célula depende da sincronização entre transporte, manipulação robotizada, formação do fardo, cintagem e retirada final. Assim, falhas ou desvios em qualquer etapa podem gerar acúmulos, perdas de ritmo, intervenções operacionais e redução da disponibilidade. Dessa forma, a análise do empacotamento automatizado exige uma abordagem integrada entre Engenharia Mecânica, por envolver sistemas de transporte, manipulação e automação, e Engenharia de Produção, por tratar de desempenho, perdas, fluxo e indicadores industriais.

A etapa de empacotamento também apresenta relevância sob a ótica de Segurança e Saúde no Trabalho (SST). No cenário automatizado, a presença de célula segregada com grade, Controlador Lógico Programável (CLP) e intertravamento contribui para reduzir a exposição do operador às zonas de alcance do robô e aos pontos de esmagamento associados às mesas de transferência. Entretanto, a automação não elimina todos os riscos, pois permanecem atividades de inspeção, ajustes, manutenção e retomadas de processo. Dessa

forma, a estabilidade operacional e a redução de interrupções também assumem papel preventivo, ao diminuírem a necessidade de intervenções manuais em condições de instabilidade (Brasil, 2024; Brasil, 2022).

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de um estudo de caso em uma indústria do setor metalúrgico, tendo como objeto de análise o sistema de empacotamento automatizado associado à Máquina de Tubos 04 (MT04). Registros técnicos anteriores à implantação do sistema automatizado indicaram perdas associadas ao arranjo físico e ao escoamento do final de linha. No recorte de jan./2022 a set./2022, foram identificadas interrupções por falta de espaço no estoque e mesa cheia, evidenciando que o empacotamento manual e a logística interna já representavam pontos críticos para o desempenho da linha.

Dessa forma, a estratégia analítica principal do estudo consiste na comparação entre jan.-jun./2025, período que engloba a condição manual predominante, o início do startup e a transição inicial, e jul.-nov./2025, período posterior à estabilização operacional. Essa organização permite avaliar o efeito da maturação do sistema automatizado sem atribuir ao equipamento perdas decorrentes de um evento sistêmico extraordinário.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho operacional do empacotamento automatizado associado à Máquina de Tubos 04 (MT04), durante as fases de startup e estabilização operacional, considerando a transição do processo manual para o automatizado e seus reflexos sobre a produtividade, as interrupções gerais, a eficiência operacional, a segurança, a ergonomia e a logística interna, a fim de identificar as perdas filtradas com maior interface com o final de linha que permanecem relevantes no processo.

1.1 Justificativa

A automação do empacotamento é uma estratégia utilizada para aumentar a produtividade, reduzir perdas operacionais e minimizar atividades manuais no final da linha de produção. Entretanto, seus benefícios dependem da estabilização do processo e da integração entre os sistemas envolvidos. A avaliação do desempenho operacional por meio de indicadores como produção, interrupções e Overall Equipment Effectiveness (OEE) permite identificar oportunidades de melhoria e aperfeiçoar os processos industriais.

O estudo técnico realizado em 2022 estimou benefícios relacionados ao aumento de disponibilidade, melhoria de eficiência, redução de mão de obra operacional e ampliação da quantidade de produtos disponíveis para venda. Sob a perspectiva econômica, consiste em

avaliar os ganhos operacionais decorrentes da automação, além de verificar se os benefícios previstos no estudo técnico de implantação refletem o desempenho observado no operacional.

Além dos aspectos produtivos, o estudo também apresenta relevância em Segurança e Saúde no Trabalho, uma vez que reduz a necessidade de intervenções manuais em atividades que envolvem movimentação de cargas e interação com equipamentos industriais, podendo contribuir para melhores condições ergonômicas e menor exposição a riscos ocupacionais.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho contribui ao integrar conceitos de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção em um estudo de caso real. A pesquisa relaciona automação, desempenho operacional, perdas por interrupção, segurança, ergonomia e logística interna, utilizando dados industriais reais e um recorte temporal metodologicamente justificado. Essa integração torna o estudo relevante para aplicações de gestão de ativos, melhoria contínua e avaliação de desempenho em sistemas produtivos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho operacional do empacotamento automatizado associado à MT04, considerando a evolução das interrupções gerais, do OEE, da produtividade, da segurança, da ergonomia e da logística interna durante as fases de startup e estabilização.

1.2.2 Objetivos específicos

- Consolidar os indicadores OEE e seus componentes (Disponibilidade, Performance e Qualidade) por mês no período de janeiro a novembro de 2025.
- Comparar os períodos de janeiro a junho e julho a novembro de 2025, quantificando variações de OEE, interrupções e produção.
- Caracterizar tecnicamente o sistema de empacotamento automatizado da MT04 e sua relação com o fluxo de final de linha.
- Avaliar, por meio da análise de Pareto, um conjunto filtrado de interrupções com maior interface operacional com o final de linha, a mesa de saída e o empacotamento associado à MT04, comparando o perfil das perdas entre os períodos analisados.
- Discutir os impactos da automação sobre segurança, ergonomia e logística interna, com base em evidências do estudo técnico e dos dados de 2025.
- Verificar se os resultados observados estão alinhados às projeções operacionais do estudo técnico de 2022.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão de operações e desempenho em sistemas produtivos

A gestão de operações estuda a forma como os recursos são organizados e transformados em produtos e serviços. Em ambientes industriais, o desempenho operacional é avaliado não apenas pela capacidade nominal de equipamentos, mas pela estabilidade do fluxo, pela confiabilidade do processo e pela redução de variabilidades que causam atrasos, retrabalhos e perdas. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) destacam que operações eficazes devem equilibrar objetivos de custo, qualidade, rapidez, confiabilidade e flexibilidade, de modo que a melhoria de desempenho exige compreensão sistêmica.

Essa abordagem fundamenta a interpretação do empacotamento como parte integrante do fluxo produtivo, permitindo analisar desempenho, variabilidade e restrições operacionais de forma integrada. Em linhas industriais, etapas finais de processo podem exercer influência direta sobre a continuidade da produção, principalmente quando sua capacidade de escoamento não acompanha o ritmo das etapas anteriores.

No contexto de linhas de tubos, o final de linha exerce papel decisivo. Mesmo que etapas anteriores apresentem capacidade adequada, o desempenho global pode ser limitado caso o empacotamento não consiga absorver a vazão produtiva. Portanto, analisar sistemas de empacotamento como subsistemas críticos é metodologicamente adequado, pois perdas nessa etapa podem se refletir em interrupções, acúmulo de material e instabilidade de produção.

Gargalos podem ser compreendidos como pontos do processo em que a capacidade efetiva é inferior à demanda do fluxo. Segundo Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), a análise de restrições é essencial para compreender limitações de desempenho em sistemas produtivos. No final de linha, o gargalo nem sempre está relacionado a falhas mecânicas; pode decorrer de restrições de layout, acúmulo de produto, indisponibilidade de movimentação ou desbalanceamento entre etapas. Em sistemas de empacotamento, ocorrências como mesa cheia, falta de área de estoque e espera por retirada são exemplos de restrições capazes de gerar acúmulos, interrupções e perdas de eficiência.

A abordagem de gargalos é relevante porque desloca o foco da análise de um equipamento isolado para a lógica do fluxo. Sistemas de empacotamento automatizado de final de linha, ao integrarem transporte, manipulação robotizada, cintagem, pesagem e transferência, dependem da continuidade entre etapas. Assim, a perda operacional não deve ser interpretada apenas como parada pontual, mas também como consequência de restrições que afetam a capacidade de escoamento do sistema produtivo.

2.2 Automação industrial aplicada ao empacotamento

A automação industrial consiste na aplicação integrada de sistemas mecânicos, elétricos, eletrônicos e computacionais para executar operações com maior repetibilidade, precisão e controle. Segundo Groover (2016), sistemas automatizados de produção combinam equipamentos, dispositivos de controle e sistemas de manuseio de materiais para aumentar produtividade, reduzir variabilidade e elevar a consistência operacional.

Em sistemas de empacotamento industrial, a automação permite caracterizar células robotizadas, sistemas de transporte, cintagem automática e integração entre equipamentos como elementos centrais para a padronização do processo. Essa integração é relevante em finais de linha, nos quais a continuidade do fluxo depende da sincronização entre movimentação, formação do conjunto, amarração, transferência e retirada do produto acabado.

No empacotamento de tubos, a automação substitui atividades manuais de alta repetitividade por mecanismos de transporte e manipulação controlados. Células robotizadas, cintadeiras automáticas e sistemas de transferência permitem padronizar a formação dos fardos e reduzir interferências decorrentes da variação humana. Entretanto, sistemas automatizados também exigem estabilização operacional, pois parâmetros inadequados, desalinhamentos, falhas de integração ou dificuldades de sincronismo podem gerar paradas e perdas de performance. Dessa forma, o período de startup pode ser compreendido como uma etapa natural de maturação de sistemas automatizados.

2.3 Indicadores de eficiência

A produtividade representa a relação entre resultado produzido e recursos utilizados. Em termos operacionais, a produção mensal permite avaliar a capacidade de entrega de um sistema produtivo, mas não explica, isoladamente, as causas das variações de desempenho. Uma elevação da produção pode decorrer de maior tempo disponível, maior ritmo de operação, melhor organização logística, redução de perdas ou combinação desses fatores.

Por essa razão, a produtividade deve ser analisada em conjunto com outros indicadores operacionais. Em ambientes industriais, o aumento do volume produzido somente representa melhoria sustentável quando associado à estabilidade do fluxo, à redução de interrupções, à melhor utilização dos recursos produtivos e ao controle das perdas do processo. Assim, indicadores de produção devem ser interpretados em conexão com medidas de eficiência, disponibilidade e desempenho operacional.

O *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) é um indicador de eficiência global de equipamentos e sistemas produtivos desenvolvido no contexto da *Total Productive Maintenance* (TPM), ou Manutenção Produtiva Total. Sua finalidade é medir quanto da capacidade produtiva planejada é efetivamente convertida em produção conforme, considerando perdas por Disponibilidade, Performance e Qualidade (Nakajima, 1988).

De forma conceitual, o OEE pode ser compreendido como o produto entre Disponibilidade, Performance e Qualidade. A Disponibilidade relaciona o tempo efetivo de operação ao tempo planejado, a Performance compara o ritmo real do processo ao ritmo esperado ou de referência e a Qualidade representa a proporção de produção conforme em relação à produção total considerada no critério de cálculo.

Na indústria, o OEE é utilizado porque traduz diferentes tipos de perdas em uma métrica integrada. A Disponibilidade evidencia perdas por paradas, a Performance evidencia perdas por operação abaixo do ritmo esperado e a Qualidade evidencia perdas relacionadas à conformidade do produto. A decomposição do indicador permite que gestores e engenheiros identifiquem se a melhoria deve priorizar redução de interrupções, aumento de ritmo, melhoria de setup, controle de qualidade ou confiabilidade do equipamento (De Ron; Rooda, 2006; Muchiri; Pintelon, 2008).

Essa abordagem permite diagnosticar perdas por Disponibilidade, Performance e Qualidade em sistemas produtivos, conectando os indicadores aos efeitos da estabilização operacional de equipamentos e processos automatizados. Em linhas industriais, a redução de interrupções tende a impactar a Disponibilidade, a estabilização de ciclos automáticos tende a influenciar a Performance e a padronização do processo pode contribuir para a redução de variações operacionais que afetam a Qualidade. Em sistemas de empacotamento de final de linha, o OEE constitui um importante instrumento de diagnóstico operacional. Sua aplicação permite comparar períodos, identificar tendências de desempenho e avaliar os efeitos da estabilização do processo automatizado.

2.4 Interrupções/paradas e análise de Pareto

Interrupções são eventos que impedem a continuidade do fluxo produtivo e reduzem o tempo efetivamente disponível para operação. Na indústria, são registradas por tempo, sintoma, observação e classificação, permitindo avaliar a magnitude das perdas e identificar padrões recorrentes. Conforme a lógica de análise de perdas discutida por Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), esses registros apoiam a identificação das causas com

maior impacto sobre o desempenho do processo e permitem direcionar ações de melhoria para os pontos mais relevantes do fluxo.

As interrupções podem ter origem em falhas mecânicas, elétricas, operacionais, logísticas ou organizacionais. Em finais de linha, essas perdas podem estar associadas tanto ao equipamento quanto à capacidade de escoamento do sistema, à disponibilidade de área, à movimentação interna e à sincronização entre etapas. Dessa forma, a análise de paradas não deve considerar apenas o evento isolado, mas também sua relação com o fluxo produtivo e com as restrições do processo.

A análise de Pareto é uma forma de priorização baseada no princípio de Pareto, segundo o qual uma parcela reduzida de causas tende a concentrar parcela significativa dos efeitos. Muchiri e Pintelon (2008) destacam a importância de utilizar indicadores e registros de perdas para apoiar decisões de manutenção e melhoria de desempenho. Em aplicações industriais, o Pareto pode ser utilizado para ordenar interrupções por tempo total perdido, permitindo direcionar a análise às perdas mais representativas e à mudança do perfil das interrupções entre períodos avaliados.

Essa abordagem evita a dispersão em ocorrências de baixo impacto e torna mais clara a priorização das oportunidades de melhoria. Ao ordenar sintomas, causas ou registros agrupados de interrupção, a análise de Pareto contribui para identificar quais perdas devem receber maior atenção gerencial e técnica, especialmente em processos com grande volume de registros operacionais.

2.5 Segurança e saúde no trabalho

A ergonomia busca adaptar as condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, considerando esforço físico, postura, repetitividade, organização do trabalho e condições ambientais. A Norma Regulamentadora nº 17 (NR-17) estabelece parâmetros para adaptação das condições de trabalho, visando segurança, saúde, conforto e desempenho eficiente (Brasil, 2022).

No empacotamento manual de tubos, a exposição ergonômica pode ocorrer por manuseio repetitivo, movimentação de peças, posicionamento manual de tubos, aplicação de cintas e necessidade de ajustes durante a formação dos fardos. A NR-17 fundamenta a análise da redução de manuseio direto, repetitividade e esforço físico em processos nos quais atividades manuais passam a ser executadas por sistemas mecanizados ou automatizados. A automação pode reduzir parte dessas exigências ao transferir tarefas repetitivas para equipamentos de transporte, manipulação e cintagem. Contudo, atividades de supervisão,

inspeção, limpeza e intervenção em paradas ainda precisam ser controladas, pois a automação altera o perfil do risco, mas não o elimina. Dessa forma, a análise ergonômica em sistemas automatizados deve considerar tanto a redução do esforço manual quanto as novas exigências associadas à operação, monitoramento e intervenção segura.

A segurança de máquinas compreende medidas de projeto, proteção e controle destinadas a reduzir riscos durante a operação, manutenção e intervenção em equipamentos. No Brasil, a Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12) estabelece requisitos para garantir a segurança na utilização de máquinas e equipamentos, abrangendo proteções físicas, dispositivos de segurança, sistemas de comando, intertravamentos, paradas de emergência e procedimentos preventivos (BRASIL, 2024).

Em células robotizadas, a segregação por grades e a presença de intertravamentos são recursos essenciais para limitar o acesso às zonas perigosas durante o ciclo automático. Nesse contexto, o Controlador Lógico Programável (CLP) é um dispositivo eletrônico programável utilizado para controlar a lógica de operação de máquinas e processos, incluindo condições de segurança, sequenciamento e intertravamentos. Em sistemas automatizados, a integração entre CLP, sensores, atuadores, proteções físicas e dispositivos de parada de emergência contribui para elevar o controle operacional e reduzir a exposição direta dos trabalhadores às zonas perigosas.

A automação, quando associada a proteções adequadas e procedimentos seguros, pode contribuir para a redução da exposição ao risco. Entretanto, intervenções de manutenção, ajustes, limpeza, desbloqueios e inspeções devem ser tratadas com atenção, uma vez que o acesso indevido a áreas protegidas ou a neutralização de dispositivos de segurança pode comprometer a efetividade das medidas previstas pela NR-12.

2.6 Logística interna, movimentação e armazenagem

Em sistemas industriais, o final de linha pode atuar como uma interface entre produção e logística interna, pois sua função não se limita à finalização do produto, mas também envolve movimentação, armazenagem temporária e escoamento do fluxo produtivo. Conforme Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), restrições em etapas do processo podem comprometer o desempenho global da operação, gerando perdas de ritmo, acúmulos e interrupções. De forma complementar, Ballou (2006) destaca que as decisões de movimentação e armazenagem influenciam diretamente o desempenho logístico e a continuidade operacional. Assim, sistemas de empacotamento devem ser compreendidos não

apenas como equipamentos isolados, mas como etapas integradas ao fluxo produtivo e à logística interna.

A logística interna compreende o fluxo de materiais dentro da planta, incluindo movimentação, armazenamento, organização de rotas e integração com recursos de transporte. Ballou (2006) destaca que decisões de movimentação e armazenagem influenciam custos, desempenho e nível de serviço. Em ambientes industriais, a logística interna está diretamente relacionada à capacidade de escoamento da produção e à estabilidade do fluxo produtivo.

No final de linha, a logística interna relaciona o empacotamento à movimentação de materiais, à ocupação de área, ao uso de equipamentos de transporte interno e à previsibilidade de retirada para armazenamento. Quando o empacotamento gera acúmulo ou depende de retirada em ritmo inferior ao fluxo produtivo, o sistema passa a apresentar restrições de escoamento. Essas restrições podem provocar paradas, esperas, perdas de ritmo e redução da eficiência operacional.

Dessa forma, interrupções associadas à falta de espaço, mesa cheia, espera por retirada ou indisponibilidade de movimentação devem ser interpretadas também como problemas logísticos, e não apenas como falhas do equipamento. A estabilidade de sistemas de empacotamento automatizado depende não somente do funcionamento dos dispositivos mecânicos e de controle, mas também da disponibilidade de área, da organização da movimentação interna e da continuidade do fluxo após a etapa de empacotamento.

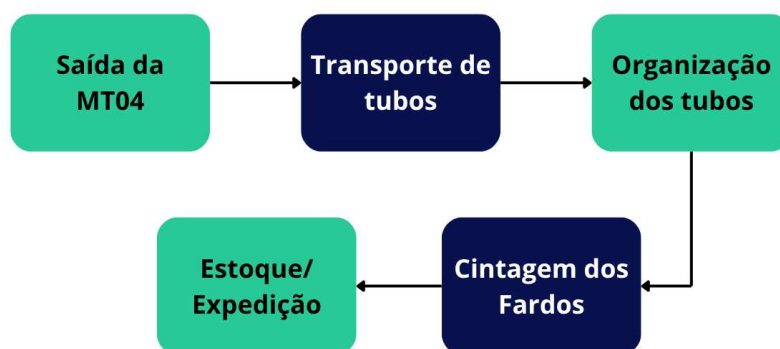
3 METODOLOGIA

3.1 Objeto do estudo

Esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, quantitativa, descritiva e analítica, desenvolvida por meio de um estudo de caso. O objeto deste estudo é o sistema de empacotamento automatizado associado à MT04, pertencente à indústria metalúrgica Aço Cearense. Neste trabalho, a sigla MT04 refere-se à Máquina de Tubos 04, equipamento produtivo vinculado à fabricação de tubos e ao respectivo processo de empacotamento.

Para fins metodológicos, o sistema foi delimitado como o conjunto de operações compreendido entre a saída dos tubos da linha de produção e sua disponibilização para retirada por ponte rolante e envio ao estoque, conforme apresentado na Figura 1. Esse recorte engloba as etapas de formação dos fardos, cintagem, pesagem e drenagem do fluido residual, permitindo analisar o desempenho do final de linha por meio dos indicadores de produção, interrupções, *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), Disponibilidade, Performance/Eficiência e Qualidade.

Figura 1 - Sequência operacional do empacotamento automatizado associado à MT04.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O período analisado compreende os meses de janeiro a novembro de 2025. O mês de dezembro foi excluído devido ao Cutover, por representar uma transição sistêmica com parada extraordinária e não associada ao desempenho intrínseco da empacotadora. Essa decisão metodológica evita que um evento não produtivo e externo à operação regular distorça os indicadores de desempenho.

Para fins de comparação, os dados foram organizados em dois blocos analíticos: janeiro a junho de 2025, correspondente à fase anterior à estabilização operacional e, julho a

novembro de 2025, correspondente à fase posterior à estabilização da empacotadora automatizada. Essa organização permite avaliar a evolução do desempenho com base na mudança de regime operacional.

3.2 Fontes de dados e indicadores

Os dados utilizados são provenientes de bases internas da empresa, extraídas mensalmente do sistema corporativo (SAP) ao longo de 2025 e consolidadas pelo autor para fins de análise. As bases contemplam:

- a) registros de produção e indicadores operacionais (incluindo OEE e seus componentes);
- b) registros de interrupções do período, contendo duração e campos descritivos (como sintoma e observações), quando disponíveis.

As variáveis analisadas foram: produção mensal, interrupções, OEE consolidado, Disponibilidade, Performance/Eficiência e Qualidade. Os indicadores foram utilizados conforme extraídos das bases internas, sem recálculo pelo autor. Essa decisão metodológica foi adotada para preservar a rastreabilidade dos dados e manter coerência com o critério corporativo de consolidação. Dessa forma, o estudo não tem como objetivo auditar ou redefinir o cálculo interno dos indicadores, mas analisar seu comportamento ao longo do período estudado e sua relação com as interrupções, a produção e a estabilização operacional da empacotadora.

As bases mensais foram consolidadas em planilhas únicas para permitir a análise temporal e a comparação entre os períodos definidos. A produção mensal foi utilizada para representar o resultado operacional obtido em cada período. Como forma de evidenciar a estrutura dos dados utilizados na pesquisa, apresentam-se, no Apêndice A, um modelo consolidado das bases de produção e dos indicadores operacionais e, no Apêndice B, um modelo das bases de interrupções, ambos referentes ao mês de agosto de 2025, com o objetivo de demonstrar a organização das informações empregadas nas análises.

A Qualidade foi utilizada conforme registro do sistema interno e definição operacional vigente, desconsiderando sucata, conforme critério adotado pela empresa. Como os períodos comparados possuem durações diferentes, sendo janeiro a junho composto por seis meses e julho a novembro por cinco meses, os resultados foram avaliados tanto por valores totais quanto por médias mensais. Esse procedimento permitiu comparar os períodos de forma proporcional, considerando a diferença de quantidade de meses entre eles.

3.3 Tratamento, consistência e consolidação dos dados

O tratamento dos dados envolveu consolidação mensal, padronização das unidades de análise, agrupamento das informações por período comparativo e organização dos registros para interpretação dos indicadores. A análise não altera os valores de origem, apenas estrutura os dados para permitir leitura temporal, comparação entre períodos e priorização das principais causas de interrupção. As interrupções foram mantidas em minutos, conforme registro original do sistema, sendo também analisadas em horas para facilitar a interpretação das perdas. Além da consolidação temporal, as causas de interrupção foram agrupadas por equivalência operacional, reunindo registros que representavam o mesmo fenômeno produtivo, ainda que descritos de formas diferentes nos campos de sintomas ou observação. Assim, ocorrências como “falta de espaço”, “falta de espaço no estoque”, “mesa cheia”, “berços cheios” e “esperando abrir espaço” foram interpretadas como manifestações de uma mesma causa sistêmica: restrição de escoamento no final de linha.

Esse agrupamento evita a fragmentação artificial das causas e permite uma leitura mais consistente do processo. Em vez de tratar cada descrição operacional como ocorrência isolada, a metodologia reconhece que diferentes registros podem expressar o mesmo problema: a incapacidade momentânea de o final de linha absorver e transferir o material para a etapa seguinte. Dessa forma, a análise por Pareto torna-se mais alinhada ao comportamento real do sistema, desde que interpretada como ferramenta de priorização das maiores perdas registradas, e não como auditoria completa de todas as causas possíveis de parada.

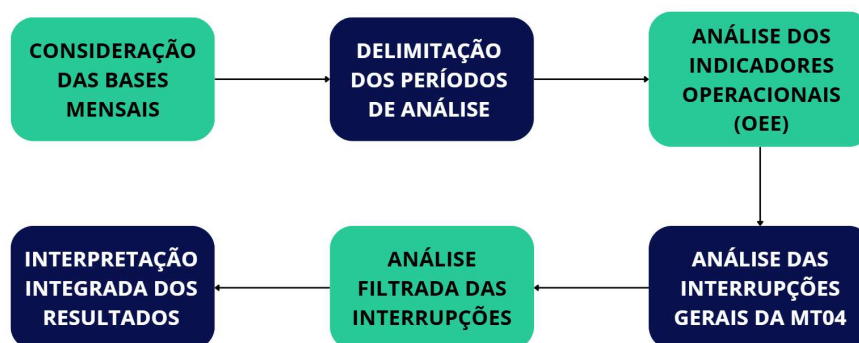
Para a construção dos Paretos filtrados, foram selecionadas categorias com maior relação operacional com a mesa de saída, o final de linha, o escoamento dos tubos e o processo de enfardamento. No período de janeiro a junho de 2025, o recorte filtrado contemplou as categorias MEP – falta de espaço no estoque e engavetamento de tubo. No período de julho a novembro de 2025, além dessas categorias, passaram a aparecer: “regulagem da empacotadora” e “abastecimento do enfardamento com fitas”. O agrupamento foi realizado com base no sintoma registrado e na relação operacional da ocorrência com o final de linha. Logo, o Pareto filtrado não representa o total das interrupções gerais da MT04, mas um recorte técnico destinado a priorizar perdas mais aderentes ao objeto do estudo.

3.4 Estratégia de análise

A estratégia de análise foi estruturada em quatro etapas complementares. Inicialmente, as bases de dados mensais foram consolidadas e organizadas conforme os períodos

estabelecidos para comparação: janeiro a junho de 2025 e julho a novembro de 2025. Essa divisão possibilitou avaliar o comportamento dos indicadores operacionais antes e após a estabilização da empacotadora automatizada. O procedimento metodológico adotado encontra-se representado no fluxograma apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da estratégia de análise.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A primeira etapa consistiu na análise mensal da produção e dos indicadores de Overall Equipment Effectiveness (OEE), Disponibilidade, Performance/Eficiência e Qualidade. Essa avaliação teve como objetivo identificar tendências, oscilações e períodos críticos ao longo do intervalo compreendido entre janeiro e novembro de 2025, além de permitir a comparação do desempenho operacional entre os dois períodos definidos.

A segunda etapa compreendeu a análise das interrupções gerais registradas na MT04, considerando os tempos totais acumulados e as respectivas médias mensais. Em razão da diferença de duração entre os períodos comparados — seis meses no primeiro intervalo e cinco meses no segundo —, foram utilizados tanto os valores absolutos quanto as médias mensais, a fim de assegurar maior equivalência e consistência na interpretação dos resultados.

A terceira etapa envolveu a filtragem das interrupções com maior relação operacional com o final de linha, incluindo ocorrências associadas à mesa de saída, ao fluxo e ao escoamento de materiais e ao processo de empacotamento. Foi realizada a elaboração dos diagramas de Pareto, nos quais as ocorrências foram ordenadas de acordo com o tempo total de interrupção, permitindo identificar as causas mais representativas em cada período.

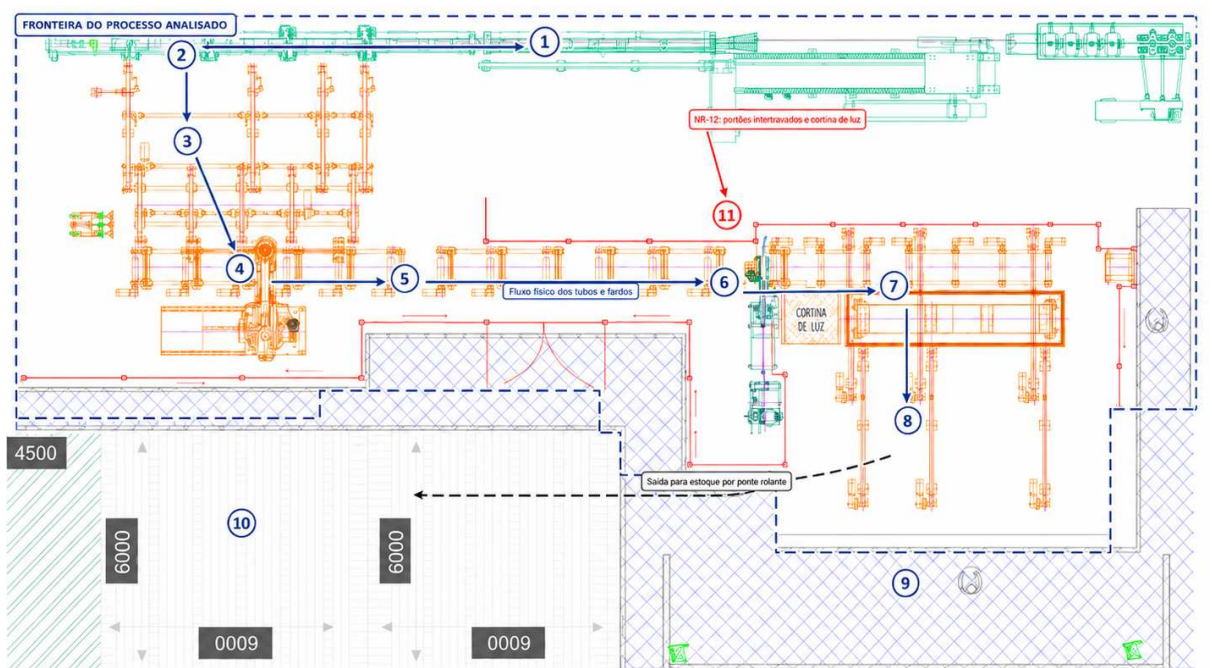
Por fim, a quarta etapa consistiu na interpretação integrada dos resultados, relacionando os níveis de produção, os indicadores de desempenho operacional, as interrupções gerais e as interrupções filtradas. Essa abordagem possibilitou avaliar o comportamento do sistema produtivo após a estabilização da empacotadora automatizada.

4 ESTUDO DE CASO E CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO

4.1 Caracterização do sistema analisado e fronteiras do processo

O estudo de caso concentra-se na empacotadora automatizada da Máquina de Tubos 04 (MT04), localizada no final da linha de tubos de uma indústria metalúrgica. A função do sistema é consolidar tubos em fardos padronizados, garantir a amarração por fita de aço, registrar o peso e disponibilizar o conjunto para retirada por ponte rolante e posterior estocagem. A fronteira do processo foi definida de forma a abranger as etapas diretamente relacionadas ao empacotamento e ao escoamento imediato do estoque, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Fronteiras do processo do empacotamento da MT04 e fluxo do final de linha.



Legenda das etapas e áreas identificadas

- | | | | |
|---|---|-------|--|
| ① | Truncadora - corte do tubo. | → | Setas azuis: fluxo físico dos tubos/fardos |
| ② | Saída do tubo da MT04 para a mesa da empacotadora. | - - - | Contorno tracejado: fronteira do processo |
| ③ | Mesa de correntes - deslocamento dos tubos até o robô. | — | Linha vermelha: proteção NR-12 |
| ④ | Robô de empacotamento - formação dos fardos. | | |
| ⑤ | Mesa de rolos - transporte dos fardos até a cintadeira. | | |
| ⑥ | Cintadeira - amarração/cintamento dos fardos. | | |
| ⑦ | Balança e área de escoamento do fluido refrigerante residual. | | |
| ⑧ | Mesa final - espera para movimentação pela ponte rolante. | | |
| ⑨ | Área de passagem e circulação do operador. | | |
| ⑩ | Estoque de tubos/fardos. | | |
| ⑪ | Proteções NR-12 - perímetro com portões intertravados e cortina de luz. | | |

Fonte: Adaptado de Aço Cearense (2026).

A delimitação do processo inicia-se na saída da MT04, no momento em que o tubo deixa a etapa produtiva anterior e passa a ser direcionado ao sistema de empacotamento e, a fronteira final, ocorre quando o fardo já se encontra formado. Portanto, a análise não contempla a fabricação completa do tubo nem as etapas posteriores de expedição, concentrando-se no impacto do empacotamento sobre o desempenho do final de linha. Essa delimitação é necessária para evitar atribuição indevida de perdas externas ao objeto estudado.

4.2 Descrição do empacotamento manual antes da automação

Antes da implantação da empacotadora automatizada, o empacotamento associado à MT04 era realizado de forma predominantemente manual. Após a etapa de corte na truncadora (equipamento responsável pela etapa de corte dos tubos), os tubos eram direcionados por deslizamento até a região de saída da linha, onde operadores realizavam a separação, o alinhamento e a organização conforme o padrão de fardo requerido.

Em seguida, o material seguia para a área de saída, onde os operadores realizavam manualmente a composição do fardo. A formação do fardo dependia da atuação direta dos operadores, que separavam, posicionavam e alinhavam manualmente os tubos conforme o layout de empacotamento. Essa atividade exigia movimentação contínua do material, atenção ao arranjo geométrico e ajustes sucessivos para manter a estabilidade do conjunto.

A cintagem também era realizada manualmente, por meio de pistola pneumática e fita metálica, que consiste em uma pistola pneumática acionada por ar comprimido, utilizada para tensionar e fixar a fita ao redor do fardo. Essa etapa exigia posicionamento manual, tensionamento e fechamento das cintas, o que aumentava a repetitividade e a exigência física da atividade. Após a formação e a cintagem, o fardo permanecia na área de saída até a atuação da ponte rolante: equipamento utilizado para elevação e transporte horizontal de materiais em ambiente industrial. Essa interface entre empacotamento manual e movimentação interna exigia sincronização entre os operadores de empacotamento, a disponibilidade da ponte rolante e a existência de espaço físico para retirada e armazenamento.

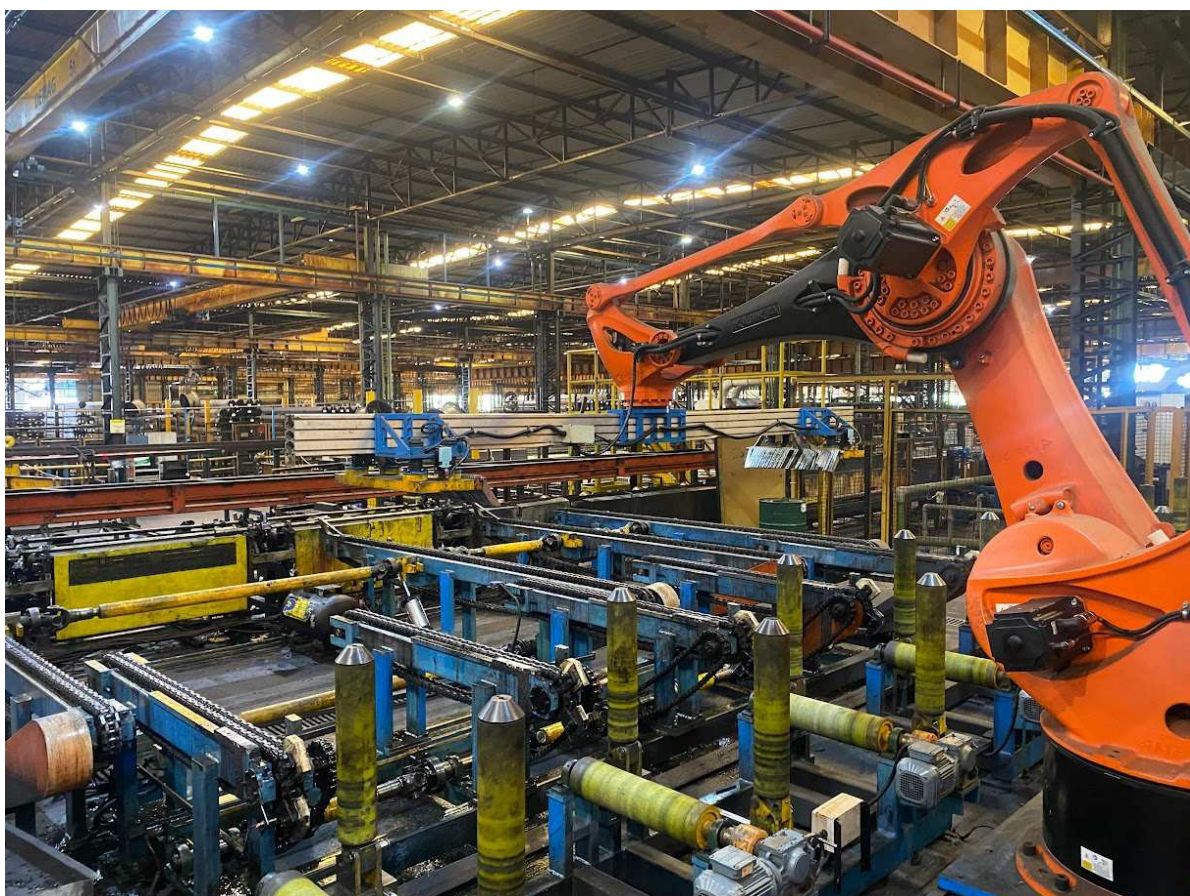
O estudo técnico realizado em 2022 indicou que a MT04 processava peças com massa média próxima de 14 a 15 kg em determinados produtos, superior à média observada em outras linhas. Essa característica aumentava a criticidade ergonômica do empacotamento manual, especialmente nas atividades de separação, posicionamento, alinhamento e cintagem dos tubos. O mesmo estudo registrou ocorrência de acidente por prensamento de dedo durante o posicionamento manual de tubos, dado utilizado neste trabalho como evidência histórica qualitativa do risco associado ao cenário anterior à automação.

4.3 Descrição operacional do empacotamento automatizado associado à MT04

Com a implantação da empacotadora automatizada, o processo passou a operar por meio de uma sequência integrada de equipamentos mecânicos, sistemas de transporte, célula robotizada e dispositivos automáticos de cintagem, pesagem e transferência. Essa configuração alterou a dinâmica operacional do final de linha, reduzindo a dependência de manuseio direto e transferindo parte significativa das atividades para monitoramento, supervisão e intervenção pontual. A célula robotizada utilizada na manipulação e organização dos tubos no empacotamento automatizado é apresentada na Figura 4.

O processo automatizado inicia-se com a transferência do tubo produzido para a mesa de esteiras. A mesa de esteiras é um sistema transportador responsável por conduzir os tubos da saída da MT04 até a célula robotizada. Na sequência, os tubos chegam à área de atuação do robô KUKA, onde ocorre a manipulação automatizada para formação das camadas do fardo.

Figura 4 - Célula robotizada utilizada na manipulação e organização dos tubos no empacotamento automatizado da MT04.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A quantidade de tubos, a geometria do fardo e a organização das camadas variam conforme a bitola do produto. A bitola corresponde à dimensão nominal do tubo e influencia diretamente o padrão de empilhamento. A partir dos parâmetros definidos, o robô organiza os tubos camada por camada, formando fardos com configuração quadrada, retangular ou hexagonal. Exemplos de fardos de tubos de seção quadrada e retangular e fardos de tubos circulares em formação hexagonal são apresentados na Figura 5.

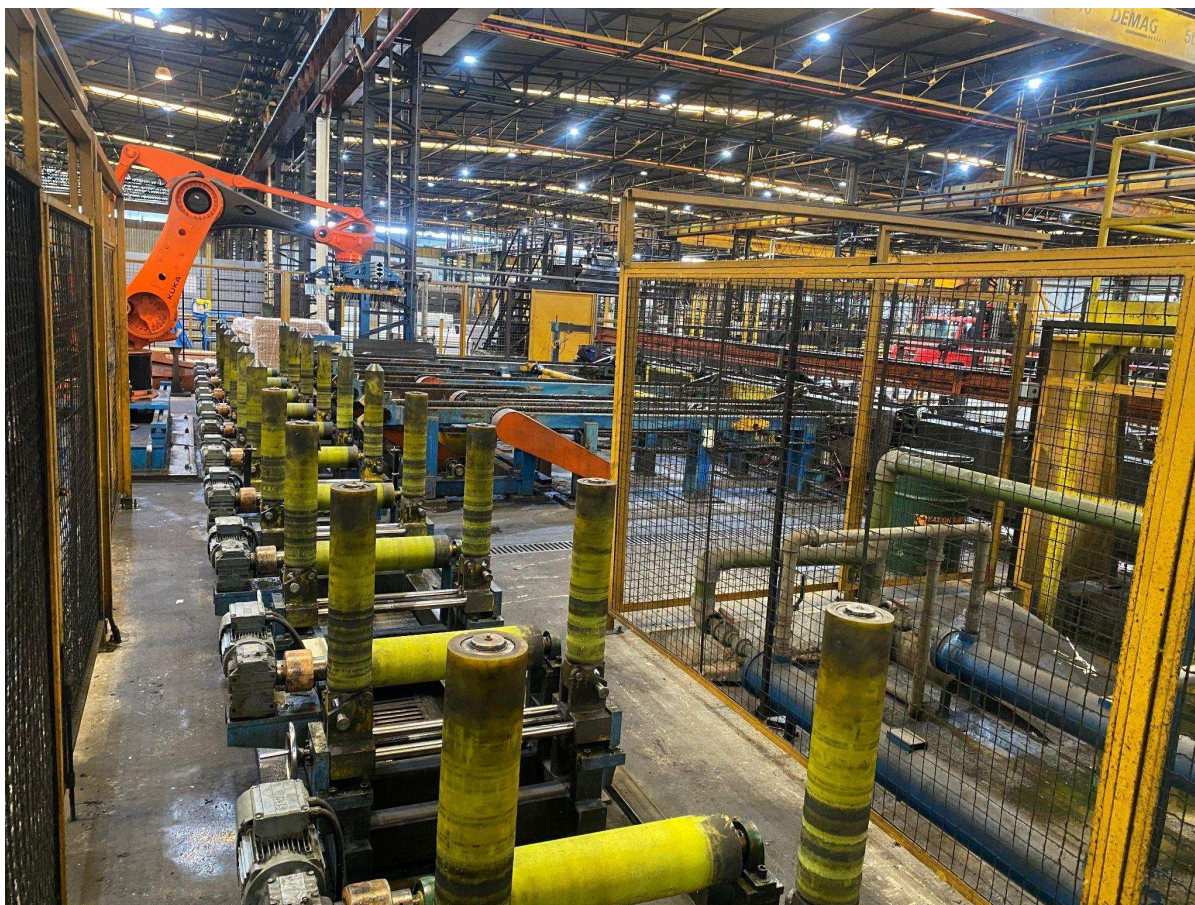
Figura 5 - Fardos de tubos de seção a) quadrada e retangular e b) formação hexagonal, processados no final de linha da MT04.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após completar a formação do fardo, o conjunto é deslocado para a mesa de rolos, sistema de transporte composto por roletes que permite a movimentação do fardo até a etapa seguinte. Os transportadores de rolos utilizados após a formação dos fardos pela célula robotizada são apresentados na Figura 6. Em seguida, o fardo é conduzido à cintadeira automática, que aplica fita de aço para garantir estabilidade estrutural durante a movimentação interna.

Figura 6 - Transportadores de rolos utilizados após a formação dos fardos pela célula robotizada.

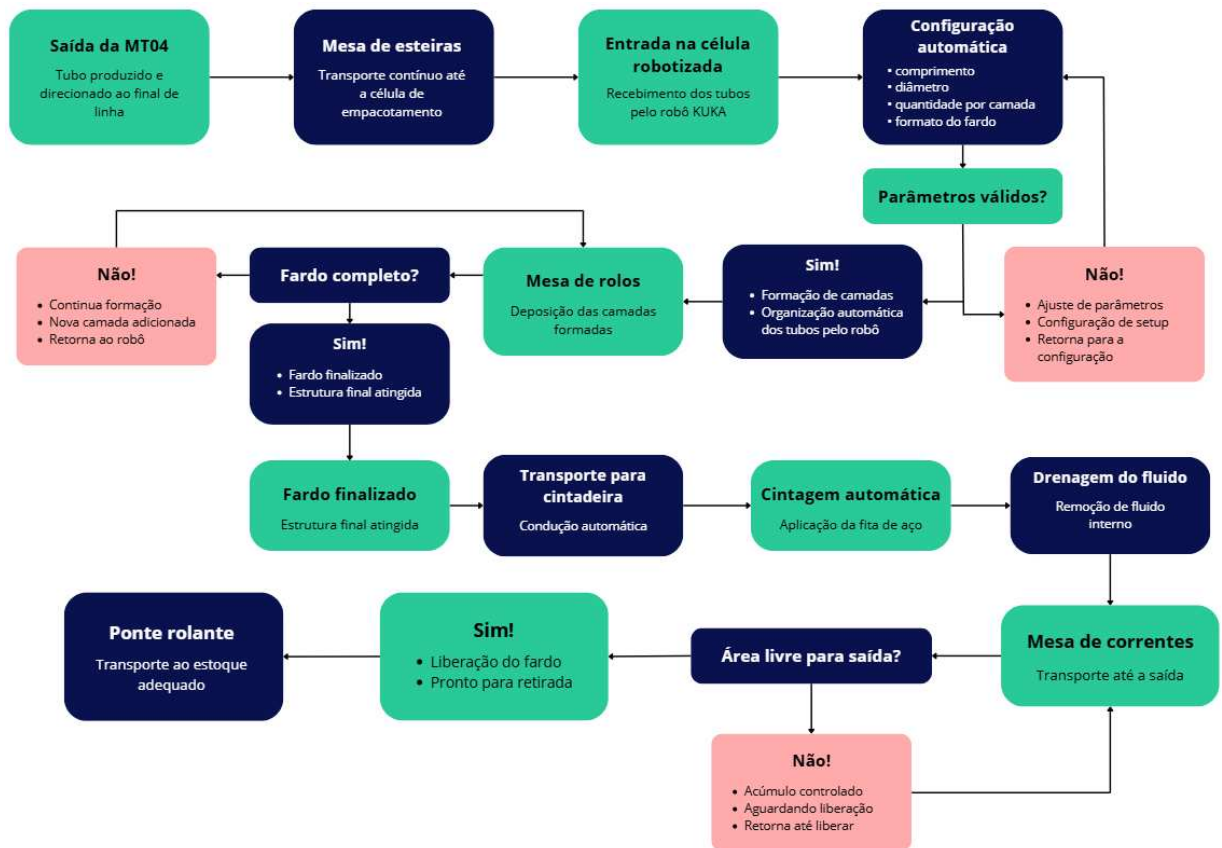


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Depois da cintagem, o fardo passa pela balança, onde ocorre o registro do peso, e pela etapa de drenagem de fluido refrigerante residual. O fluido refrigerante é utilizado em etapas anteriores do processo para resfriamento e lubrificação, podendo permanecer parcialmente no interior dos tubos. Por fim, o conjunto é conduzido por mesa de correntes até a posição final de retirada por ponte rolante.

A sequência operacional do empacotamento automatizado, com a identificação das principais etapas e equipamentos envolvidos no processo, é sintetizada na Figura 7. O fluxograma permite visualizar a integração entre saída da MT04, mesa de esteiras, célula robotizada, formação do fardo, mesa de rolos, cintagem, drenagem, mesa de correntes e retirada por ponte rolante..

Figura 7 - Sequência operacional do empacotamento automatizado associado à MT04 com identificação das etapas e principais equipamentos.

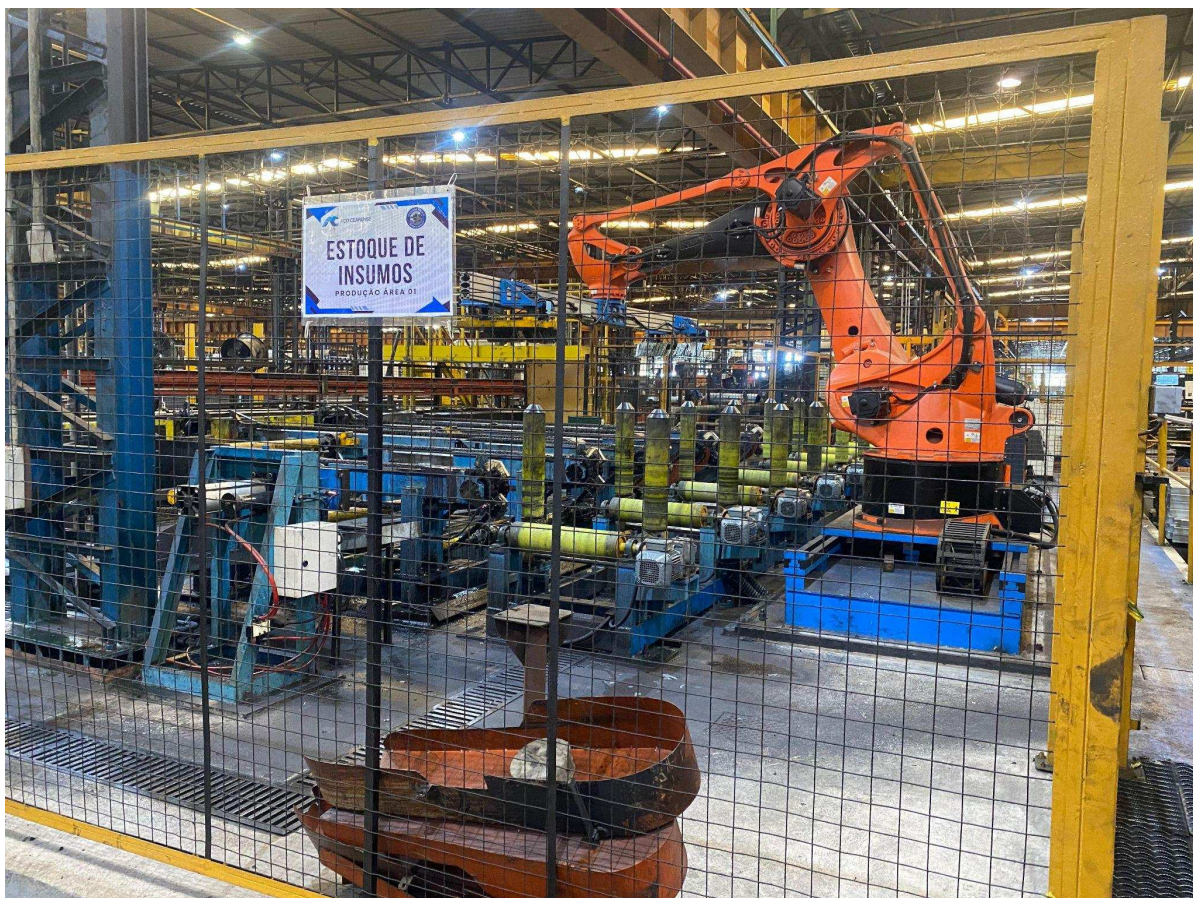


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4 Segurança operacional da célula automatizada

A célula robotizada da empacotadora possui proteções físicas, como grades, além de controle por Controlador Lógico Programável (CLP) e intertravamento. O CLP é o dispositivo responsável pela lógica de controle das operações automatizadas, recebendo sinais de sensores e comandando atuadores conforme a programação do sistema. O intertravamento, por sua vez, é um recurso de segurança que impede ou interrompe determinadas operações quando uma condição de segurança não é atendida, como abertura de acesso ou entrada indevida em zona de risco. As proteções físicas, a grade de segurança e a segregação da célula robotizada do empacotamento automatizado são apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Proteções físicas, grade de segurança e segregação da célula robotizada do empacotamento automatizado da MT04.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A presença desses recursos contribui para reduzir a exposição direta do operador ao ciclo automático, especialmente nas zonas de alcance do robô, nas mesas de transferência e nos pontos de movimentação do fardo. Entretanto, a existência da automação não elimina integralmente os riscos. Atividades de ajuste, limpeza, inspeção, manutenção e retomada após parada exigem procedimentos específicos e controle de acesso, pois podem envolver interação com equipamentos energizados, materiais em posição instável ou pontos de aprisionamento.

Dessa forma, a segurança da célula automatizada deve ser analisada como combinação entre projeto técnico, dispositivos de proteção e práticas operacionais. A automação reduz a exposição ao manuseio direto, mas exige maior rigor na gestão de intervenções.

4.5 Transição operacional: do empacotamento manual ao automatizado

A implantação da empacotadora automatizada ocorreu de forma gradual, com período de startup e estabilização operacional já definido metodologicamente nos capítulos anteriores.

No caso da MT04, o empacotamento permaneceu predominantemente manual entre janeiro e maio de 2025. Em maio, iniciou-se o startup da empacotadora automatizada, etapa marcada por testes, ajustes de parâmetros, correções iniciais e adaptação operacional.

Entre maio e junho, o processo operou em regime de transição, alternando momentos de operação manual e automatizada devido a ajustes e melhorias característicos da implantação de uma nova célula automatizada. A partir de meados de julho, o sistema passou a operar em condição mais estável, possibilitando análise mais representativa do desempenho do empacotamento automatizado.

Essa transição justifica a divisão analítica adotada no trabalho: jan.-jun./2025 representa a fase anterior à estabilização, enquanto jul.-nov./2025 representa a fase posterior à estabilização. Dessa forma, a comparação entre os períodos permite avaliar o comportamento dos indicadores antes e depois da consolidação operacional do sistema automatizado.

4.6 Quadro comparativo entre empacotamento manual e automatizado

Para sintetizar as principais diferenças entre os cenários analisados, o quadro 1 apresenta uma comparação qualitativa entre o empacotamento manual e o empacotamento automatizado associado à MT04. Essa comparação permite visualizar as alterações operacionais, ergonômicas, de segurança e de fluxo decorrentes da implantação da empacotadora.

Quadro 1 - Comparação entre empacotamento manual e automatizado na MT04.

Aspecto analisado	Empacotamento manual	Empacotamento automatizado
Formação do fardo	Realizada manualmente por operadores, com separação, alinhamento e posicionamento dos tubos conforme layout..	Realizada por célula robotizada, com empilhamento camada por camada conforme parametrização do sistema.
Padrão geométrico	Dependente da organização manual e da experiência dos operadores.	Definido por parâmetros de processo, podendo ser quadrado ou hexagonal conforme a bitola do tubo.
Cintagem	Manual, com pistola pneumática e fita metálica.	Automática, com aplicação de fita de aço pela cintadeira.

Exigência física	Elevada, devido ao manuseio direto, posicionamento e ajuste dos tubos.	Reduzida, com atuação voltada a supervisão, monitoramento e intervenções pontuais.
Repetitividade	Alta, principalmente na separação, alinhamento e cintagem.	Menor no ciclo normal de operação, pois as etapas repetitivas são mecanizadas.
Segurança	Maior exposição ao contato direto com tubos, ferramentas pneumáticas e risco de prensamento.	Menor exposição direta durante o ciclo automático, com célula segregada, CLP e intertravamento.
Dependência operacional	Dependência de sincronização entre operadores, ponte rolante e disponibilidade de área.	Fluxo mais padronizado até a posição final de retirada por ponte rolante,
Variabilidade do processo	Maior, devido à atuação manual e às diferenças de ritmo entre operadores.	Menor após estabilização, em função da repetibilidade do sistema automatizado.
Interface logística	Maior probabilidade de acúmulo na saída quando há atraso na retirada ou falta de espaço.	Maior previsibilidade de formação e liberação do fardo, desde que o escoamento esteja disponível.

Fonte: Adaptado de Aço Cearense (2022).

4.7 Critérios de comparação e organização das análises

Os critérios de comparação foram definidos para avaliar o comportamento do empacotamento da MT04 antes e depois da estabilização do sistema automatizado. A comparação não se limita à diferença entre dois intervalos de tempo; ela considera a mudança estrutural do processo, a alteração do modo de operação e seus reflexos sobre o final de linha. Entretanto, os resultados são interpretados com cautela, pois a produção e os indicadores também podem ser influenciados por fatores externos à empacotadora, como demanda, mix de produtos, calendário produtivo e disponibilidade logística.

O primeiro critério é a produtividade, analisada por meio da produção consolidada no período. A produção permite avaliar se a estabilização da empacotadora contribuiu para maior capacidade efetiva de entrega do processo. Entretanto, a produção isolada não explica a origem dos ganhos ou perdas; por isso, é interpretada em conjunto com interrupções e OEE.

O segundo critério é o tempo de interrupções. As interrupções representam perdas de tempo operacional e impactam diretamente a disponibilidade do sistema. No contexto do empacotamento, essas perdas podem estar relacionadas à saturação da área, falta de espaço para escoamento, necessidade de intervenção no fardo, ajustes de processo ou indisponibilidade de fluxo logístico. Assim, a redução de interrupções é interpretada como evidência de maior estabilidade operacional.

O terceiro critério é o OEE e seus componentes. O OEE permite avaliar o desempenho global do equipamento a partir da combinação entre Disponibilidade, Performance e Qualidade. Neste trabalho, os valores de OEE e seus componentes são utilizados conforme registrados nas bases internas, sem recálculo pelo autor. A análise concentra-se na interpretação da evolução dos indicadores e em sua relação com a estabilização do empacotamento.

O quarto critério refere-se à segurança e ergonomia. A comparação entre os cenários manual e automatizado considera a redução do contato direto com o material, a diminuição de atividades repetitivas, a eliminação da cintagem manual e a presença de proteções na célula robotizada. Esses elementos são analisados qualitativamente com base no estudo técnico de 2022 e nas características operacionais do sistema implantado.

O quinto critério é a logística interna. Como o empacotamento define a forma de liberação do produto para ponte rolante e estoque, sua estabilidade influencia a organização do fluxo, a ocupação da área e a previsibilidade da retirada dos fardos. Assim, a análise considera o empacotamento como interface entre produção e armazenamento, e não apenas como etapa final isolada.

Além da comparação global das interrupções, o estudo adota uma comparação específica das interrupções filtradas relacionadas ao final de linha. Essa diferenciação é necessária porque a base geral de paradas pode incluir eventos de diferentes naturezas, nem todos diretamente associados à empacotadora. Assim, os resultados são organizados em duas camadas: a primeira avalia a evolução macro do desempenho operacional da MT04; a segunda aprofunda as perdas mais próximas do empacotamento, da mesa de saída e do escoamento imediato.

4.8 Projeções do estudo técnico de 2022

O estudo técnico de 2022 estabeleceu premissas quantitativas para justificar a implantação da empacotadora. Foram estimados ganhos de disponibilidade equivalentes a

2.724 min/ano, aumento de capacidade produtiva de 600 t/ano, ganho de eficiência de 3.204 t/ano, redução de 9 operadores e disponibilização adicional de 3.804 t/ano para venda, com ganho financeiro estimado de R\$ 2.984.100,00/ano (dados internos do estudo de caso). Esses valores não são recalculados neste TCC; são utilizados como referência de expectativa técnica para avaliar se os resultados observados em 2025 seguem a direção prevista, respeitando as diferenças entre projeções anuais, dados parciais do ano e período de estabilização operacional.

Quadro 2 - Síntese das projeções quantitativas do estudo técnico de 2022

Projeção do estudo técnico (2022)	Valor estimado
Ganho de disponibilidade	2.724 min/ano
Incremento de capacidade por disponibilidade	600 t/ano
Ganho por melhoria de eficiência	3.204 t/ano
Redução de efetivo operacional	9 pessoas
Economia operacional estimada	R\$ 262.440,00/ano
Produto adicional disponível para venda	3.804 t/ano
Ganho financeiro estimado	R\$ 2.984.100,00/ano

Fonte: Adaptado de Aço Cearense (2022).

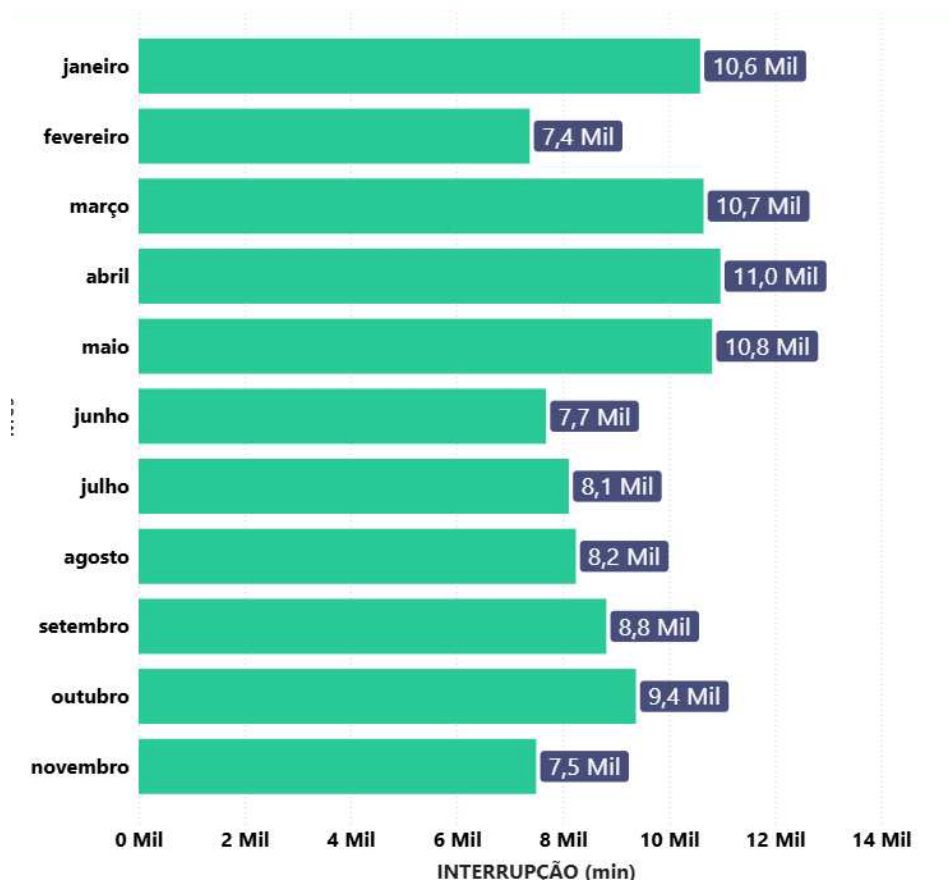
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Interrupções: comportamento mensal no recorte jan–nov/2025

As interrupções representam uma variável relevante de perda temporal no estudo, pois reduzem o tempo efetivo disponível para operação e evidenciam instabilidades no fluxo produtivo. Nesta seção, são analisadas as interrupções gerais registradas na base operacional da MT04 no recorte jan.-nov./2025. Esses registros não devem ser interpretados como perdas exclusivamente causadas pela empacotadora automatizada, pois podem envolver diferentes fatores da linha e do contexto operacional. Entretanto, sua análise é importante porque permite avaliar o comportamento global das perdas temporais antes e depois da estabilização do empacotamento automatizado.

A figura 9 apresenta as interrupções mensais registradas no recorte jan.-nov./2025, em minutos e em horas. No total, foram registrados 100.122 min de interrupções, equivalentes a 1.668,70 h (dados internos do estudo de caso).

Figura 9 - Interrupções totais por mês no recorte jan–nov/2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

A utilização das interrupções gerais como indicador macro permite verificar se houve melhora no comportamento operacional da MT04 no período pós-estabilização. No entanto, essa análise não é suficiente para atribuir as perdas diretamente à empacotadora, uma vez que a base geral pode conter eventos de diferentes naturezas. Por esse motivo, a seção 5.3 apresenta uma análise complementar por Pareto, considerando apenas registros filtrados com maior interface com o final de linha, a mesa de saída, o escoamento do material e o empacotamento.

A magnitude do tempo acumulado indica que as interrupções constituem variável central para compreender o desempenho do empacotamento. Em processos de final de linha, a interrupção não representa apenas uma parada pontual, mas um sintoma de instabilidade do fluxo. Quando o material não é absorvido adequadamente pelas etapas de transporte, formação do fardo, cintagem, pesagem, drenagem ou retirada para estoque, o sistema tende a acumular produto, demandar intervenção operacional e reduzir sua capacidade efetiva.

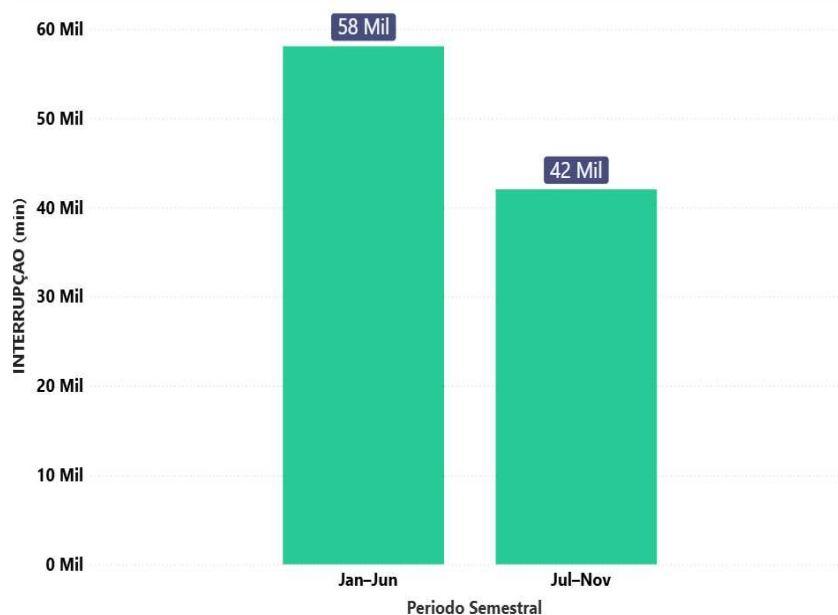
5.2 Comparação por períodos: interrupções (jan–jun vs jul–nov) e efeito da estabilização

A comparação entre os períodos jan.–jun./2025 e jul.–nov./2025 permite analisar o comportamento das perdas por interrupção antes e depois da estabilização operacional da empacotadora automatizada. Conforme apresentado na Figura 10, observa-se redução no volume total de interrupções no período posterior à estabilização, indicando melhora no comportamento operacional da MT04.

A análise por períodos evidencia que, após a fase de startup e estabilização da empacotadora automatizada, houve diminuição das interrupções gerais registradas na linha. Esse comportamento sugere maior estabilidade operacional no período jul.–nov./2025, especialmente quando observado em conjunto com a evolução dos demais indicadores analisados, como OEE, Disponibilidade, Performance/Eficiência e produção.

Para fortalecer a interpretação dos resultados, a análise das interrupções gerais é complementada pelo Pareto filtrado das perdas com maior relação com o final de linha. Essa estratégia permite separar a leitura global do desempenho da MT04 da análise específica das perdas mais aderentes ao empacotamento, evitando atribuição direta de causalidade a todas as interrupções registradas. Assim, a redução das interrupções gerais, quando analisada em conjunto com os demais indicadores, mostra-se compatível com a melhoria do desempenho operacional após a automação e estabilização do final de linha.

Figura 10 - Comparação das interrupções entre os períodos jan.-jun./2025 e jul.-nov./2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

Em termos produtivos, a redução das interrupções tende a favorecer o aumento da disponibilidade do sistema, pois amplia o tempo efetivo em que o processo permanece apto a operar. Essa relação é particularmente relevante no empacotamento da MT04, uma vez que o final de linha depende da continuidade entre transporte, formação do fardo, cintagem, pesagem, drenagem e retirada para estoque.

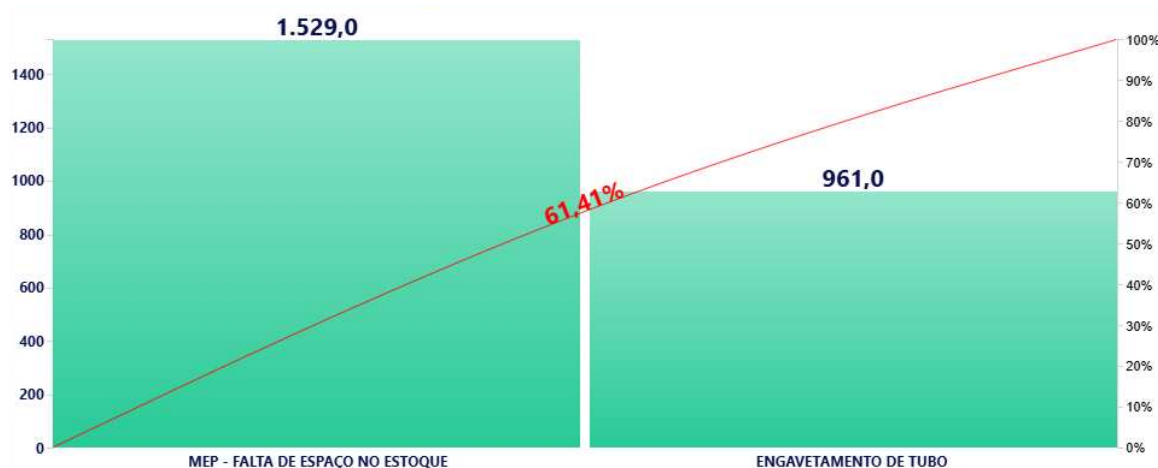
5.3 Análise das interrupções filtradas relacionadas ao final de linha por Pareto

A análise de Pareto foi utilizada como ferramenta complementar para priorização das perdas mais representativas dentro de um conjunto filtrado de interrupções com maior interface operacional com o final de linha da MT04. Diferentemente das análises anteriores, que consideraram as interrupções gerais registradas na base operacional, o Pareto foi construído a partir de sintomas selecionados por sua relação com a mesa de saída, o escoamento do material, a empacotadora e o processo de enfardamento.

Essa separação permite diferenciar a leitura global das interrupções da MT04 da análise específica das perdas mais aderentes ao empacotamento automatizado e ao final de linha. Assim, as interrupções gerais indicam o comportamento global do desempenho operacional, enquanto o Pareto filtrado aprofunda a análise das ocorrências mais relacionadas ao objeto específico do estudo.

No período jan.–jun./2025, o Pareto filtrado apresentou concentração das perdas em duas categorias principais, associadas à falta de espaço no estoque e ao engavetamento de tubo, conforme apresentado na Figura 11. Esse comportamento indica que, no primeiro período, as perdas filtradas estavam mais relacionadas a restrições de escoamento e instabilidades físicas no fluxo dos tubos no final de linha.

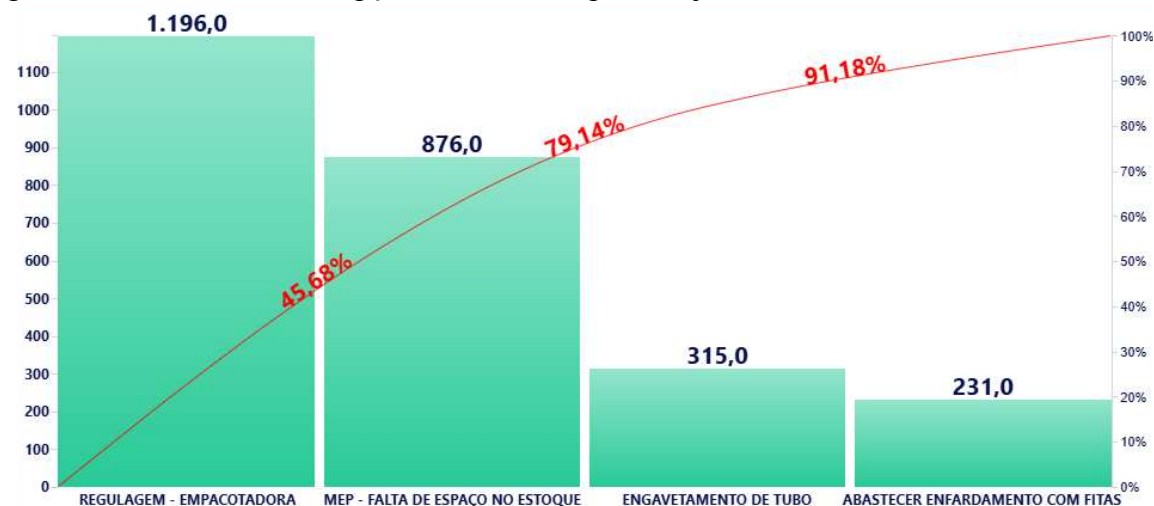
Figura 11 - Pareto das interrupções filtradas no período jan.-jun./2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

Após a estabilização operacional, o Pareto filtrado do período jul.–nov./2025 apresentou mudança no perfil das perdas, conforme apresentado na Figura 12. Nesse período, a principal ocorrência passou a estar relacionada à regulação da empacotadora, falta de espaço no estoque, engavetamento de tubo e abastecimento do enfardamento com fitas.

Figura 12 - Pareto das interrupções filtradas no período jul.-nov./2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

Para sintetizar a comparação entre os períodos, a Tabela 1 apresenta os principais valores do Pareto filtrado.

Tabela 1 - Comparação das interrupções filtradas relacionadas ao final de linha entre jan.-jun./2025 e jul.-nov./2025.

Categoria	Jan.-jun.	Jul.-nov.	Interpretação
MEP - Falta de espaço no estoque	1.529	876	Redução da perda associada ao escoamento e disponibilidade de área
Engavetamento de tubo	961	315	Redução da instabilidade física no fluxo dos tubos
Regulagem da empacotadora	-	1.196	Perda associada à operação, ajustes e maturação do sistema automatizado
Abastecimento com fitas	-	231	Perda associada ao suporte operacional do processo de enfardamento
TOTAL FILTRADO	2.490	2.618	Aumento do total filtrado, com mudança no perfil das perdas

Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

A comparação entre as Figuras 12 e 13 evidencia que o período posterior à estabilização não deve ser interpretado apenas pela variação do volume total de interrupções filtradas, mas também pela mudança no tipo de perda predominante. Enquanto no primeiro período as ocorrências estavam mais concentradas em restrições de escoamento e acúmulo físico no final de linha, no segundo período surgiram perdas mais associadas à operação, ajuste e abastecimento do sistema automatizado.

Dessa forma, o Pareto filtrado contribui para complementar a análise das interrupções gerais, pois permite identificar quais perdas possuem maior relação técnica com o empacotamento e com o final de linha. Essa leitura reduz o risco de atribuir todas as interrupções da MT04 diretamente à empacotadora automatizada e permite uma interpretação mais coerente sobre os efeitos da estabilização operacional.

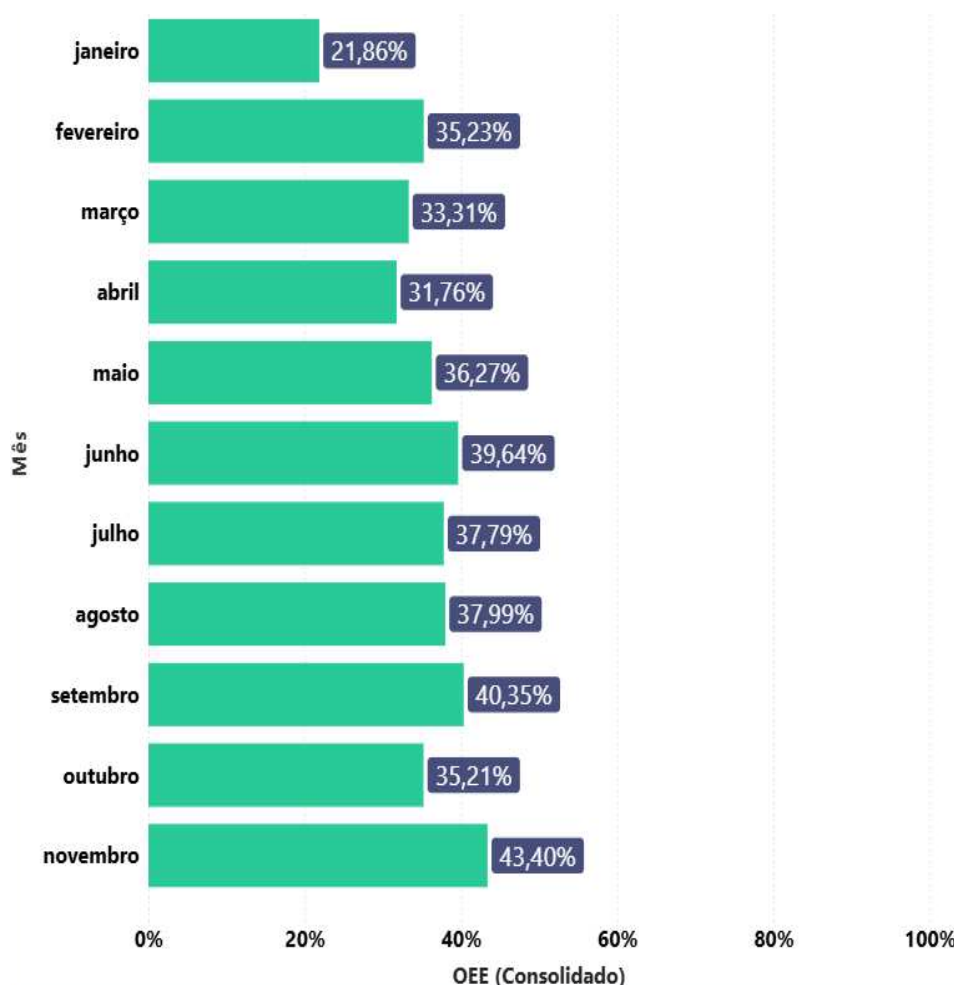
Assim, a automação deve ser interpretada como fator associado à reorganização e estabilização progressiva do final de linha, e não como elemento isolado responsável por todas as melhorias observadas. Os resultados reforçam que o desempenho da MT04 depende da integração entre empacotamento, escoamento, retirada dos fardos, disponibilidade de área, abastecimento de insumos e estabilidade operacional da empacotadora.

5.4 Evolução do OEE e de seus componentes

O OEE é utilizado neste estudo como indicador global de eficiência do empacotamento, integrando Disponibilidade, Performance e Qualidade. A análise desse indicador permite compreender se a evolução está associada à redução de paradas, à melhoria do ritmo operacional ou à estabilidade da qualidade registrada no sistema interno.

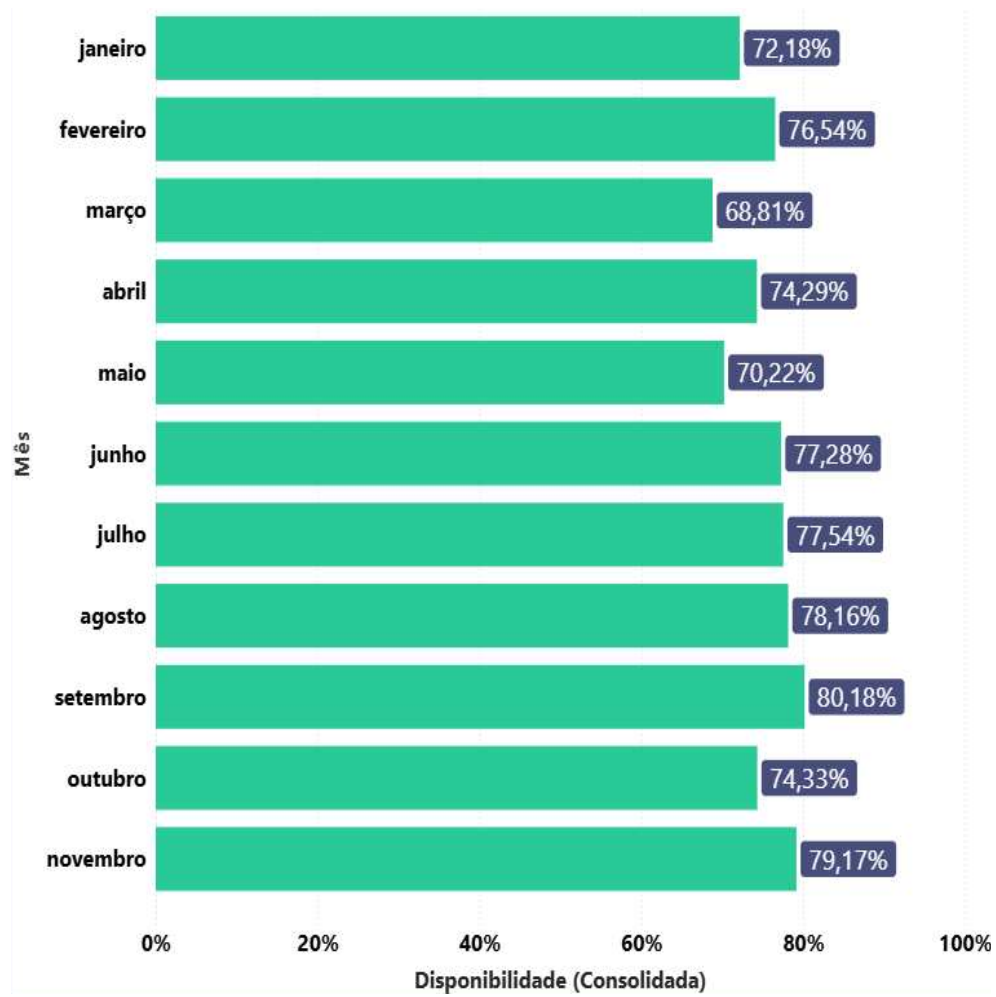
Na comparação por períodos (Figuras 13 a 16), o OEE consolidado evoluiu de 33,62% em jan.-jun./2025 para 39,21% em jul.-nov./2025, representando ganho de 5,59 pontos percentuais. A Disponibilidade aumentou de 73,13% para 77,84%, indicando redução relativa das perdas por paradas e maior tempo efetivo de operação. A Performance evoluiu de 61,00% para 67,08%, demonstrando melhora no ritmo operacional do sistema. A Qualidade permaneceu praticamente estável, passando de 75,38% para 75,10%, o que indica que o ganho de OEE foi explicado principalmente por Disponibilidade e Performance, e não por alteração significativa na Qualidade.

Figura 13 - OEE consolidado por mês no recorte jan–nov/2025.



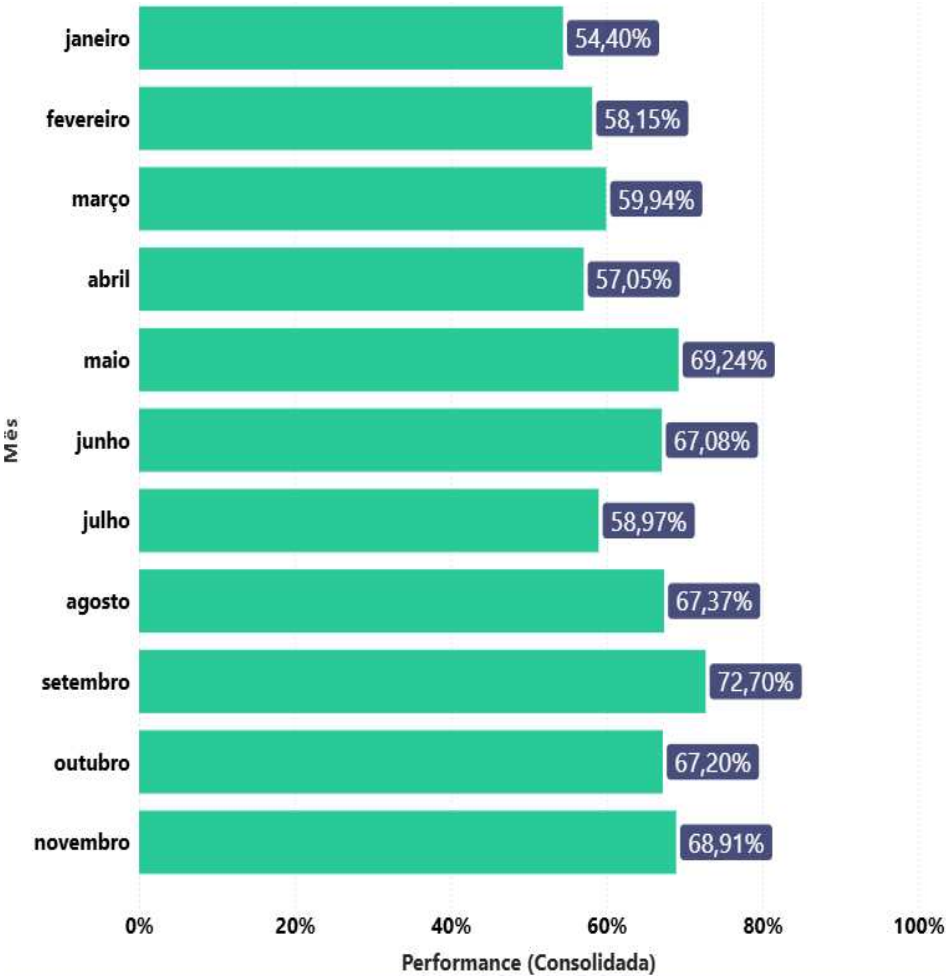
Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

Figura 14 - Componentes do OEE (Disponibilidade) por mês no recorte jan–nov/2025.



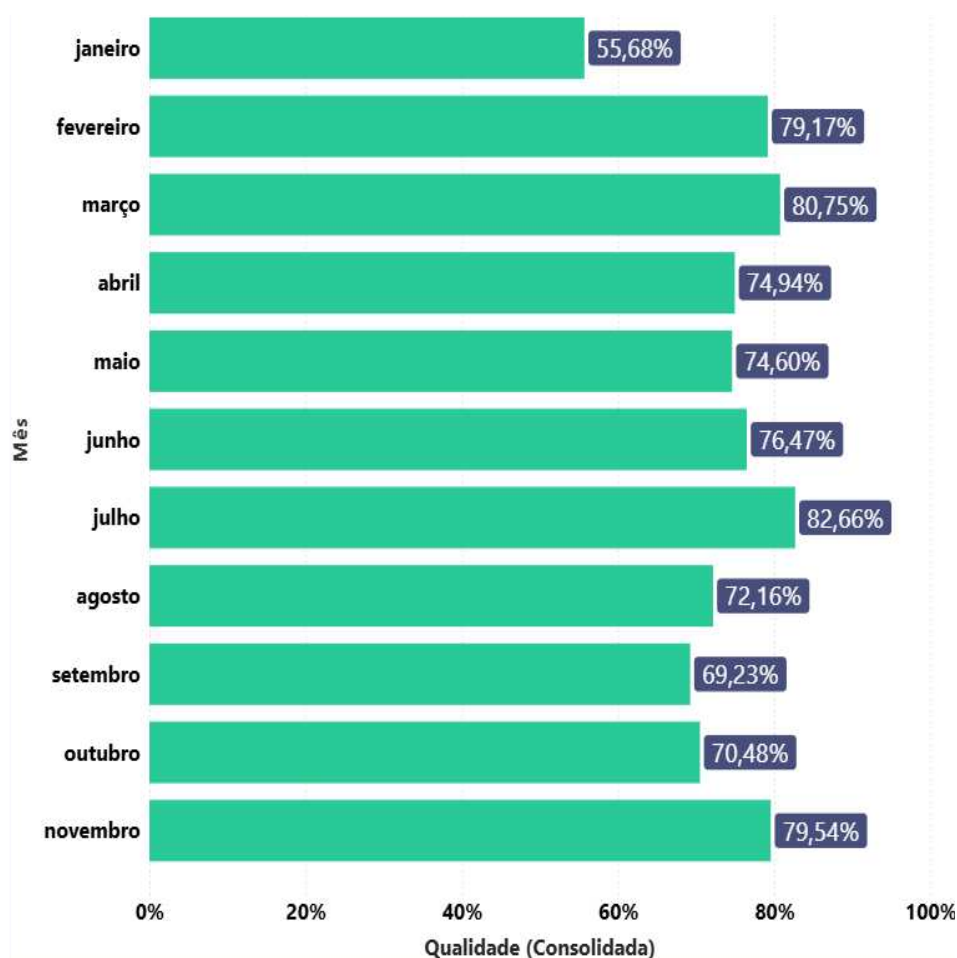
Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

Figura 15 - Componentes do OEE (Performance) por mês no recorte jan–nov/2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

Figura 16 - Componentes do OEE (Qualidade) por mês no recorte jan–nov/2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

Tabela 2 - Indicadores consolidados por período e variação observada.

Indicador	Jan.-Jun./2025	Jul.-Nov./2025	Variação
OEE	33,62%	39,21%	+5,59 p.p.
Disponibilidade	73,13%	77,84%	+4,71 p.p.
Performance/Eficiência	61,00%	67,08%	+6,08 p.p.
Qualidade	75,38%	75,10%	-0,28 p.p.
Interrupções totais	967,97 h	700,73 h	-267,24 h
Produção	24,2 mil t	31,8 mil t	+7,6 mil t (+31,4%)

Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

A interpretação conjunta dos dados indica que o ganho de OEE no período pós-estabilização está relacionado principalmente à redução de perdas por interrupção e à

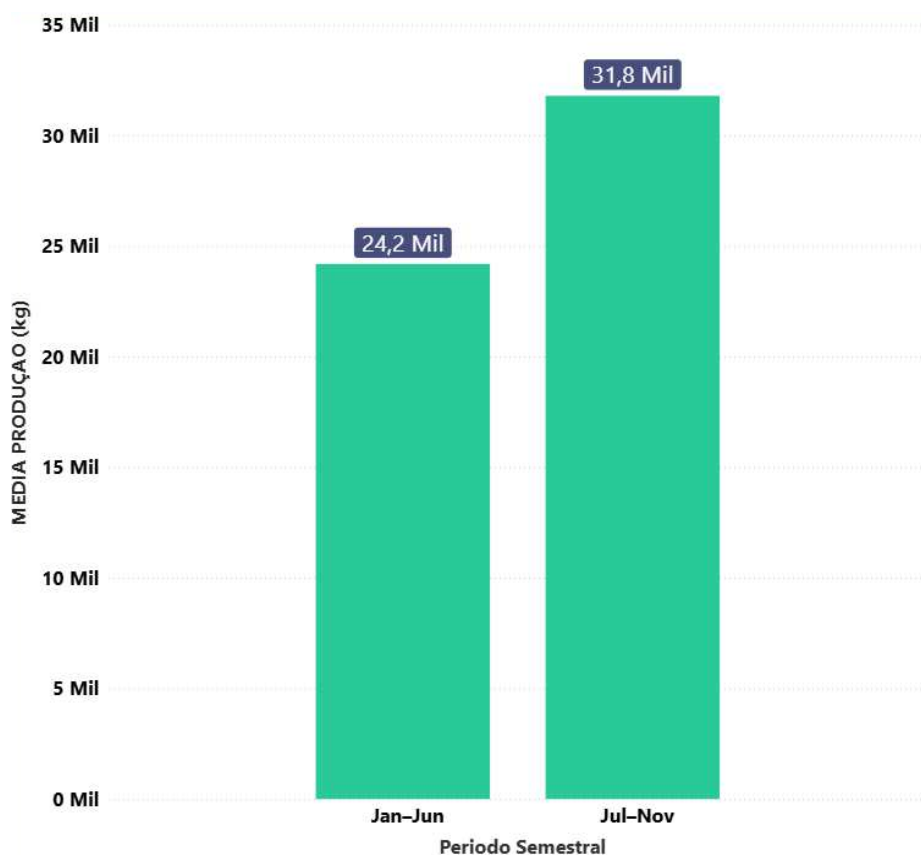
maior regularidade do ciclo do empacotamento. O aumento da Disponibilidade é coerente com a redução média das interrupções, enquanto a evolução da Performance sugere melhor aproveitamento do ritmo operacional, possivelmente associado à redução de intervenções, melhor parametrização do robô e maior sincronismo entre transporte, formação do fardo, cintagem, pesagem, drenagem e saída. A Qualidade permaneceu praticamente estável, o que indica que o ganho global do OEE não foi explicado por alteração relevante nesse componente, mas sobretudo por Disponibilidade e Performance.

A relação entre OEE e interrupções deve ser interpretada em dois níveis. No nível macro, a redução das interrupções gerais contribui para explicar a melhora da Disponibilidade e a maior regularidade operacional observada no período jul.-nov./2025. No nível específico, o Pareto filtrado evidencia que parte das perdas com maior aderência ao objeto do estudo está relacionada ao final de linha. Assim, a evolução do OEE não é atribuída exclusivamente à empacotadora, mas é compatível com a estabilização do sistema automatizado e com a melhoria do fluxo de empacotamento e escoamento.

5.5 Análise da produção consolidada por período

A produção consolidada por período permite avaliar como o período pós-estabilização se relacionou com a capacidade efetiva de entrega do processo (Figura 17). No período jan.-jun./2025, a produção consolidada foi de aproximadamente 24,2 mil toneladas. No período jul.-nov./2025, a produção atingiu aproximadamente 31,8 mil toneladas, representando aumento absoluto de 7,6 mil toneladas e crescimento de aproximadamente 31,4% (dados internos do estudo de caso).

Figura 17 - Produção mensal no recorte jan-jun e jul-nov/2025.

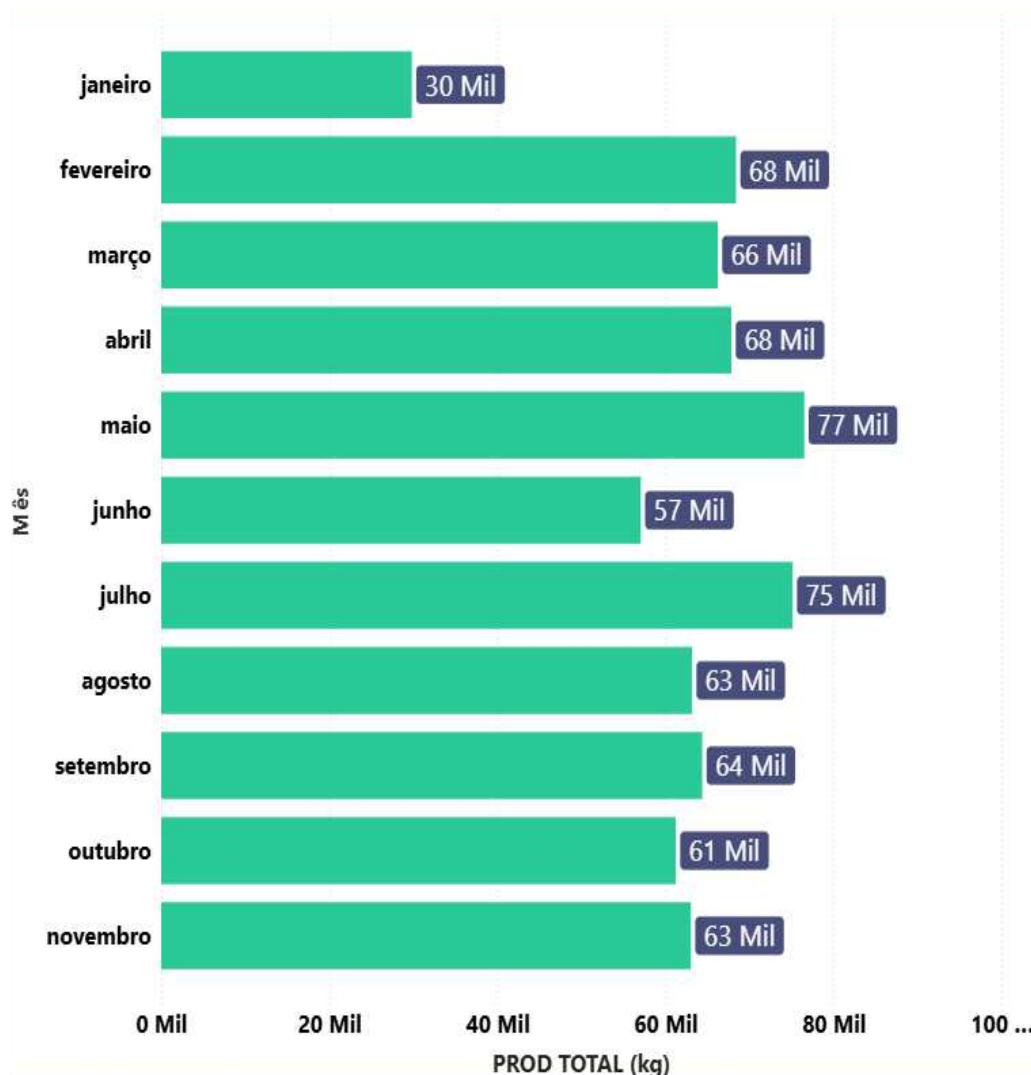


Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

A análise torna-se ainda mais relevante quando se considera que o período jan.-jun. possui seis meses, enquanto jul.-nov. possui cinco meses. A média mensal de produção no primeiro período foi de aproximadamente 4,03 mil t/mês, enquanto no segundo período atingiu aproximadamente 6,36 mil t/mês (Figura 18). Isso representa crescimento aproximado de 57,7% na produção média mensal após a estabilização do empacotamento automatizado.

Esse comportamento reforça a interpretação de que o período pós-estabilização apresentou maior capacidade efetiva de entrega do processo. Assim, a leitura mais adequada é que o aumento de produção observado é compatível com a redução de interrupções, o aumento da disponibilidade, a melhora da performance e a maior regularidade do fluxo de final de linha após a estabilização da automação.

Figura 18 - Produção mensal no recorte jan–nov/2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (Aço Cearense, 2026).

O aumento da produção também deve ser interpretado com cautela. Embora o período pós-estabilização apresente maior volume consolidado e maior média mensal, esse resultado pode ser influenciado por variáveis externas à empacotadora, como demanda, mix de produtos, calendário produtivo e disponibilidade de recursos. Ainda assim, quando analisado em conjunto com a redução das interrupções gerais, a melhora do OEE, o aumento da Disponibilidade e da Performance e a mudança no perfil das perdas filtradas relacionadas ao final de linha, o crescimento da produção torna-se coerente com a hipótese de maior estabilidade operacional após a estabilização da automação.

5.6 Avaliação das projeções do estudo técnico de 2022

O estudo técnico de 2022 projetou ganhos operacionais e econômicos associados à implantação da empacotadora automatizada. Entre os ganhos previstos estavam: aumento de disponibilidade de 2.724 min/ano, acréscimo de 600 t/ano de capacidade produtiva, aumento de eficiência com potencial de 3.204 t/ano, redução de 9 pessoas no quadro operacional, economia estimada de R\$ 262.440,00/ano e disponibilização adicional de 3.804 t/ano para venda, com ganho financeiro estimado de R\$ 2.984.100,00/ano.

Para avaliar se o projeto apresenta comportamento compatível com essas projeções, os resultados reais de 2025 foram comparados de forma qualitativa e quantitativa, respeitando as limitações do recorte jan.-nov. e o fato de que o período analisado inclui fase de startup e estabilização. Portanto, os valores projetados no estudo técnico não são tratados como metas integralmente validadas, mas como referência de análise.

Quadro 3 - Relação entre projeções do estudo técnico e resultados observados.

Indicador	Projeção do estudo técnico	Evidência observada em 2025	Interpretação
Aumento de disponibilidade	2.724 min/ano	Redução de interrupções médias mensais no período de jul-nov, em relação a jan-jun.	Tendência compatível com maior disponibilidade após estabilização.
Acréscimo de capacidade por disponibilidade	600 t/ano	Produção consolidada aumentou de 24,2 mil t para 31,8 mil t entre os períodos analisados.	Indica aumento de capacidade efetiva no pós-estabilização.
Ganho por eficiência operacional	3.204 t/ano	Performance evoluiu de 61,00% para 67,08%.	Tendência compatível com melhoria do ritmo operacional.
Redução de quadro operacional	9 pessoas	Redução de 9 pessoas no quadro operacional por turno de trabalho	Evidência favorável.
Disponibilização adicional para venda	3.804 t/ano	Aumento de 7,6 mil ton. na produção consolidada entre os períodos.	Indica direção favorável, porém deve ser analisado em ciclo anual completo.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados internos do estudo de caso (2022; 2025).

Os resultados observados indicam tendência favorável em relação às projeções operacionais do estudo técnico, especialmente no que se refere à redução de interrupções, ao aumento da produção e à melhoria de OEE, Disponibilidade e Performance. Entretanto, a validação integral das projeções não foi realizada por envolver dados financeiros sensíveis da empresa, como custos reais, margens, receitas, composição detalhada do efetivo e critérios completos de cálculo econômico. Além disso, as projeções do estudo técnico possuem horizonte anual, enquanto a presente análise considera jan.-nov./2025 e inclui período de startup e estabilização.

Esse ganho produtivo é coerente com a redução de interrupções e com a melhoria dos componentes do OEE. Em termos de Engenharia de Produção e Engenharia Mecânica aplicada à produção, a automação não gera ganho apenas por substituir esforço humano; ela tende a aumentar a capacidade efetiva quando reduz perdas de disponibilidade, melhora o ritmo do processo, padroniza operações repetitivas e estabiliza o escoamento do final de linha. Assim, o aumento de produção observado está alinhado com a função esperada da empacotadora automatizada, embora sua confirmação plena exija acompanhamento em ciclo anual completo e maior controle sobre variáveis externas.

A comparação com o estudo técnico de 2022 deve ser interpretada como verificação de tendência operacional, e não como validação integral das projeções. A redução das perdas antigas de escoamento e engavetamento observada no Pareto filtrado reforça parcialmente a expectativa de melhoria do final de linha após a automação. Entretanto, o surgimento de perdas associadas à regulação da empacotadora e ao abastecimento de fitas indica que a estabilização do sistema automatizado exige ajustes operacionais contínuos. Dessa forma, os resultados observados em 2025 seguem a direção esperada de melhoria, mas também evidenciam novos pontos de controle para consolidação dos ganhos.

5.7 Segurança e ergonomia: comparação entre os cenários manual e automatizado

A análise de segurança e ergonomia deve considerar que o processo manual anterior à automação apresentava maior contato direto entre operadores e material. Os tubos provenientes da truncadora eram recebidos manualmente, separados conforme o layout do fardo, alinhados em camadas e cintados com pistola pneumática e fita metálica. Essa configuração exigia esforço físico, repetitividade e exposição a riscos de aprisionamento, sobretudo durante o posicionamento dos tubos e a formação dos fardos.

O estudo técnico de 2022 registrou ocorrência de acidente por prensamento de dedo durante a atividade de acomodação manual dos tubos no fardo. Esse dado é utilizado neste

trabalho como evidência qualitativa do cenário anterior à automação, demonstrando que a manipulação direta do material apresentava risco real de acidente. Além disso, o estudo técnico indicou que os tubos processados na MT04 apresentavam massa entre 14 a 15 kg por peça em determinados períodos, o que eleva a exigência física do empacotamento manual.

Com a implantação da empacotadora automatizada, as atividades de formação do fardo e cintagem passaram a ser executadas por sistemas mecanizados e robotizados. A cintagem automática com fita de aço reduziu a necessidade de aplicação manual de força para tensionamento e fechamento das cintas. Além disso, a célula robotizada com grade, CLP e intertravamento reduziu a exposição direta do operador ao ciclo automático.

Do ponto de vista ergonômico, a principal contribuição da automação está na redução do manuseio direto e repetitivo dos tubos. Do ponto de vista da segurança, a contribuição está na diminuição da exposição a pontos de aprisionamento durante a formação do fardo e no controle de acesso à área robotizada. No entanto, a automação não elimina todos os riscos: atividades de inspeção, ajustes, limpeza, manutenção e retomada de processo ainda exigem procedimentos seguros, bloqueio adequado e treinamento operacional.

Assim, a transição do empacotamento manual para o automatizado deve ser interpretada como mitigação de riscos, e não como eliminação absoluta das exposições. Essa diferenciação é importante para manter rigor técnico e coerência com os princípios de segurança de máquinas e ergonomia aplicada. O estudo não realiza uma análise ergonômica formal nem uma auditoria de conformidade normativa da célula, mas discute evidências operacionais que indicam redução do manuseio direto, da repetitividade e da exposição a pontos de aprisionamento durante o ciclo normal de operação.

5.8 Logística interna e restrição de escoamento no final de linha

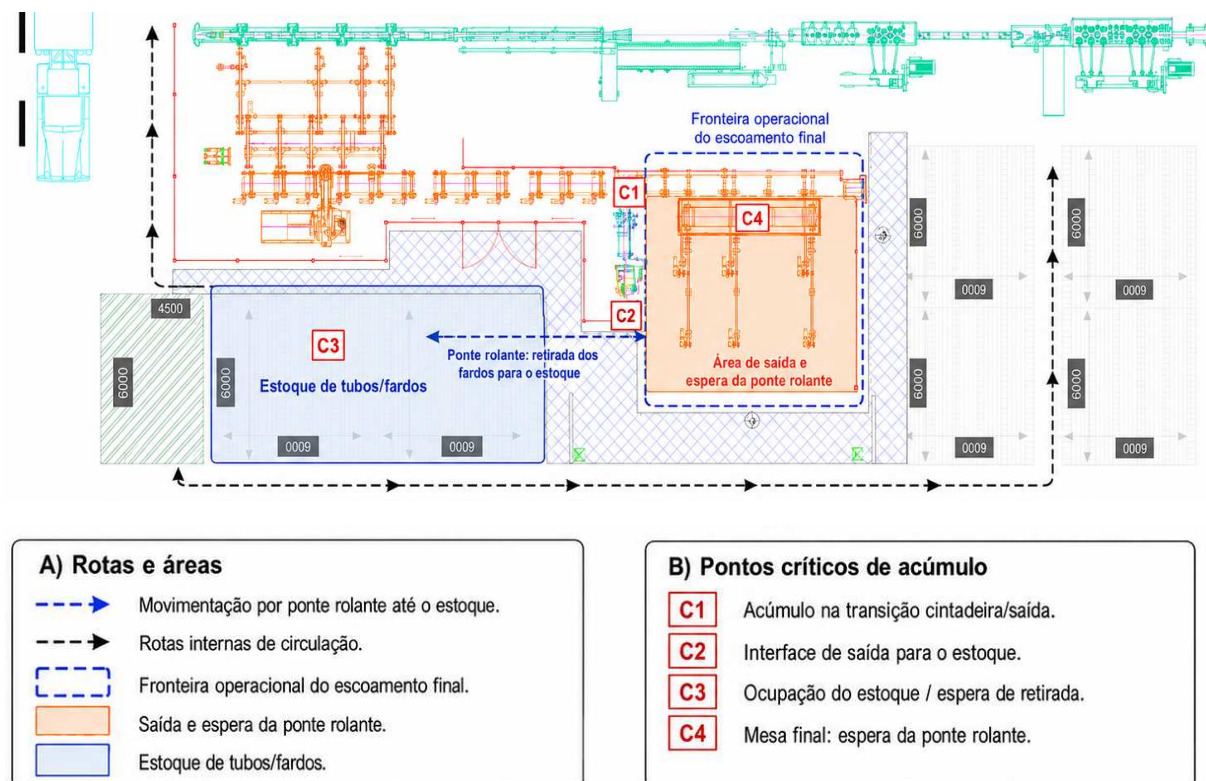
O empacotamento associado à MT04 não atua de forma isolada, pois depende da disponibilidade de área, da retirada dos fardos por ponte rolante e da capacidade de absorção do estoque. Por isso, interrupções relacionadas à “falta de espaço”, “mesa cheia”, “berços cheios” ou “esperando abrir espaço” devem ser interpretadas como sintomas de restrição de escoamento no final de linha.

A restrição de escoamento ocorre quando o material produzido não consegue avançar para a etapa seguinte na mesma velocidade com que é gerado. No caso do empacotamento, isso pode ocorrer quando o fardo permanece aguardando retirada, quando a área de saída está ocupada ou quando há limitação de espaço no estoque. Nessas condições, mesmo que a

empacotadora esteja tecnicamente apta a operar, o fluxo pode ser interrompido por indisponibilidade logística.

A Figura 19 apresenta as rotas internas e os principais pontos críticos de acúmulo no entorno do empacotamento da MT04.

Figura 19 - Rotas internas e pontos críticos de escoamento no entorno do empacotamento da MT04.



Fonte: Adaptado de Aço Cearense (2025).

Observa-se que o fluxo do material não se encerra na formação e cintagem do fardo, pois depende da sequência posterior de saída, movimentação por ponte rolante e direcionamento ao estoque. Dessa forma, a área destacada como fronteira operacional do escoamento final representa uma região sensível do processo, na qual a integração entre produção e logística interna influencia diretamente a continuidade operacional.

Os pontos críticos indicados na Figura 19 evidenciam regiões com potencial de formação de acúmulos e espera. O ponto C1 representa acúmulo na transição para a cintagem ou saída; o ponto C2 está associado à interface de saída para o estoque; o ponto C3 indica a ocupação do estoque ou espera de retirada; e o ponto C4 representa a mesa final aguardando disponibilidade da ponte rolante. Esses pontos mostram que as interrupções de escoamento

podem ocorrer em diferentes etapas após a formação do fardo, não se limitando à empacotadora em si.

Essa análise reforça a importância de interpretar o empacotamento como interface entre produção e logística interna. A automação contribui para padronizar e acelerar a formação dos fardos, mas o ganho total depende também da capacidade de retirada, movimentação e armazenagem. Dessa forma, parte das oportunidades de melhoria pode estar associada ao layout, à programação de retirada por ponte rolante, à gestão da área de estoque e à sincronização entre produção e logística interna.

A análise dos Paretos filtrados reforça essa interpretação. A redução dos registros de falta de espaço no estoque e engavetamento de tubo indica melhoria nas perdas antigas associadas ao escoamento e ao fluxo físico dos tubos. No entanto, a permanência de interrupções por falta de espaço no período jul.–nov. demonstra que a automação do empacotamento não elimina, por si só, as restrições logísticas do sistema. A estabilidade do final de linha depende da integração entre capacidade de empacotamento, retirada por ponte rolante, disponibilidade de área, organização do estoque e abastecimento dos insumos necessários ao enfardamento.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho operacional do empacotamento automatizado associado à MT04, considerando a transição do processo manual para o automatizado e seus reflexos sobre produtividade, interrupções, eficiência operacional, segurança, ergonomia e logística interna. A análise foi conduzida com base em dados internos de janeiro a novembro de 2025, comparando o período anterior à estabilização da empacotadora com o período posterior à sua estabilização operacional.

Os resultados indicaram melhoria no desempenho operacional da MT04 no período pós-estabilização. Observou-se redução na média mensal de interrupções gerais, aumento do OEE, crescimento da produção consolidada e evolução positiva dos indicadores de Disponibilidade e Performance/Eficiência. A Qualidade permaneceu estável, indicando que a melhoria do OEE esteve mais associada à redução de perdas por interrupções e ao melhor aproveitamento do ritmo operacional que a alterações relevantes no indicador de qualidade.

A análise complementar por Pareto permitiu aprofundar a interpretação das interrupções mais relacionadas ao final de linha. No período anterior à estabilização, as perdas filtradas estavam mais concentradas em restrições de escoamento, como falta de espaço no estoque e engavetamento de tubos. Após a estabilização, verificou-se mudança no perfil das interrupções, com maior presença de ocorrências associadas à regulação da empacotadora e ao abastecimento de insumos do enfardamento. Esse comportamento indica que a automação contribuiu para reduzir parte das perdas relacionadas ao fluxo físico dos tubos, mas também trouxe novos pontos de atenção ligados à operação e maturação do sistema automatizado.

Conclui-se que a implantação e estabilização da empacotadora automatizada contribuíram para melhorar o desempenho operacional do final de linha da MT04, especialmente pela redução das interrupções gerais, aumento da eficiência operacional, crescimento da produção e redução da exposição direta dos operadores a atividades manuais de formação e cintagem dos fardos. Entretanto, os ganhos observados não devem ser atribuídos exclusivamente à empacotadora, pois o desempenho do final de linha também depende da logística interna, da disponibilidade de área, da retirada dos fardos por ponte rolante, do abastecimento de insumos, do mix de produtos e das condições gerais de operação.

Como limitações do estudo, destacam-se o uso de dados internos sem recálculo dos indicadores corporativos, a dependência da qualidade dos registros de interrupção, a confidencialidade de dados financeiros e a impossibilidade de isolar completamente todos os fatores externos que podem influenciar a produção e o desempenho operacional. Além disso,

o período analisado contempla a fase de startup e estabilização da empacotadora, não representando ainda um ciclo anual completo de operação estabilizada.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Analisar um ciclo anual completo após a estabilização da empacotadora;
- Aprofundar o estudo das causas de interrupção por categoria;
- Avaliar o impacto do layout e da disponibilidade da ponte rolante no escoamento dos fardos;
- Estudar a padronização do abastecimento de fitas e insumos do enfardamento;
- Aplicar métodos específicos de análise ergonômica para quantificar a redução da exposição operacional.

REFERÊNCIAS

AÇO CEARENSE. **Base de dados de interrupções, produção e indicadores operacionais da MT04**: extrações do SAP/MII, jan.-nov. 2025. Caucaia: Aço Cearense, 2025. Base de dados interna não publicada.

AÇO CEARENSE. **Estudo técnico de implantação da empacotadora automatizada da MT04**. Caucaia: Aço Cearense, 2022. Documento interno.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12): **Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília, DF: MTE, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 17 (NR-17): **Ergonomia**. Brasília, DF: MTE, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

DE RON, A. J.; ROODA, J. E. **OEE and equipment effectiveness: an evaluation**. *International Journal of Production Research*, v. 44, n. 23, p. 4987-5003, 2006. DOI: 10.1080/00207540600573402.

GROOVER, Mikell P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. 4. ed. Global edition. Harlow: Pearson Education Limited, 2016.

MUCHIRI, Peter; PINTELON, Liliane. **Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE)**: literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, v. 46, n. 13, p. 3517-3535, 2008. DOI: 10.1080/00207540601142645.

NAKAJIMA, Seiichi. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance**. Cambridge: Productivity Press, 1988.

SAMPAIO, William. **Desenhos técnicos e layouts internos da área de empacotamento da MT04**. Caucaia: Aço Cearense, 2025. Material técnico interno.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 8. ed. Tradução de Daniel Vieira. São Paulo: Atlas, 2018.

APÊNDICE A – MODELO AMOSTRAL DA BASE DE PRODUÇÃO E INDICADORES OPERACIONAIS: AGOSTO DE 2025

Início Plan.	Término Plan.	Início Real	Término Real	Máquina	Material
01/08/2025 00:10:00	01/08/2025 00:46:07	01/08/2025 02:11:23	01/08/2025 02:58:01	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 1,55mm GA 5000mm
01/08/2025 00:15:00	01/08/2025 00:35:39	01/08/2025 02:58:02	01/08/2025 03:22:05	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 1,55mm GA 6000mm
01/08/2025 00:20:00	01/08/2025 00:42:42	01/08/2025 03:22:06	01/08/2025 04:09:33	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 1,55mm GA 6000mm
01/08/2025 00:30:00	01/08/2025 01:21:35	01/08/2025 04:09:34	01/08/2025 04:17:30	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 1,55mm GA 6000mm
01/08/2025 00:40:00	01/08/2025 01:02:05	01/08/2025 04:17:31	01/08/2025 04:49:01	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 1,55mm GA 7000mm
01/08/2025 00:55:00	01/08/2025 02:17:40	01/08/2025 04:49:02	01/08/2025 08:06:30	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 1,55mm GA 7000mm
01/08/2025 00:58:00	01/08/2025 01:49:35	01/08/2025 08:06:30	01/08/2025 10:10:26	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 1,55mm GA 6000mm
01/08/2025 02:10:00	01/08/2025 05:23:22	01/08/2025 10:10:28	01/08/2025 12:41:56	MAQUINA DE TUBO 04	TUBO IND. 4" 2,00mm LQ 6000mm

Programado (kg)	Consumido (kg)	Prod. Bom (kg)	Prod. NC (Kg)	Prod. B/C (Kg)	Sucata (Kg)	Causa Externa	Programada	Tempo Livre	Interrupção	Vazio/Inválido
3500,	3512	3512,	0	0	0	0	0	0	10	0
2000,	2003	2003,	0	0	0	0	0	0	6	0
2200,	2189	2189,	0	0	0	17	0	0	0	0
4999,	0	,	0	0	0	0	0	0	0	0
2140,	2203	2203,	0	0	0	0	0	0	19	0
8010,	8306,2	7145,	1282	0	0	0	10	0	53	0
4999,	4403,3	3630,	425	0	0	0	0	0	99	0
20000,	21105,1	20620,	0	294	0	0	0	0	0	0

T. Calendário	T. Programado	Prod. Possível TP	T. Útil	Prod. Possível TU	Disponibilidade	Eficiência	Qualidade
47	47	13536	37	10656	79%	33%	100%
24	24	8664	18	6498	75%	31%	100%
47	47	16967	30	10830	64%	20%	100%
8	8	2888	8	2888	100%	0%	0%
32	32	14368	13	5837	41%	38%	100%
197	187	83963	134	60166	72%	14%	85%
124	124	44764	25	9025	20%	45%	90%
151	151	61759	151	61759	100%	34%	99%

Fonte: Ordens de produção extraídos do sistema corporativo SAP/MII.

APÊNDICE B – MODELO AMOSTRAL DA BASE DE INTERRUPÇÕES: AGOSTO DE 2025

Máquina	Grupo	Turno	Duração (min)	Parada	Duração	Início	Término	Tipo
MT 04	Produção de Tubo	TURNO C	10	Sim	00:10:00	01/08/2025 02:20:00	01/08/2025 02:30:00	ACO CEARENSE INDUSTRIAL > MATRIZ > MT 04 > MT04-FORMADORA DE TUBO
MT 04	Produção de Tubo	TURNO C	6	Sim	00:06:00	01/08/2025 03:05:00	01/08/2025 03:11:00	ACO CEARENSE INDUSTRIAL > MATRIZ > MT 04 > MT04-SISTEMA DE CORTE
MT 04	Produção de Tubo	TURNO C	17	Sim	00:17:00	01/08/2025 03:49:00	01/08/2025 04:06:00	ACO CEARENSE INDUSTRIAL > MATRIZ > MT 04 > MT04-FORMADORA DE TUBO
MT 04	Produção de Tubo	TURNO C	19	Sim	00:19:00	01/08/2025 04:17:00	01/08/2025 04:36:00	ACO CEARENSE INDUSTRIAL > MATRIZ > MT 04 > MT04-FORMADORA DE TUBO
MT 04	Produção de Tubo	TURNO C	4	Sim	00:04:00	01/08/2025 04:50:00	01/08/2025 04:54:00	ACO CEARENSE INDUSTRIAL > MATRIZ > MT 04 > MT04-CORTE / EMENDA
MT 04	Produção de Tubo	TURNO C	8	Sim	00:08:00	01/08/2025 05:05:00	01/08/2025 05:13:00	ACO CEARENSE INDUSTRIAL > MATRIZ > MT 04 > MT04-SISTEMA DE CORTE

Executante	Sintoma	Grp. Origem	Classificação	Observações	Data Modif.
Operacional	EQUIPE INCOMPLETA	Operacional	INTERRUPÇÃO	mesa cheia	01/08/2025 02:40:56
Operacional	TROCA DISCO OU FACA	Operacional	INTERRUPÇÃO	troca de disco	01/08/2025 03:11:47
Causas Externas	FALTA DE ENERGIA	Causas Externas	CAUSAS EXTERNAS	falta de energia	01/08/2025 04:07:19
Operacional	TROCA DE INSUMO - CANETA DE METALIZAR	Operacional	INTERRUPÇÃO	troca da caneta OBS: caneta apagando	01/08/2025 04:36:55
Operacional	TROCA DE INSUMO - ELETRODO	Operacional	INTERRUPÇÃO	troca de eletrodo	01/08/2025 04:55:02
Operacional	TROCA DISCO OU FACA	Operacional	INTERRUPÇÃO	troca de disco	01/08/2025 05:13:58

Fonte: Interrupções extraídos do sistema corporativo SAP/MII.