

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Benson Ambrosio Vieira

**ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR DA PRODUTIVIDADE DOS
CAMINHÕES FORA DE ESTRADA SANY SKT90S E SKT110S EM UMA
OPERAÇÃO DE TRANSPORTE DE REJEITO FILTRADO: UM ESTUDO DE
CASO.**

Belo Horizonte

2024

Benson Ambrosio Vieira

**ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR DA PRODUTIVIDADE DOS
CAMINHÕES FORA DE ESTRADA SANY SKT90S E SKT110S EM UMA
OPERAÇÃO DE TRANSPORTE DE REJEITO FILTRADO: UM ESTUDO DE
CASO.**

Monografia apresentada à banca avaliadora do
Curso de Especialização em Engenharia de
Recursos Minerais, como requisito parcial para
obtenção do título de especialista em Engenharia
de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio Monteiro
Montenegro

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, o estudante Benson Ambrósio Vieira, matrícula 2023662391, defendeu o Trabalho intitulado “**ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR DA PRODUTIVIDADE DOS CAMINHÕES FORA DE ESTRADA SANY SKT90S E SKT110S EM UMA OPERAÇÃO DE TRANSPORTE DE REJEITO FILTRADO: UM ESTUDO DE CASO**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 96

Situação: Aprovado

Orientador: Professor Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Examinadora: Professora Dinalva Celeste Fonseca

Examinadora: Professora Viviane da Silva Borges Barbosa



Documento assinado eletronicamente por **Viviane da Silva Borges Barbosa, Professora do Magistério Superior**, em 18/01/2025, às 07:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dinalva Celeste Fonseca, Usuária Externa**, em 31/01/2025, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Claudio Monteiro Montenegro, Membro de comissão**, em 03/02/2025, às 14:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3806779** e o código CRC **654B62F7**.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

Referência: Processo nº 23072.201794/2023-83

SEI nº 3806779

AGRADECIMENTOS

"Quando me sinto respeitado e acolhido, meu potencial se expande". Essa frase de Helen Salomão, poetisa e fotógrafa baiana, resume meus sentimentos e minhas reflexões ao concluir mais essa etapa de vida acadêmica, diante de uma ainda iniciante vida profissional.

Dedico este trabalho à minha esposa Ariane, quem me acompanhou por todas as andanças que a mineração já nos proporcionou, mudanças de empresa, de estado, de cidade, de área de atuação e até de tema de trabalho de conclusão da especialização. Agradeço a compreensão, paciência, parceria, companhia e incentivo.

À UFMG, na figura do Departamento de Engenharia de Minas, pelo ensino público de excelência, onde, desde os tempos de graduação até a pós-graduação, pude me formar humana e profissionalmente para os desafios da mineração e da sociedade.

Ao meu orientador, prof. Dr. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro, pela disponibilidade, apoio e compreensão no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A mineração compreende as operações de mina e usina, e consiste na exploração e exploração sustentável de recursos minerais, os quais participam como insumo de diversas cadeias produtivas da sociedade. O carregamento e transporte, operações unitárias de mina normalmente empregadas no início do ciclo produtivo, durante a lavra, também são aplicadas para a movimentação de rejeito, dada a necessidade de transporte desse material para o local adequado de disposição. Em linhas gerais, o dimensionamento de frota consiste na compatibilidade entre o porte do equipamento de carga e o equipamento de transporte, e se faz essencial não somente para a lavra, mas também para a movimentação de rejeito, dada a necessidade de maior produtividade, minimização do custo operacional e maximização da eficiência. Nesse trabalho, no empreendimento minerário em estudo, o rejeito filtrado de minério de ferro é carregado na praça da filtragem por retroescavadeiras Sany modelo SY750H e transportado até as pilhas de disposição de rejeito filtrado por caminhões fora de estrada Sany modelo SKT90S. Foi realizada uma análise comparativa preliminar da produtividade da frota de transporte vigente com a de um caminhão Sany modelo SKT110S, o qual foi submetido à teste nessa operação e também foi carregado pela retroescavadeira SY750H. Foram escolhidas duas rotas de transporte de rejeito, rota Setor X e rota Pulmão 2, para as quais foram coletados a distância média de transporte e os tempos de manobra para carregamento, carregamento, deslocamento cheio, manobra para basculamento, basculamento e deslocamento vazio. A partir dos tempos de ciclo, calculou-se a produtividade de cada modelo de caminhão em cada trajeto analisado. Por ser de maior porte, o caminhão SKT110S demandou mais 2 passes da retroescavadeira e implicou em maior tempo de carregamento. Contudo, esse caminhão performou de forma similar no deslocamento cheio e melhor no deslocamento vazio, no qual a velocidade superou de 2,2 a 2,6 km/h a velocidade do SKT90S. Os tempos de ciclo do caminhão SKT110S foram similares aos do caminhão SKT90S. Porém, o SKT110S superou a produtividade do SKT90S de 45,5 t/h (rota Setor X) até 46,7 t/h (rota Pulmão 2). Dessa forma, ressalta-se a importância do estudo realizado com o caminhão SKT110S, o qual foi bem-sucedido não somente em produtividade, analisando sob a ótica do tempo de ciclo, mas também porque é um modelo que se destaca por oferecer mais conforto para o operador e alguns recursos notáveis, como a balança integrada ao equipamento.

Palavras-chave: carregamento; transporte; rejeito filtrado; caminhões fora de estrada; produtividade.

ABSTRACT

Mining includes both mine and plant operations and involves the sustainable exploration and exploitation of mineral resources, which serve as inputs for various productive chains in society. Loading and hauling, unit operations typically employed at the beginning of the production cycle during mining, are also applied to tailings hauling due to the need to transport this material to the appropriate disposal site. In general terms, fleet sizing consists of ensuring compatibility between the capacity of the loading equipment and the transport equipment, and it is essential not only for mining but also for tailings movement, given the need for greater productivity, minimization of operational costs, and maximization of efficiency. In this work, at the mining site under analysis, filtered iron ore tailings are loaded at the filtration station by Sany SY750H backhoe excavators and transported to filtered tailings disposal piles by Sany off-highway trucks SKT90S model. A preliminary comparative analysis of the productivity was performed between the current transport fleet and a Sany off-highway truck SKT110S model, which was tested in this operation and was also loaded by the SY750H backhoe excavator. Two tailings transport routes were selected, Setor X route and Pulmão 2 route, for which the average transport distance and the times for loading maneuver, loading, loaded travel, unloading maneuver, unloading, and empty travel were collected. From the cycle times, the productivity of each truck model on each analyzed route was calculated. Being larger, the SKT110S truck required two additional passes from the excavator, resulting in a longer loading time. However, this truck performed similarly during the loaded travel and better during the empty travel, where its speed surpassed the SKT90S by 2.2 to 2.6 km/h. The cycle times of the SKT110S were similar to those of the SKT90S. However, the SKT110S outperformed the SKT90S in productivity, from 45.5 t/h (Setor X route) to 46.7 t/h (Pulmão 2 route). Therefore, the study with the SKT110S truck proved successful not only in terms of productivity, from the perspective of cycle time, but also because this truck is a model that stands out by offering greater operator comfort and notable features, such as the integrated scale.

Keywords: loading; hauling; filtered tailing; off-highway trucks; productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e retroescavadeiras hidráulicas Catterpillar.....	16
Figura 2 - Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas Catterpillar.....	16
Figura 3 - Rota Setor X.....	19
Figura 4 - Rota Pulmão 2.....	20
Figura 5 a) Ilustração do caminhão fora de estrada Sany, modelo SKT90S. Fonte: Sany (2024a). b) Caminhão Sany SKT90S da empresa estudada. Fonte: O autor.....	20
Figura 6 a) Ilustração do caminhão fora de estrada Sany, modelo SKT110S. Fonte: Sany (2024a). b) Caminhão Sany SKT110S da empresa estudada. Fonte: O autor.....	21
Figura 7 - Balança integrada no caminhão fora de estrada Sany SK110S.....	22
Figura 8 - Retroescavadeira hidráulica de grande porte Sany, modelo SY750H	23
Figura 9 - Carregamento do caminhão Sany SKT90S pela retroescavadeira Sany SY750H no empreendimento em estudo	24
Figura 10 - Carregamento do caminhão Sany SKT110S em teste pela retroescavadeira Sany SY750H no empreendimento em estudo	24
Figura 11 - Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X..	25
Figura 12 - Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X.....	26
Figura 13 - Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X	26
Figura 14 - Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X.....	27
Figura 15 - Histograma Tempo de Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X.....	28
Figura 16 - Boxplot Tempo de Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X	28
Figura 17 - Histograma Tempo de Carregamento sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X.....	29
Figura 18 - Boxplot Tempo de Carregamento sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X.....	30
Figura 19 - Histograma Tempo de Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X.....	30
Figura 20 - Boxplot Tempo de Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X	31
Figura 21 - Histograma Tempo de Passe da Retroescavadeira SY750H.....	32
Figura 22 - Boxplot Tempo de Passe da Retroescavadeira SY750H.....	32
Figura 23 - Histograma Tempo Operando Cheio (SKT90S) - Rota Setor X.....	33
Figura 24 - Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT90S) - Rota Setor X.....	34
Figura 25 - Histograma Tempo Operando Cheio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X.....	34

Figura 26 - Boxplot Tempo Operando Cheio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X.....	35
Figura 27 - Histograma Tempo Operando Cheio (SKT110S) - Rota Setor X.....	36
Figura 28 - Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT110S) - Rota Setor X.....	36
Figura 29 - Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X..	37
Figura 30 - Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X.....	38
Figura 31 - Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X	38
Figura 32 - Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X.....	39
Figura 33 - Histograma Tempo de Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X.....	40
Figura 34 - Boxplot Tempo de Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X	40
Figura 35 - Histograma Tempo de Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X.....	41
Figura 36 - Boxplot Tempo de Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X	41
Figura 37 - Histograma Tempo Operando Vazio (SKT90S) - Rota Setor X.....	42
Figura 38 - Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT90S) - Rota Setor X.....	43
Figura 39 - Histograma Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X.....	44
Figura 40 - Boxplot Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X.....	44
Figura 41 - Histograma Tempo Operando Vazio (SKT110S) - Rota Setor X.....	45
Figura 42 - Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT110S) - Rota Setor X.....	46
Figura 43 - Histograma Tempo de Ciclo (SKT90S) - Rota Setor X.....	47
Figura 44 - Boxplot Tempo de Ciclo (SKT90S) - Rota Setor X	47
Figura 45 - Histograma Tempo de Ciclo (SKT110S) - Rota Setor X.....	48
Figura 46 - Boxplot Tempo de Ciclo (SKT110S) - Rota Setor X	48
Figura 47 – Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2	51
Figura 48 – Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2....	51
Figura 49 – Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2	52
Figura 50 – Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2	52
Figura 51 – Histograma Tempo de Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2	53
Figura 52 – Boxplot Tempo de Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2	53
Figura 53 – Histograma Tempo de Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2	54
Figura 54 – Boxplot Tempo de Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2	54
Figura 55 – Histograma Tempo Operando Cheio (SKT90S) – Rota Pulmão 2.....	55
Figura 56 – Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT90S) – Rota Pulmão 2	56

Figura 57 – Histograma Tempo Operando Cheio (SKT110S) – Rota Pulmão 2.....	57
Figura 58 – Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT110S) – Rota Pulmão 2	57
Figura 59 – Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2	58
Figura 60 – Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2....	59
Figura 61 – Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2	59
Figura 62 – Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2	60
Figura 63 – Histograma Tempo de Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2	61
Figura 64 – Boxplot Tempo de Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2.....	61
Figura 65 – Histograma Tempo de Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2	62
Figura 66 – Boxplot Tempo de Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2.....	62
Figura 67 – Histograma Tempo Operando Vazio (SKT90S) – Rota Pulmão 2.....	63
Figura 68 – Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT90S) – Rota Pulmão 2	64
Figura 69 – Histograma Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) – Rota Pulmão 2....	65
Figura 70 – Boxplot Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) – Rota Pulmão 2	65
Figura 71 – Histograma Tempo Operando Vazio (SKT110S) – Rota Pulmão 2.....	66
Figura 72 – Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT110S) – Rota Pulmão 2	67
Figura 73 – Histograma Tempo de Ciclo (SKT90S) – Rota Pulmão 2	68
Figura 74 – Boxplot Tempo de Ciclo (SKT90S) – Rota Pulmão 2.....	68
Figura 75 – Histograma Tempo de Ciclo (SKT110S) – Rota Pulmão 2	69
Figura 76 – Boxplot Tempo de Ciclo (SKT110S) – Rota Pulmão 2.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais especificações técnicas do caminhão fora de estrada Sany SKT90S.....	21
Tabela 2 - Principais especificações técnicas do caminhão fora de estrada Sany SKT110S...	22
Tabela 3 - Principais especificações técnicas da retroescavadeira hidráulica de grande porte Sany SY750H	23
Tabela 4 – Resumo comparativo dos caminhões Sany SKT90S e SKT110S para a rota Setor X	50
Tabela 5 - Resumo comparativo dos caminhões Sany SKT90S e SKT110S para a rota Pulmão 2	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.2 Relevância	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Operações unitárias de carregamento e transporte em minas a céu aberto.....	14
3. METODOLOGIA	18
3.1 Planejamento do estudo	18
3.2 Rotas de transporte selecionadas	19
3.3 Caminhões Sany SKT90S e SKT110S	20
3.4 Retroescavadeira Sany SY750H.....	22
3.5 Praça de carregamento de rejeito	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Rota Setor X.....	25
4.2 Rota Pulmão 2.....	50
5. CONCLUSÕES	71
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

As operações unitárias de carregamento e transporte são etapas de suma importância no ciclo produtivo da mineração, seja a céu aberto ou subterrânea. Em geral, essas atividades envolvem o uso de equipamento de carga e transporte para extrair e transportar não somente o minério e estéril das frentes de lavra até áreas de beneficiamento e pilhas de estéril, respectivamente, mas também são empregadas no transporte de rejeito, seja de plantas de filtragem ou de barragens a serem descaracterizadas até o local de disposição final. Essas operações são altamente dependentes de equipamentos robustos e eficientes, como escavadeiras e caminhões fora de estrada, que precisam ser dimensionados corretamente para maximizar a produtividade e minimizar custos operacionais. Segundo Souza et al. (2019), o desempenho dessas operações influencia diretamente a viabilidade econômica de um projeto minerário, impactando o custo por tonelada transportada e a eficiência geral da operação.

A necessidade de grandes volumes de transporte se torna especialmente relevante em mineradoras que produzem volumes elevados de rejeito filtrado e/ou possuem barragens de rejeitos a serem descaracterizadas. O processo de descaracterização envolve a remoção ou a reconfiguração dessas estruturas para atender às novas normativas ambientais e de segurança. Isso requer o transporte em larga escala de rejeitos acumulados ao longo dos anos para locais seguros ou pilhas de disposição a seco. Empresas mineradoras têm buscado soluções tecnológicas e operacionais para tornar viável essa tarefa monumental, que exige o uso de frotas robustas e a adaptação de rotas de transporte, considerando fatores como distâncias, tempo de ciclo e condições de segurança.

A viabilização de grandes empreendimentos minerários muitas vezes depende da escolha de equipamentos de grande porte. Almeida e Silva (2020) destacaram que a escolha de equipamentos de grande porte, embora requeira um investimento inicial elevado, oferece retorno a longo prazo na forma de maior produtividade, redução do número de ciclos de carregamento e transporte e redução dos custos operacionais por tonelada transportada. Contudo, Uzan (2020) reiterou que é importante fazer uma análise detalhada dos custos dos equipamentos de carga e transporte, em conjunto, ao longo de toda sua vida útil, pois a ideia de que “quanto maior o porte dos equipamentos, melhor” nem sempre é verdadeira.

A necessidade de transportar grandes volumes de rejeito se intensificou com as exigências de descaracterização de barragens, processo necessário para garantir a segurança ambiental. Mineradoras com grandes volumes de rejeito acumulado, como observado por Silva e Costa

(2021), estão adotando a movimentação em massa de rejeitos para pilhas de disposição a seco, o que demanda a utilização de frotas de grande porte para viabilizar o transporte em escala. Esses autores afirmam que o uso de caminhões maiores e mais eficientes é crucial para garantir que o transporte ocorra dentro do prazo e com o menor impacto ambiental possível.

O dimensionamento adequado da frota é outro fator importante que impacta diretamente a eficiência das operações de carregamento e transporte. Segundo estudos de Lima e Ferreira (2018), o dimensionamento correto da frota leva em consideração não apenas o porte dos equipamentos, mas também a compatibilidade com as condições geotécnicas e logísticas da mina. Equipamentos de grande porte, como caminhões fora de estrada e escavadeiras de grande capacidade, são fundamentais para alcançar a eficiência operacional necessária em projetos de grande escala, como os que envolvem o transporte de rejeito em larga escala.

Dessa forma, as operações unitárias de carregamento e transporte são parte integrante da produtividade de uma mina, especialmente em contextos que envolvem o transporte de rejeito, seja oriundo de plantas de filtragens ou de barragens a serem descaracterizadas. A utilização de equipamentos de grande porte é uma solução eficiente para atender às exigências de transporte em larga escala.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo comparativo preliminar entre a produtividade do caminhão fora de estrada Sany modelo SKT90S (frota vigente) e a produtividade do caminhão fora de estrada Sany SKT110S (caminhão teste), ambos carregados pela retroescavadeira hidráulica Sany SY750H em uma mineradora de minério de ferro.

Buscando atingir o objetivo geral proposto, têm-se como objetivos específicos:

- a) Selecionar duas rotas de transporte de rejeito filtrado para o estudo, ambas com origem na praça da filtragem de rejeito;
- b) Coletar e avaliar comparativamente o tempo de ciclo dos caminhões SKT90S e do caminhão SKT110S;
- c) Calcular, para cada rota de transporte, a produtividade do caminhão da frota vigente e do caminhão testado.

1.2 Relevância

Além da indiscutível importância na movimentação de minério e estéril, o papel das operações unitárias de carregamento e transporte na movimentação de rejeito se intensificou com o crescente volume de rejeito gerado. Em função das exigências legais de descaracterização de barragens, diversas mineradoras investiram na filtragem de rejeitos e na disposição a seco. Em muitas empresas, além da movimentação de rejeito filtrado, os grandes volumes de rejeito estocados em barragens, mais cedo ou mais tarde, também terão que ser transportados para locais adequados, como pilhas de disposição a seco, o que certamente demandará a utilização de frotas de grande porte para viabilizar o transporte em escala. Por isso, esse estudo é importante para abrir o leque de opções de equipamentos de carregamento e transporte de grande porte para a movimentação de rejeito filtrado, com foco também na retomada de passivos estocados em barragens.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Operações unitárias de carregamento e transporte em minas a céu aberto

As operações de carregamento e transporte na lavra a céu aberto são fundamentais no ciclo produtivo da mineração, constituindo uma parte significativa do custo e da eficiência operacional. O carregamento envolve a remoção e movimentação de material escavado, utilizando-se principalmente retroescavadeiras, pás-carregadeiras e outros equipamentos de grande porte. O objetivo principal dessa etapa é garantir que o material escavado seja carregado eficientemente em caminhões ou outros veículos de transporte, minimizando os tempos ociosos e maximizando a produtividade do sistema (RIPPERGER et al., 2002).

A sincronização entre os tempos de carregamento e transporte é um desafio constante para as operações de lavra a céu aberto. O tempo de ciclo dos caminhões, composto pelas etapas de tempo de manobra para carregamento, carregamento, deslocamento cheio, manobra para basculamento, basculamento e deslocamento vazio, deve ser minimizado para maximizar a produtividade. Conforme apontado por Santos e Bueno (2011), qualquer desequilíbrio entre as fases pode resultar em tempos ociosos dos equipamentos, o que impacta diretamente a eficiência e os custos operacionais.

Além disso, as operações de carregamento e transporte podem ser impactadas por fatores geológicos, como as características do minério ou estéril a ser movimentado, e condições ambientais, como as variações climáticas. Por exemplo, operações realizadas sob chuva ou em

terrenos instáveis podem diminuir a produtividade e aumentar os riscos de acidentes. Segundo Dias et al. (2018), a análise geotécnica do terreno e a adaptação dos equipamentos são fundamentais para a continuidade segura e eficiente dessas operações.

Outro ponto relevante na otimização dessas operações é o dimensionamento de frota, que envolve a compatibilidade entre os equipamentos de carga e transporte. Um dimensionamento incorreto pode causar gargalos operacionais, como caminhões esperando para serem carregados ou retroescavadeiras paradas à espera de caminhões. Estudos de dimensionamento baseados em simulações computacionais e coleta de dados em campo, como o realizado por Marques (2014), são cada vez mais utilizados para otimizar a relação entre o número de caminhões e o número de escavadeiras.

O dimensionamento de frota é um processo que envolve o cálculo da quantidade ideal de caminhões e retroescavadeiras para uma operação de mineração. Esse cálculo leva em consideração uma série de fatores, como a taxa de produção desejada, a capacidade de carga dos caminhões, a distância a ser percorrida, a inclinação da rampa e as condições das vias de transporte (SOUZA, 2013). Um dimensionamento inadequado pode levar a uma série de problemas, incluindo engarrafamentos nas áreas de carregamento e descarregamento, tempos de espera excessivos e uma redução significativa na produtividade.

O objetivo do dimensionamento é sempre garantir que a quantidade de caminhões seja suficiente para acompanhar o ritmo de produção das retroescavadeiras, evitando que qualquer equipamento fique ocioso. Isso é feito por meio de cálculos que envolvem os tempos de ciclo dos caminhões. Um erro comum é superdimensionar a frota de caminhões, o que pode resultar em caminhões ociosos e aumentar os custos operacionais.

A escolha adequada dos equipamentos de carregamento e transporte é crucial para a eficiência da operação. Cada mina possui características particulares que demandam um dimensionamento correto da frota, incluindo a relação entre o porte dos caminhões e das retroescavadeiras utilizadas. Um erro comum é o desbalanceamento dessa relação, resultando em caminhões ociosos esperando para serem carregados ou retroescavadeiras paradas à espera de caminhões. De acordo com Souza (2013), o objetivo é minimizar o tempo ocioso de ambos os tipos de equipamentos, maximizando a produtividade.

As figuras abaixo ilustram a relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e as retroescavadeiras e escavadeiras da Caterpillar.

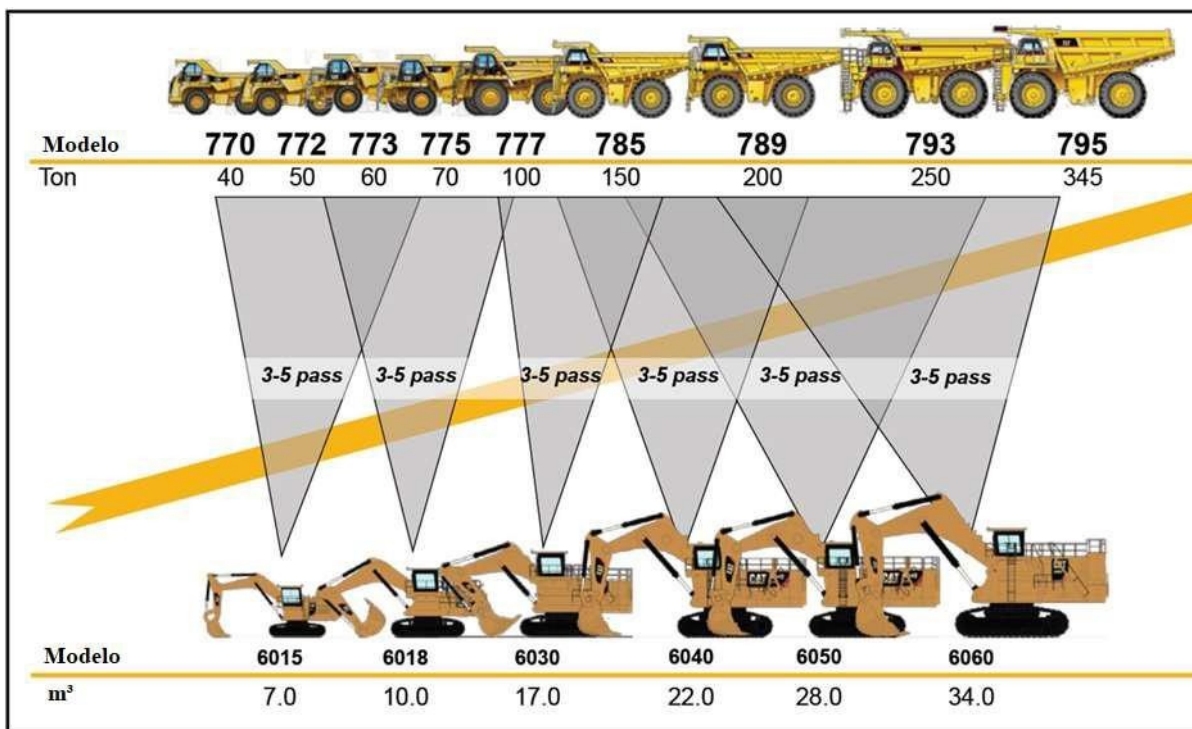


Figura 1 - Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e retroescavadeiras hidráulicas Caterpillar.

Fonte: Caterpillar (2014).

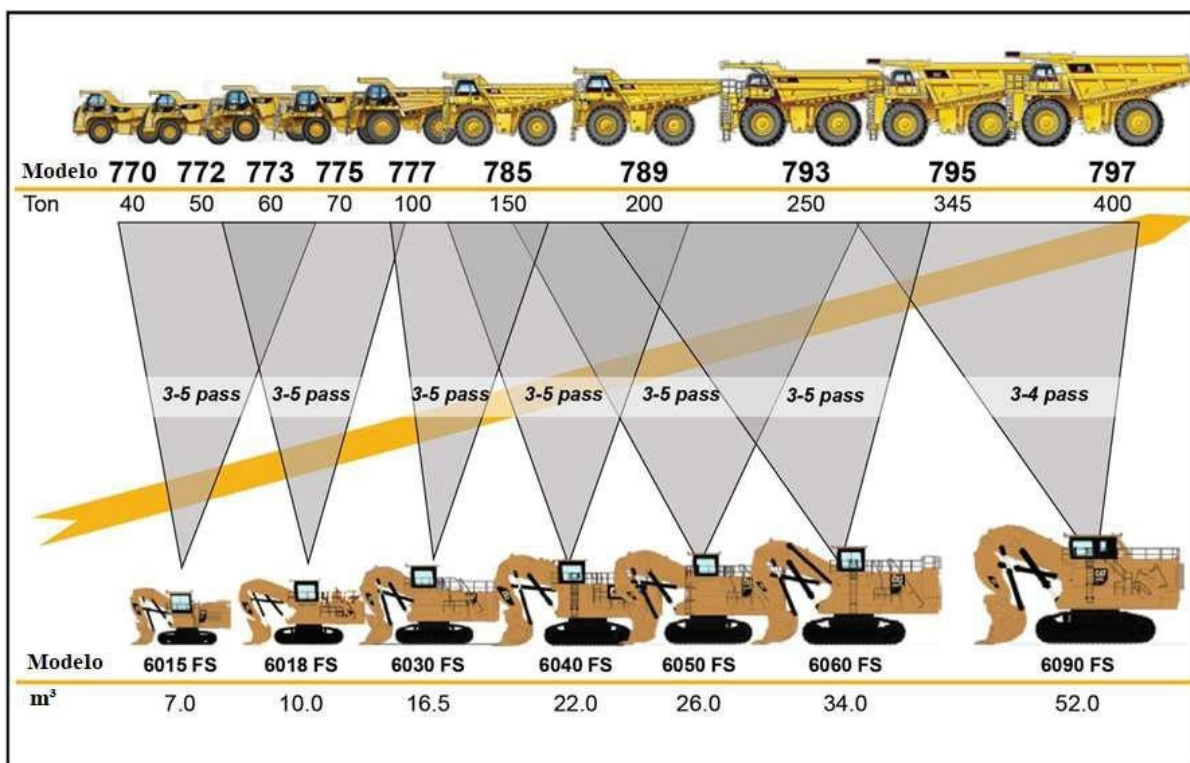


Figura 2 - Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas Caterpillar.

Fonte: Caterpillar (2014).

Segundo Hartman e Mutmanský (2002), a escavação implica em uma ação de extrair material sólido, enquanto carregamento consiste na elevação de material sem extração do mesmo e posterior descarregamento em algum veículo de transporte. Para tais operações, diversos equipamentos são utilizados, a depender das particularidades, área de aplicação e localização do empreendimento. Em minas a céu aberto, devido à maior flexibilidade da operação, dentre os principais equipamentos que realizam a atividade de escavação de forma cíclica estão: pá carregadeira, escavadeira hidráulica de carregamento frontal, retroescavadeiras hidráulicas, escavadeira elétrica, dragline, wheel dozer e bulldozer.

Na operação de carregamento, é essencial garantir que o tempo de ciclo da escavadeira seja compatível com o tempo de carregamento de cada caminhão. Esse tempo de ciclo inclui as etapas de manobra da retroescavadeira, escavação do material, e deposição no caminhão. Segundo a literatura, uma retroescavadeira ideal deve ser capaz de encher um caminhão em 4 a 5 passes, dependendo da capacidade da caçamba e do caminhão (MARQUES, 2014). A eficiência no carregamento também pode ser afetada por fatores como a fragmentação do minério e as condições do terreno.

No que tange ao transporte, este representa uma etapa subsequente e crucial, onde o material carregado é movimentado até as áreas de processamento ou descarte, como pilhas de estéril ou planta de beneficiamento. A escolha do caminhão e da rota, bem como o dimensionamento correto da frota, são aspectos essenciais para garantir a eficiência dessa operação. Segundo Choudhary et al. (2009), o transporte pode consumir até 50% dos custos totais de operação de uma mina a céu aberto, sendo necessário o monitoramento contínuo para otimização dos recursos.

O transporte pode ser classificado em dois tipos: transporte em distâncias curtas e em longas distâncias. Em minas a céu aberto, o transporte por caminhões é o mais comum, especialmente para distâncias de até alguns quilômetros. Quando a distância é maior, o transporte por correias ou até mesmo trens pode ser mais viável economicamente (CHAVES, 2010). Caminhões fora de estrada são amplamente utilizados nesse tipo de operação, por sua robustez e capacidade de carga.

A produtividade dos caminhões em operações de mineração depende de uma série de fatores, como o tempo de ciclo, a capacidade de carga, o estado das vias de transporte e a habilidade dos operadores. Para avaliar essa produtividade, é comum calcular o número de ciclos por hora e a tonelage transportada por ciclo (SILVA et al., 2010). A partir desses dados, é possível

identificar gargalos na operação e propor melhorias, como o redimensionamento da frota ou melhorias nas vias de transporte.

A análise de produtividade em minas a céu aberto é essencial para a otimização do uso de equipamentos e recursos. Essa análise pode ser feita por meio de softwares específicos ou de forma manual, comparando-se o tempo de ciclo dos caminhões com a produção real da mina (CHAVES, 2010). Além disso, a análise de produtividade deve considerar as condições climáticas, que podem impactar diretamente a eficiência das operações, especialmente em períodos de chuva intensa, que afetam a aderência dos caminhões e a estabilidade do terreno.

A eficiência das operações de carregamento e transporte na mineração a céu aberto depende de uma série de fatores, que vão desde o dimensionamento correto da frota até o estado das vias de transporte e o uso de tecnologias de automação e mapeamento. A produtividade dos caminhões é um indicador chave de desempenho e deve ser constantemente monitorada para garantir a eficiência da operação (SOUZA, 2013).

3. METODOLOGIA

3.1 Planejamento do estudo

No empreendimento minerário em estudo, o rejeito filtrado de minério de ferro é carregado na praça da filtragem por uma frota de retroescavadeiras Sany modelo SY750H e transportado até as pilhas de disposição de rejeito filtrado por uma frota de caminhões Sany modelo SKT90S.

Nessa operação, foi submetido à teste um caminhão Sany modelo SKT110S, o qual também foi carregado pelas retroescavadeiras SY750H. Foram selecionadas duas rotas de transporte, para as quais foram coletados:

- Tempo de manobra para carregamento;
- Tempo de carregamento;
- Tempo de deslocamento cheio;
- Tempo de manobra para basculamento;
- Tempo de basculamento;
- Tempo de deslocamento vazio.

Para a frota vigente, os tempos foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado. Para o caminhão em teste, os tempos foram coletados manualmente em campo, com apoio do Instrutor

de Equipamentos de Mina da empresa. O estudo foi realizado durante dois dias de teste, sendo um dia para cada rota. Os dados foram analisados com auxílio do Minitab.

3.2 Rotas de transporte selecionadas

Para a análise comparativa preliminar da produtividade dos dois modelos de caminhões Sany, foram escolhidas duas rotas de transporte do rejeito filtrado. A figura abaixo apresenta a rota Setor X e sua distância média de transporte (DMT).

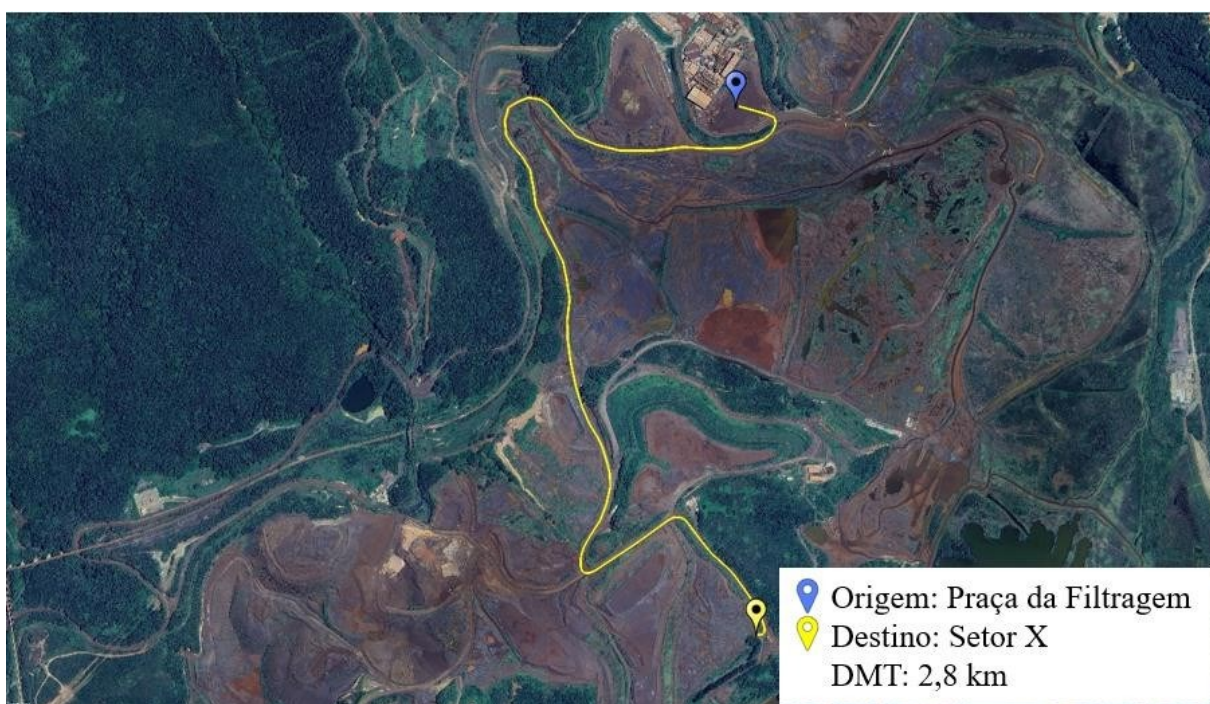


Figura 3 - Rota Setor X.

Fonte: O autor.

A figura abaixo apresenta a rota Pulmão 2 e sua DMT.

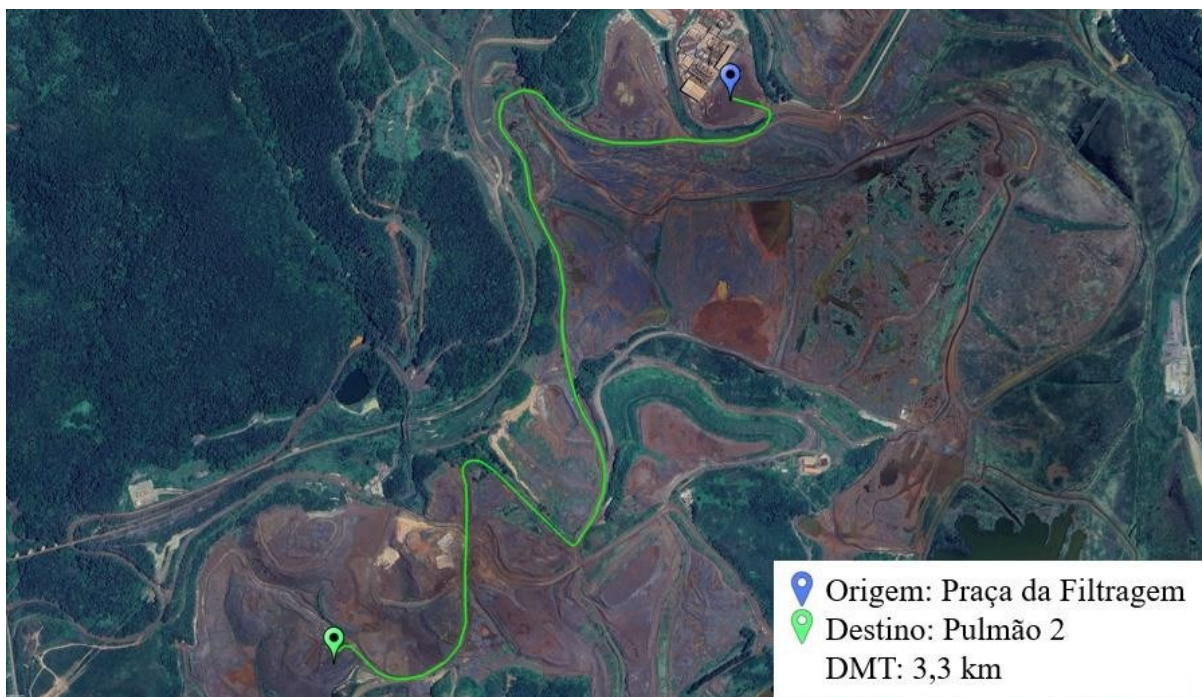


Figura 4 - Rota Pulmão 2.
Fonte: O autor.

3.3 Caminhões Sany SKT90S e SKT110S

A frota de transporte do rejeito filtrado é composta por caminhões fora de estrada Sany, modelo SKT90S, conforme a figura abaixo.



Figura 5 a) Ilustração do caminhão fora de estrada Sany, modelo SKT90S. Fonte: Sany (2024a). **b)** Caminhão Sany SKT90S da empresa estudada. Fonte: O autor.

A tabela abaixo apresenta as principais especificações técnicas desse caminhão.

Tabela 1 - Principais especificações técnicas do caminhão fora de estrada Sany SKT90S.
Fonte: adaptado de Sany (2024a).

Peso do caminhão (toneladas)	30
Capacidade de carga (toneladas)	60
Capacidade volumétrica (m³)	31 (raso) / 35 (coroado)
Velocidade máxima (km/h)	50
Comprimento (milímetros)	8.967
Largura (milímetros)	3.468
Altura (milímetros)	4.308
Possui balança integrada?	Não

O caminhão submetido a teste no transporte de rejeito filtrado foi um fora de estrada Sany, modelo SKT110S, conforme a figura abaixo.

a)



b)



Figura 6 a) Ilustração do caminhão fora de estrada Sany, modelo SKT110S. Fonte: Sany (2024a). **b)** Caminhão Sany SKT110S da empresa estudada. Fonte: O autor.

A tabela abaixo apresenta as principais especificações técnicas desse caminhão.

Tabela 2 - Principais especificações técnicas do caminhão fora de estrada Sany SKT110S.

Fonte: adaptado de Sany (2024b).

Peso do caminhão (toneladas)	35
Capacidade de carga (toneladas)	75
Capacidade volumétrica (m ³)	38 (raso) / 44 (coroadado)
Velocidade máxima (km/h)	50
Comprimento (milímetros)	9.200
Largura (milímetros)	4.000
Altura (milímetros)	4.100
Possui balança integrada?	Sim

A figura abaixo apresenta o leitor da balança integrada no caminhão SKT110S.

**Figura 7** - Balança integrada no caminhão fora de estrada Sany SK110S.

3.4 Retroescavadeira Sany SY750H

A frota de carregamento do rejeito filtrado é composta por retroescavadeiras hidráulicas de grande porte Sany, modelo SY750H, conforme a figura abaixo.



Figura 8 - Retroescavadeira hidráulica de grande porte Sany, modelo SY750H.
Fonte: Sany (2024c).

A tabela abaixo apresenta as principais especificações técnicas dessa retroescavadeira.

Tabela 3 - Principais especificações técnicas da retroescavadeira hidráulica de grande porte Sany SY750H.
Fonte: adaptado de Sany (2024c).

Peso operacional (toneladas)	76,2
Capacidade da caçamba (m ³)	4,6
Altura máxima de escavação (milímetros)	11.200
Altura máxima de despejo (milímetros)	7.250

3.5 Praça de carregamento de rejeito

A figura abaixo ilustra o carregamento do caminhão SKT90S pela retroescavadeira SY750H na praça de carregamento de rejeito filtrado.



Figura 9 - Carregamento do caminhão Sany SKT90S pela retroescavadeira Sany SY750H no empreendimento em estudo.

Fonte: O autor.

A figura abaixo ilustra o carregamento do caminhão SKT110S pela retroescavadeira SY750H na praça de carregamento de rejeito filtrado.



Figura 10 - Carregamento do caminhão Sany SKT110S em teste pela retroescavadeira Sany SY750H no empreendimento em estudo.

Fonte: O autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rota Setor X

a) Tempo de Manobra para Carregamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de manobra para carregamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

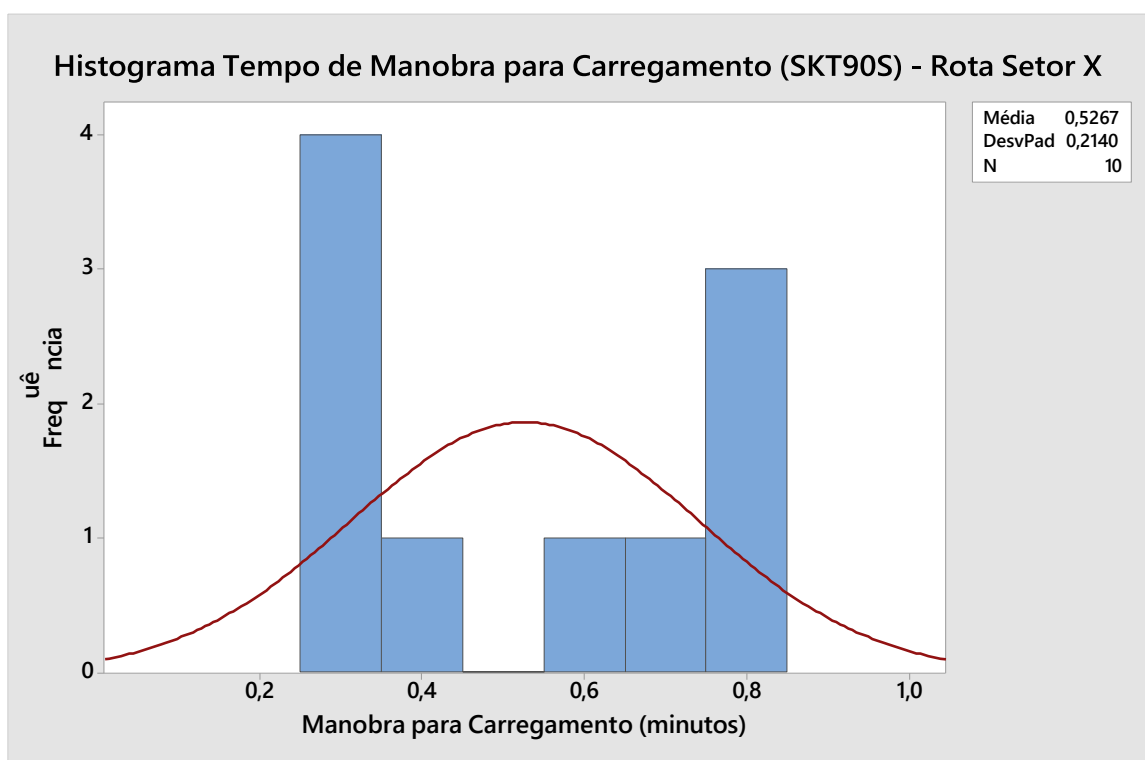


Figura 11 - Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X

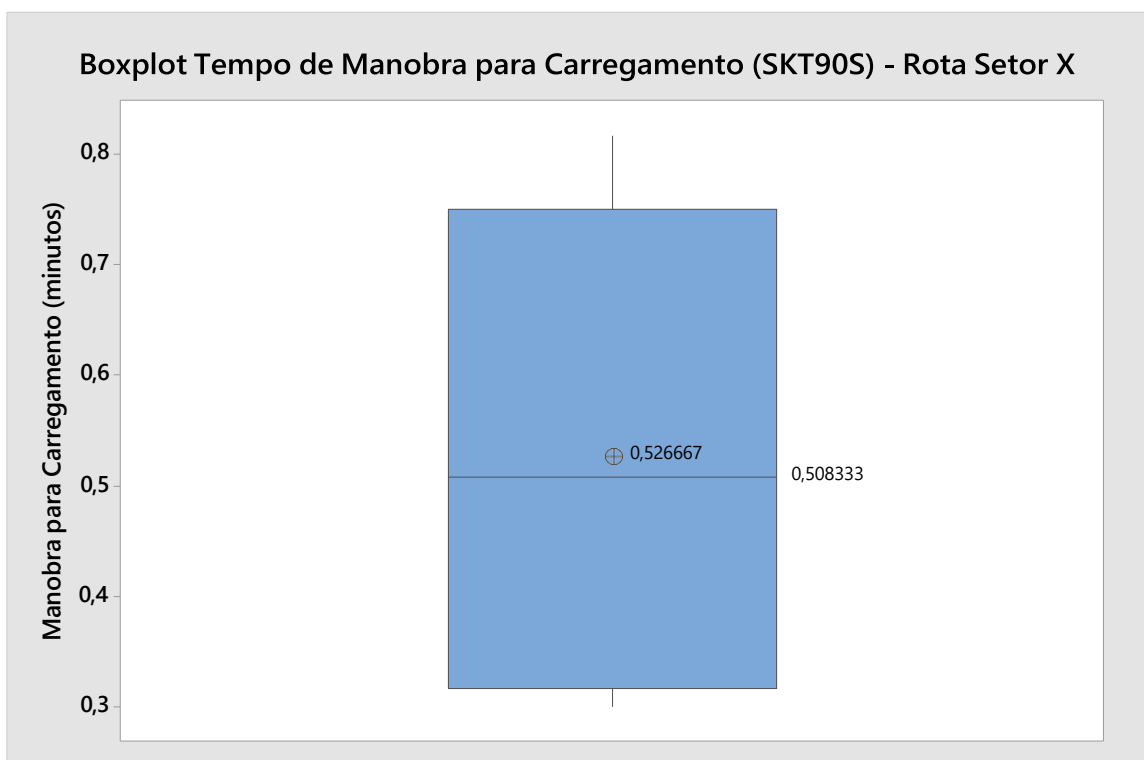


Figura 12 - Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de manobra para carregamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

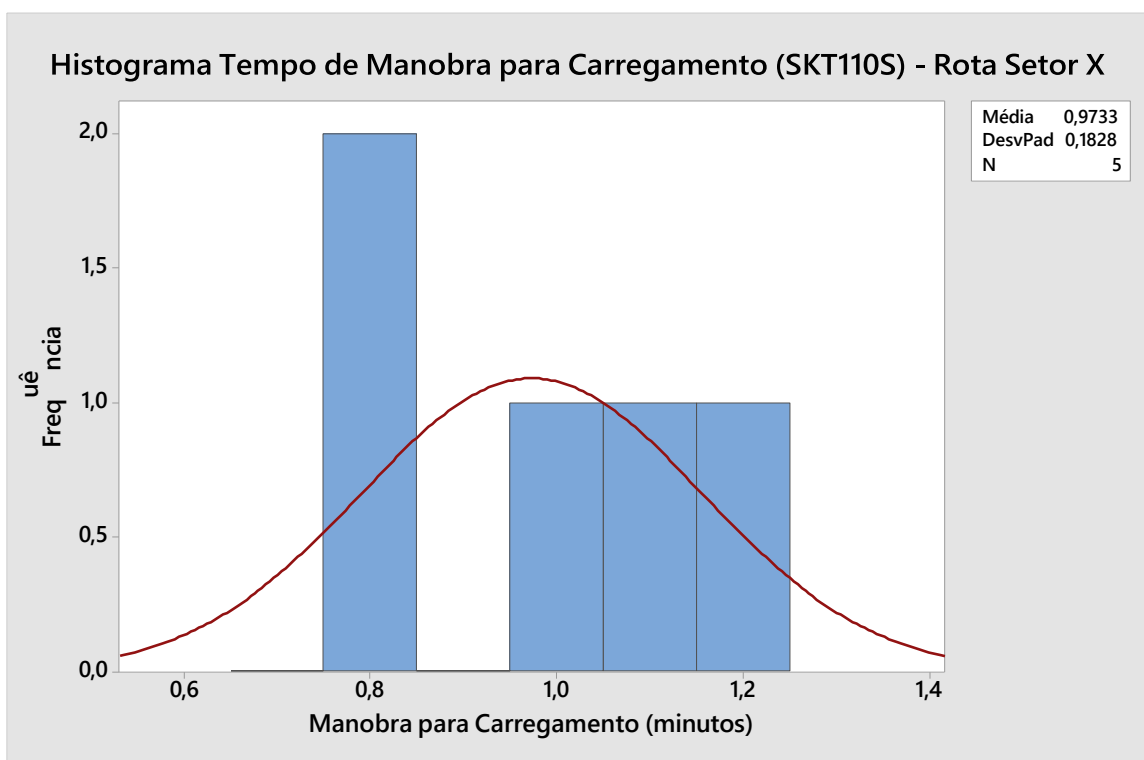


Figura 13 - Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X

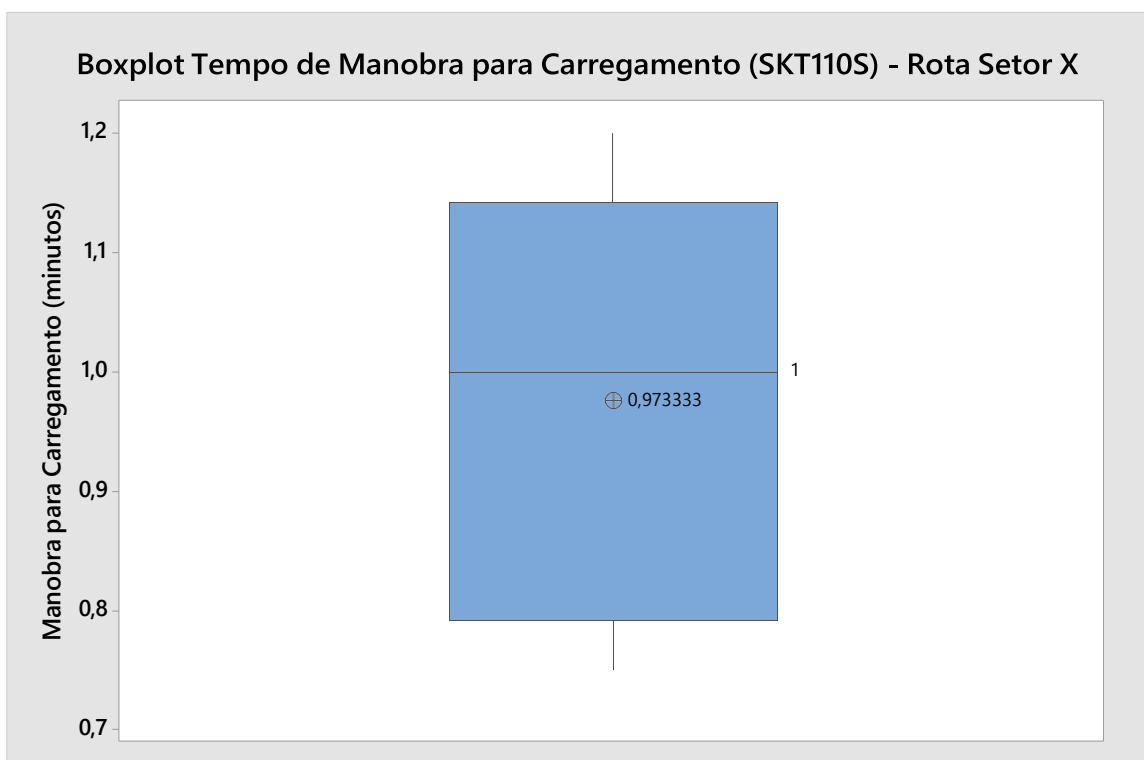


Figura 14 - Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige um tempo maior (0,97 minutos) de manobra para carregamento do que o caminhão SKT90S (0,53 minutos), o que se justifica pelas maiores dimensões do caminhão.

b) Tempo de Carregamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de carregamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

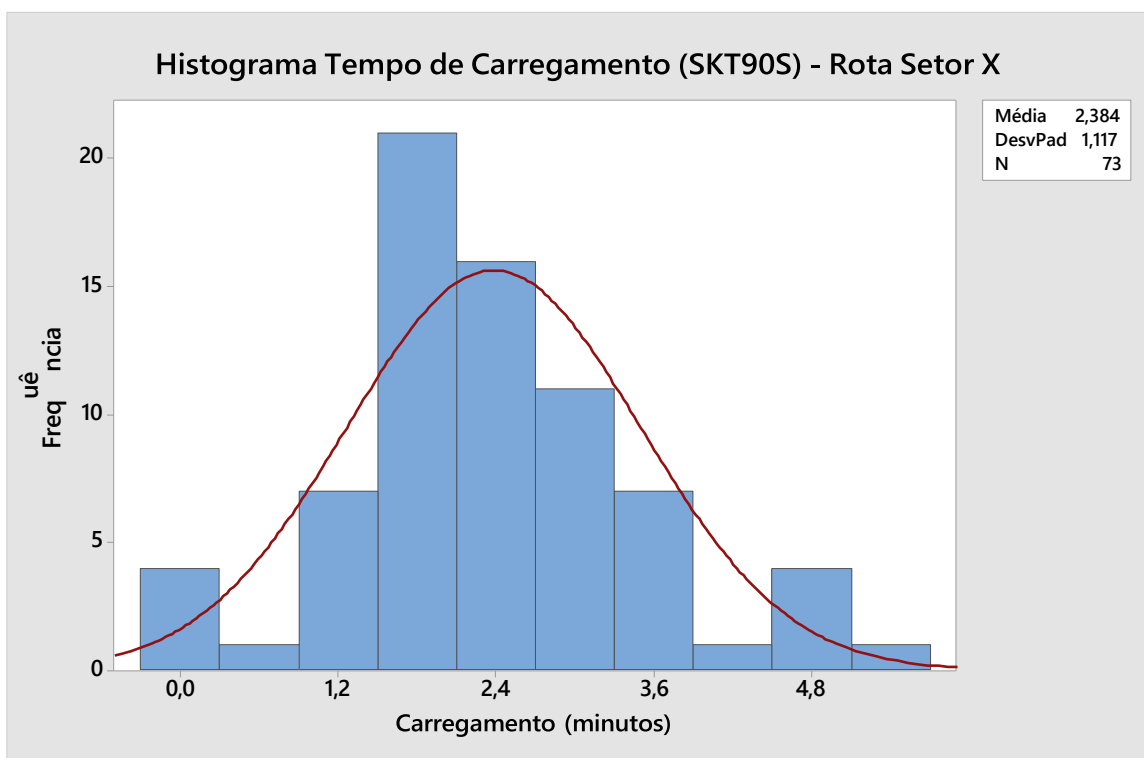


Figura 15 - Histograma Tempo de Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X

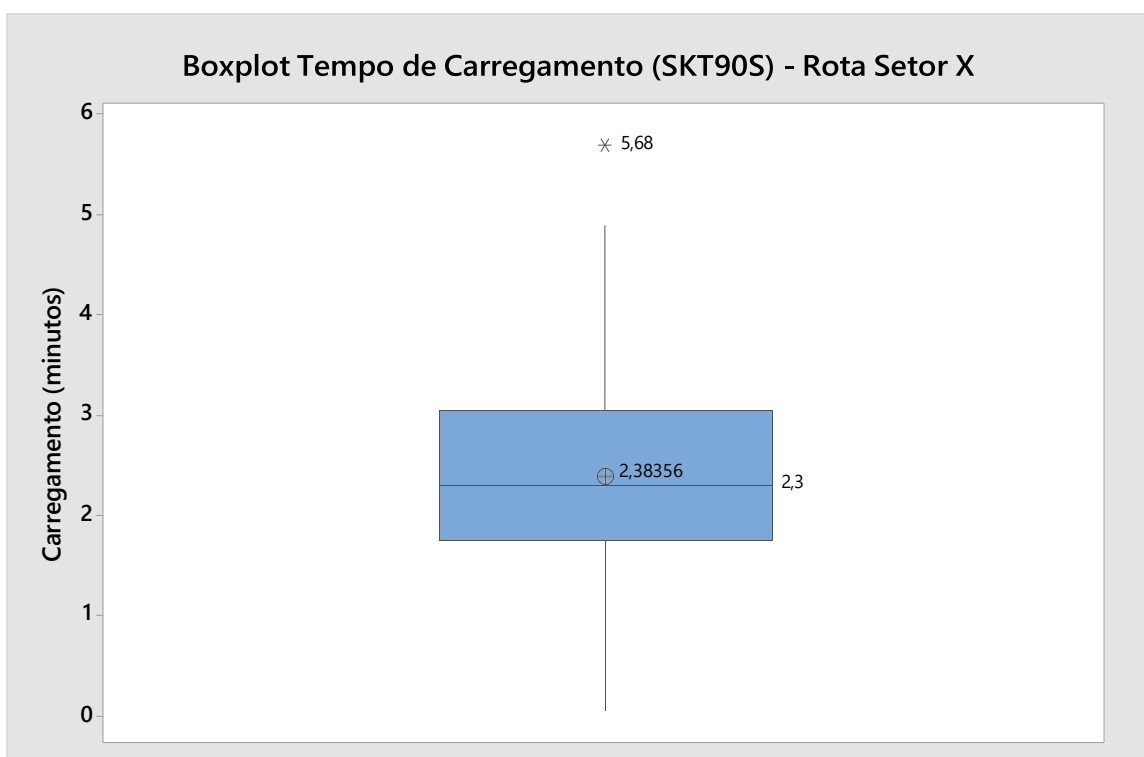


Figura 16 - Boxplot Tempo de Carregamento (SKT90S) - Rota Setor X

O boxplot tempo de carregamento do caminhão SKT90S apontou a presença de um *outlier* (5,68). Esse tempo elevado é justificado pela necessidade de a retroescavadeira realizar, eventualmente, o ajuste do seu platô de carregamento e a quebra da pilha de rejeito para facilitar

o enchimento da concha. Foram gerados novos boxplots e foram identificados novos *outliers* (0,07, 0,12, 0,15, 0,18, 0,42, 4,70, 4,75 e 4,88). Os tempos maiores que 1 minuto podem ser atribuídos ao motivo anterior, enquanto os tempos menores que 1 minuto se devem a apontamento incorreto dos operadores de caminhão. Vale ressaltar que o sistema de gestão de frota utilizado na empresa requer que os códigos sejam apontados manualmente (via operador ou sala de controle), isto é, não há nenhum reconhecimento automático que blinde o sistema a erros de apontamento.

A seguir, foram apresentados o histograma e boxplot sem a interferência dos *outliers*.

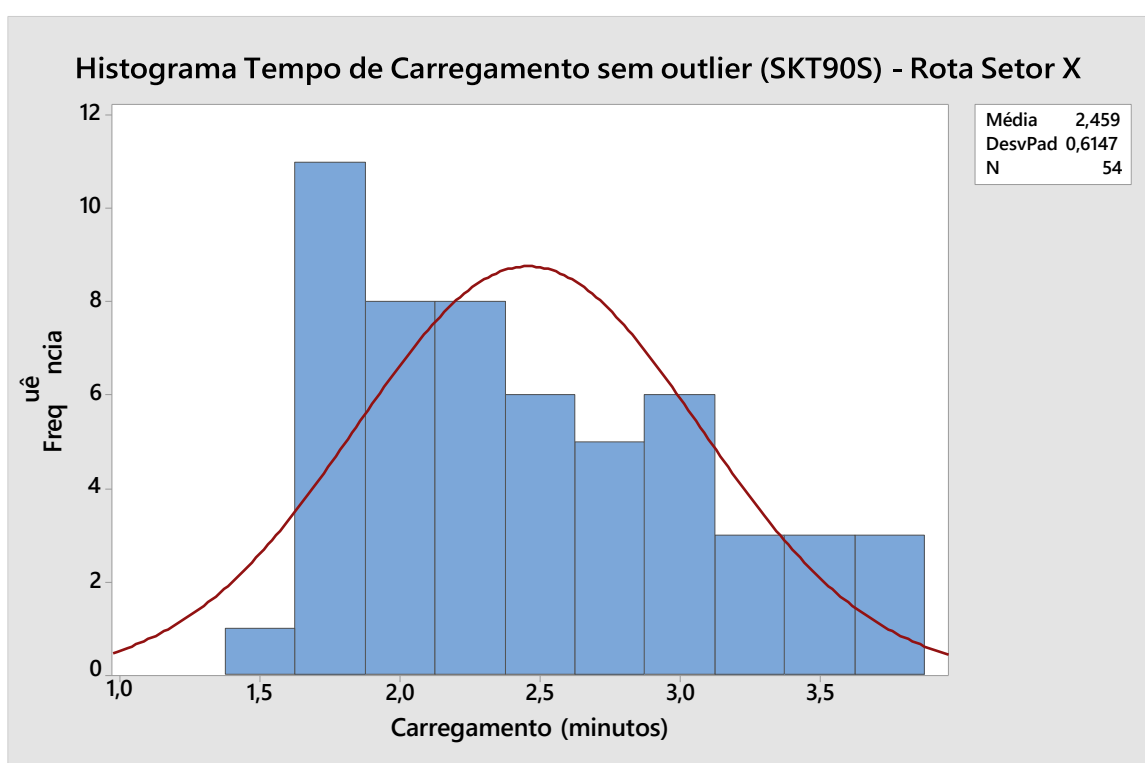


Figura 17 - Histograma Tempo de Carregamento sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X

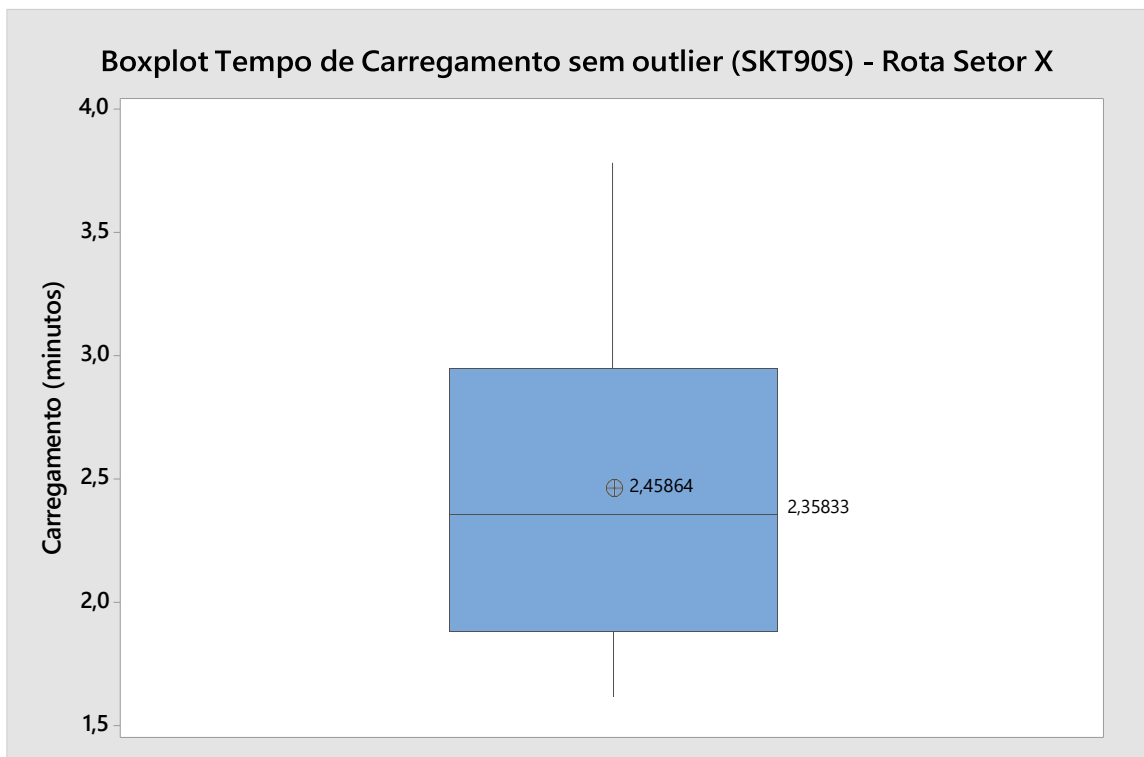


Figura 18 - Boxplot Tempo de Carregamento sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de carregamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

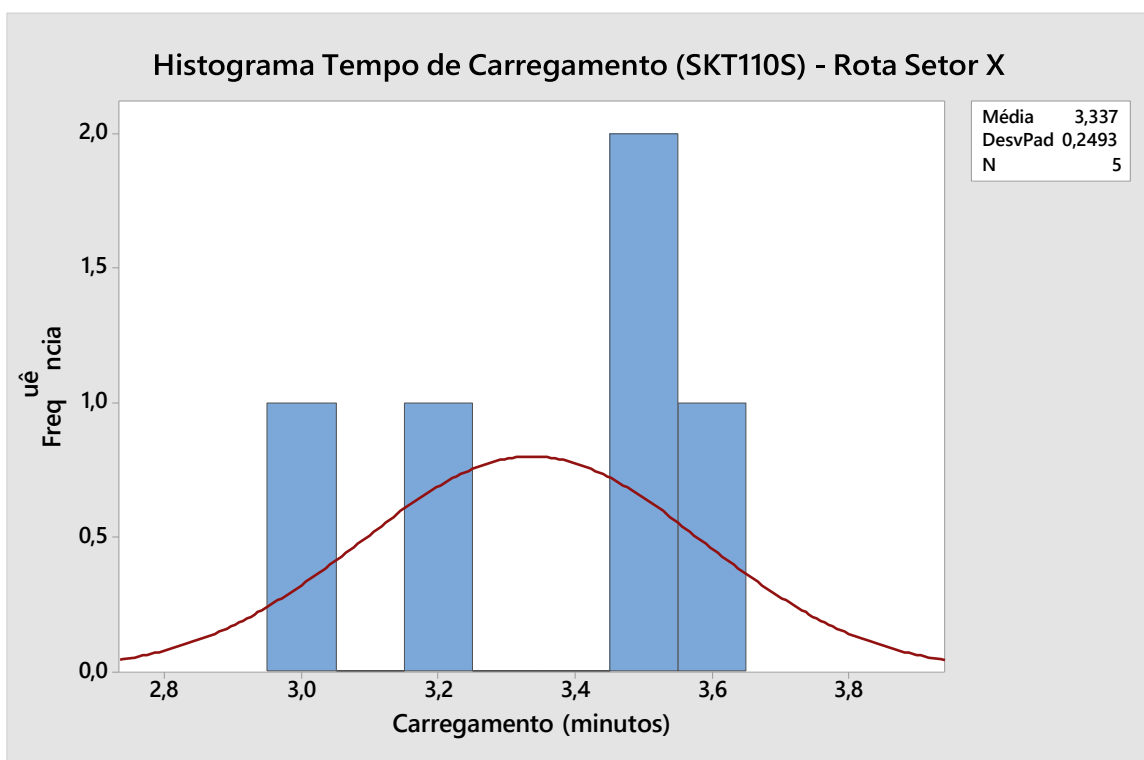


Figura 19 - Histograma Tempo de Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X

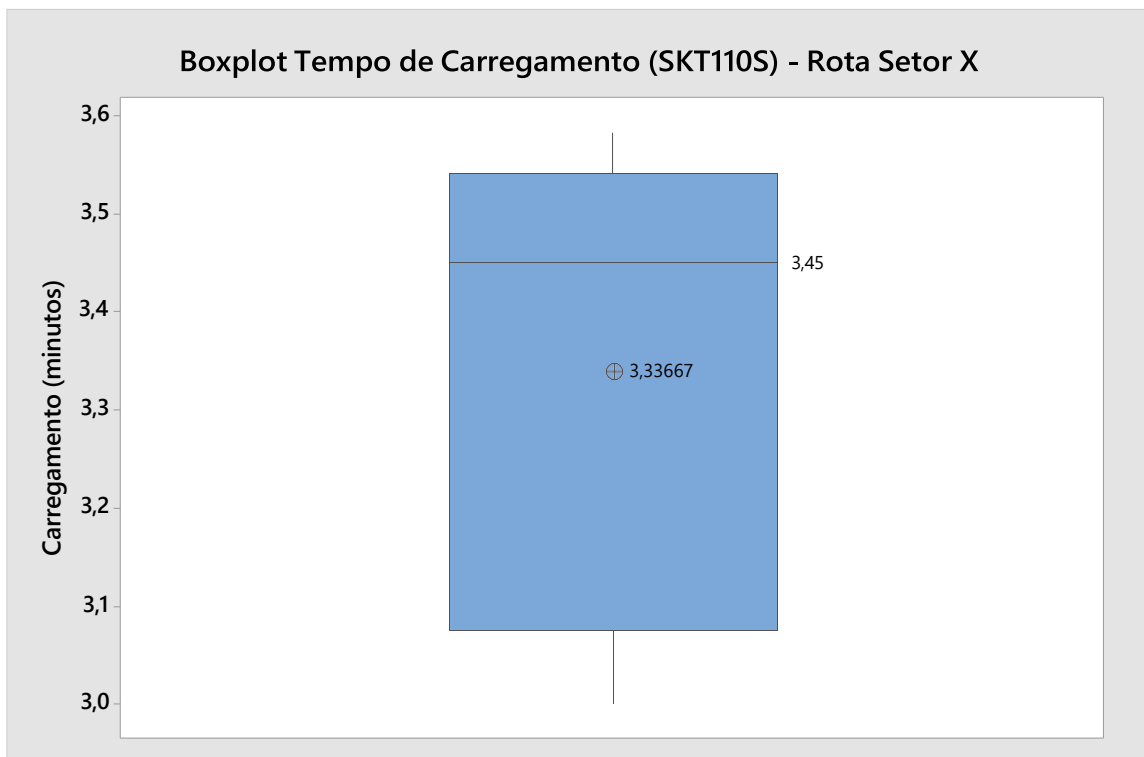


Figura 20 - Boxplot Tempo de Carregamento (SKT110S) - Rota Setor X

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige 0,88 minutos a mais de tempo de carregamento (3,34 minutos) do que o caminhão SKT90S (2,46 minutos), o que se justifica pela necessidade de dois passes a mais da retroescavadeira. Os tempos de passes também foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo. Em média, cada passe da retroescavadeira demanda 0,47 minutos, ou seja, dois passes demandariam 0,94 minutos, convergindo com a diferença observada de 0,88 minutos.

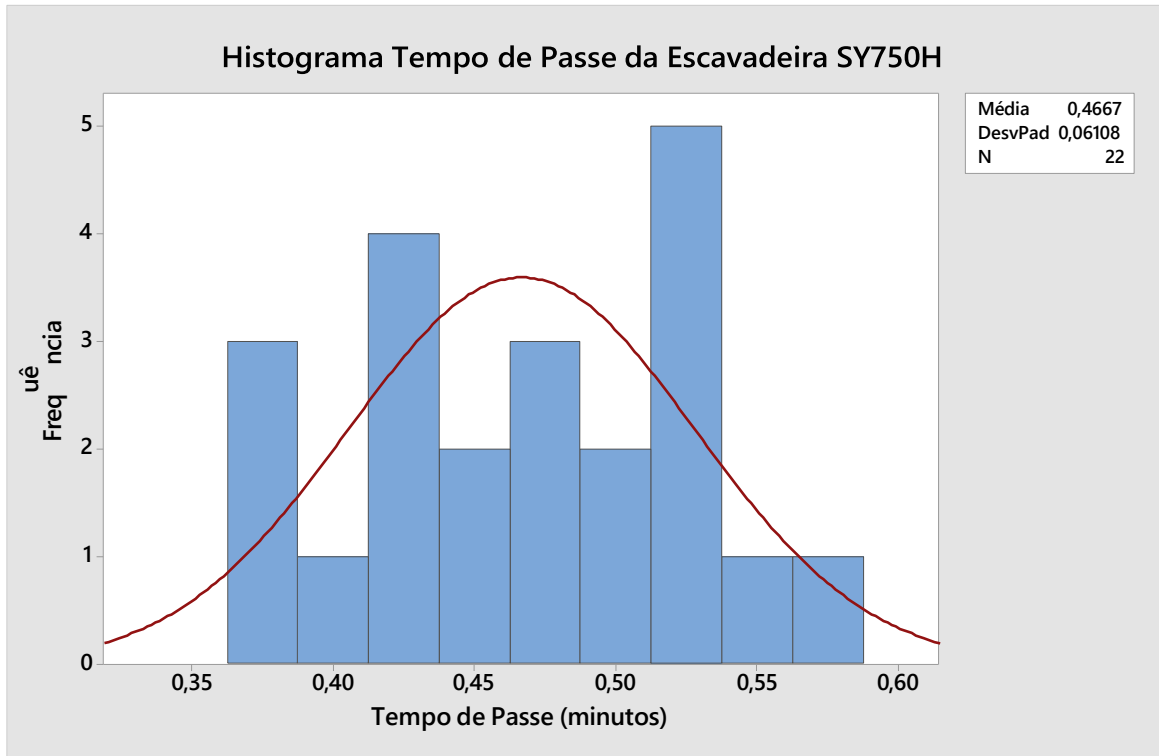


Figura 21 - Histograma Tempo de Passe da Retroescavadeira SY750H

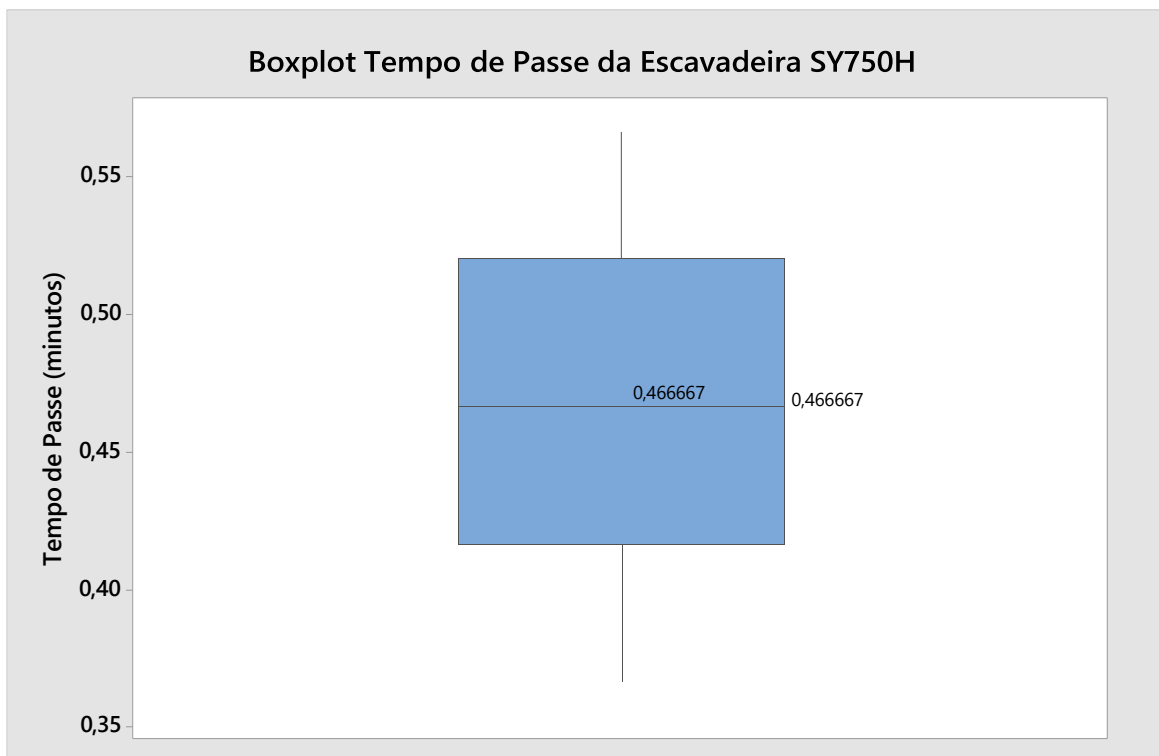


Figura 22 - Boxplot Tempo de Passe da Retroescavadeira SY750H

c) Tempo Operando Cheio

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos operando cheio foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

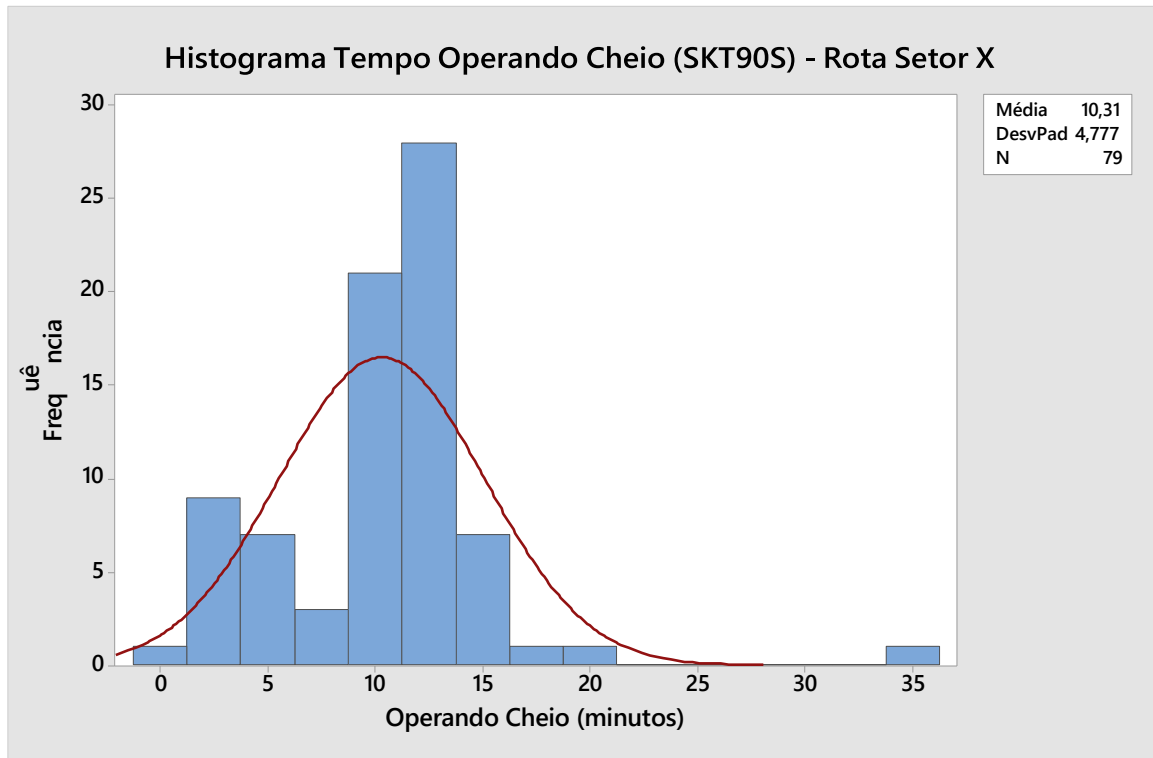


Figura 23 - Histograma Tempo Operando Cheio (SKT90S) - Rota Setor X

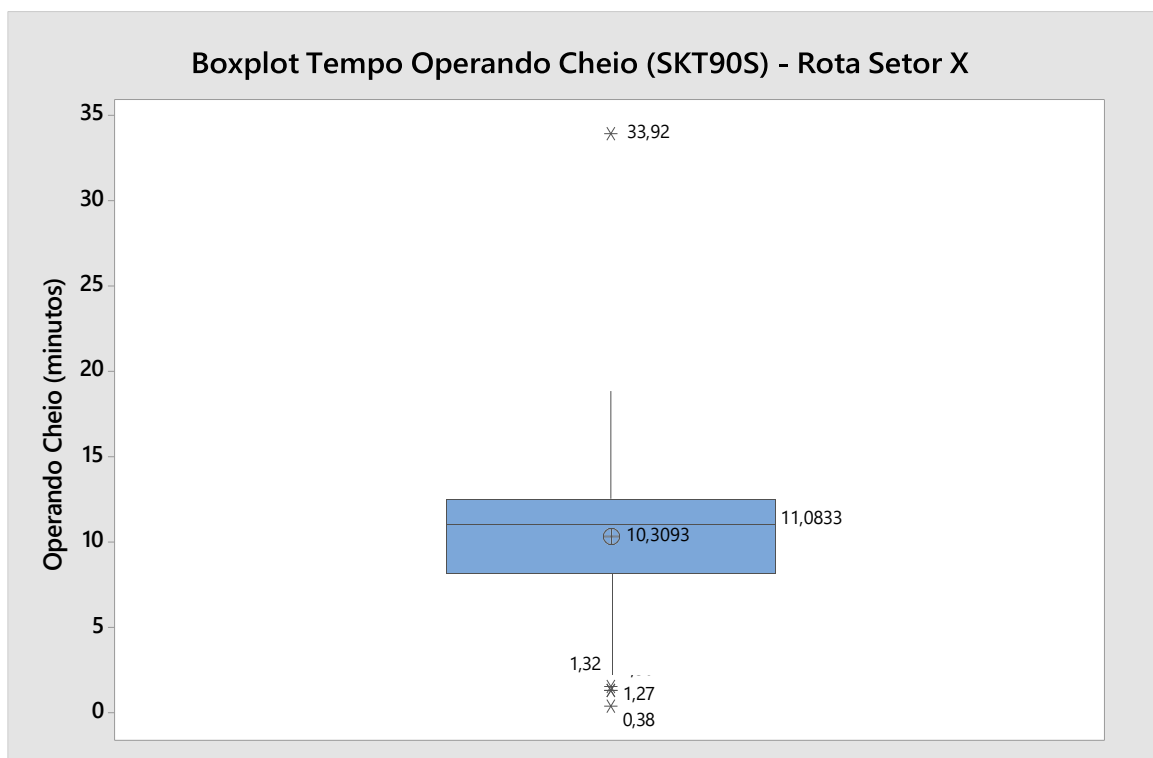


Figura 24 - Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT90S) - Rota Setor X

O boxplot tempo operando cheio do caminhão SKT90S apontou a presença de alguns *outliers*. Com exceção do valor de 33,92, que pode ser atribuído a filas ou algum evento que motivou paradas durante o deslocamento, como um pare e siga, por exemplo, os *outliers* menores que 2 minutos se devem a apontamento incorreto, uma vez que a DMT desse trajeto é 2,8 km, conforme a figura 3, e que é impossível um caminhão desse porte, carregado e com limitações de velocidade, percorrer esse trajeto em tempos tão pequenos. A seguir, foram apresentados o histograma e boxplot, gerados após a remoção dos *outliers*.

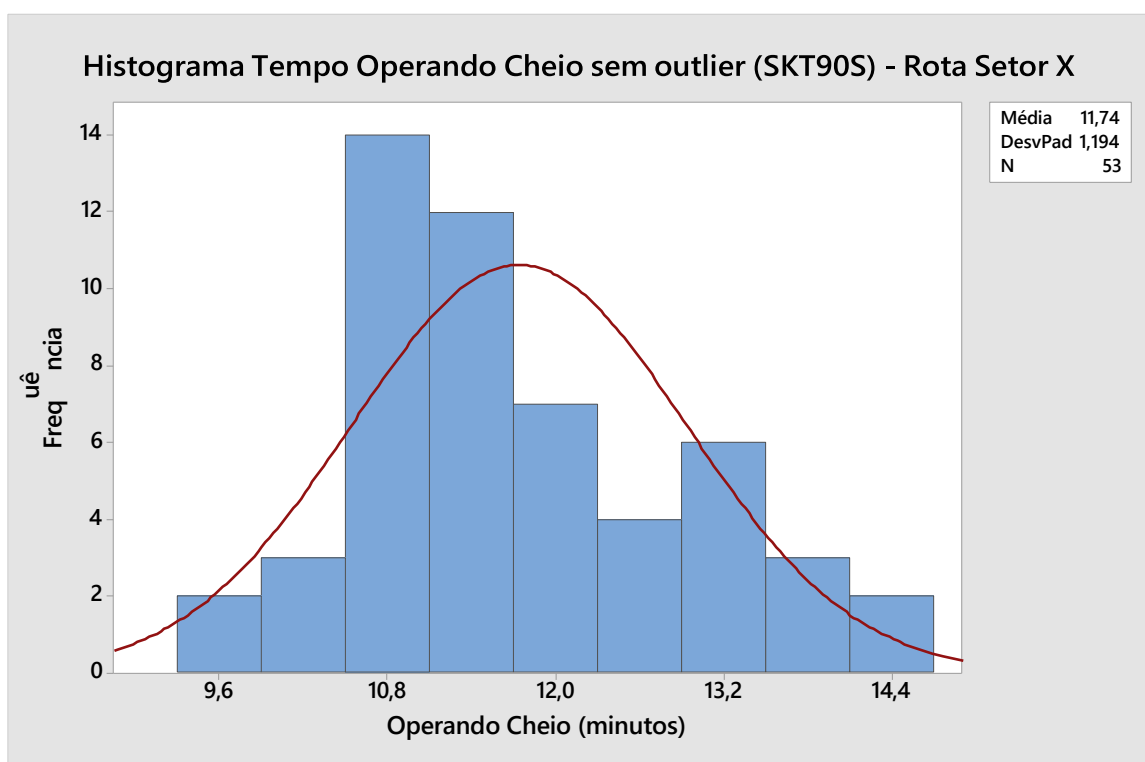


Figura 25 - Histograma Tempo Operando Cheio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X

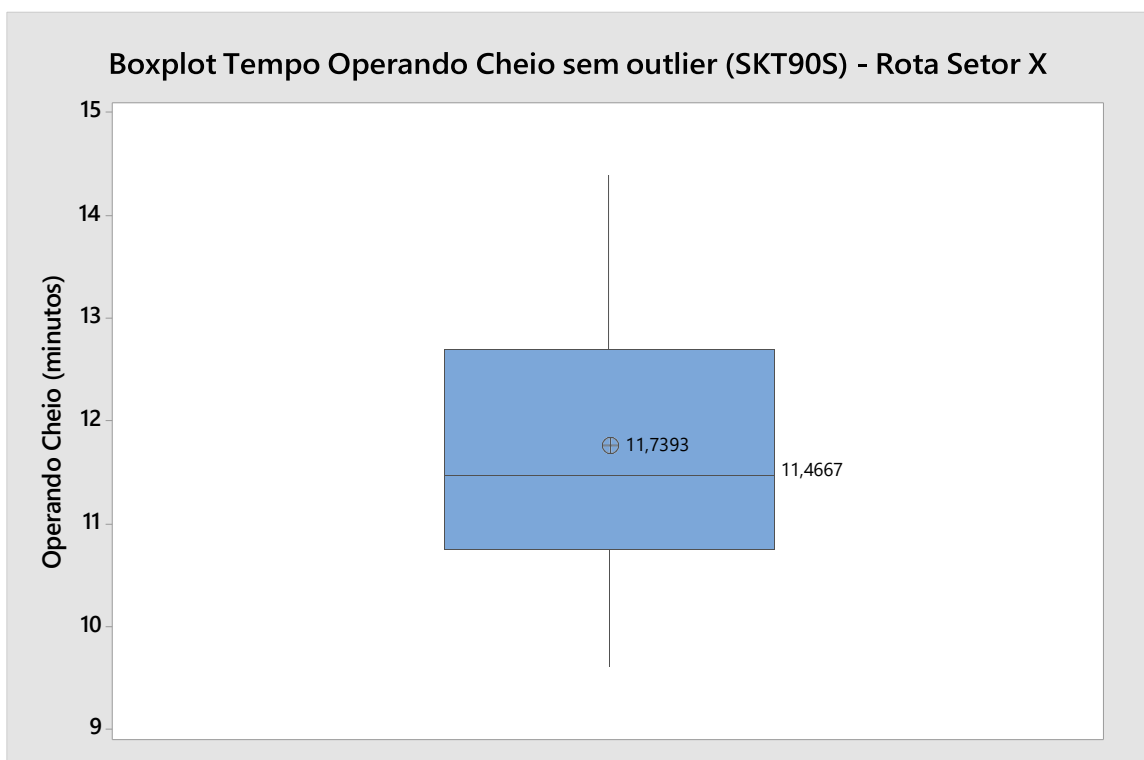


Figura 26 - Boxplot Tempo Operando Cheio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X

A velocidade média do SKT90 no trecho carregado foi calculada conforme a seguir:

$$Distância (km) = velocidade \left(\frac{km}{h} \right) \times tempo (h)$$

$$2,8 = velocidade \left(\frac{km}{h} \right) \times (11,74/60)$$

$$Velocidade \text{ média carregado SKT90S } \left(\frac{km}{h} \right) = 14,3$$

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos operando cheio foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

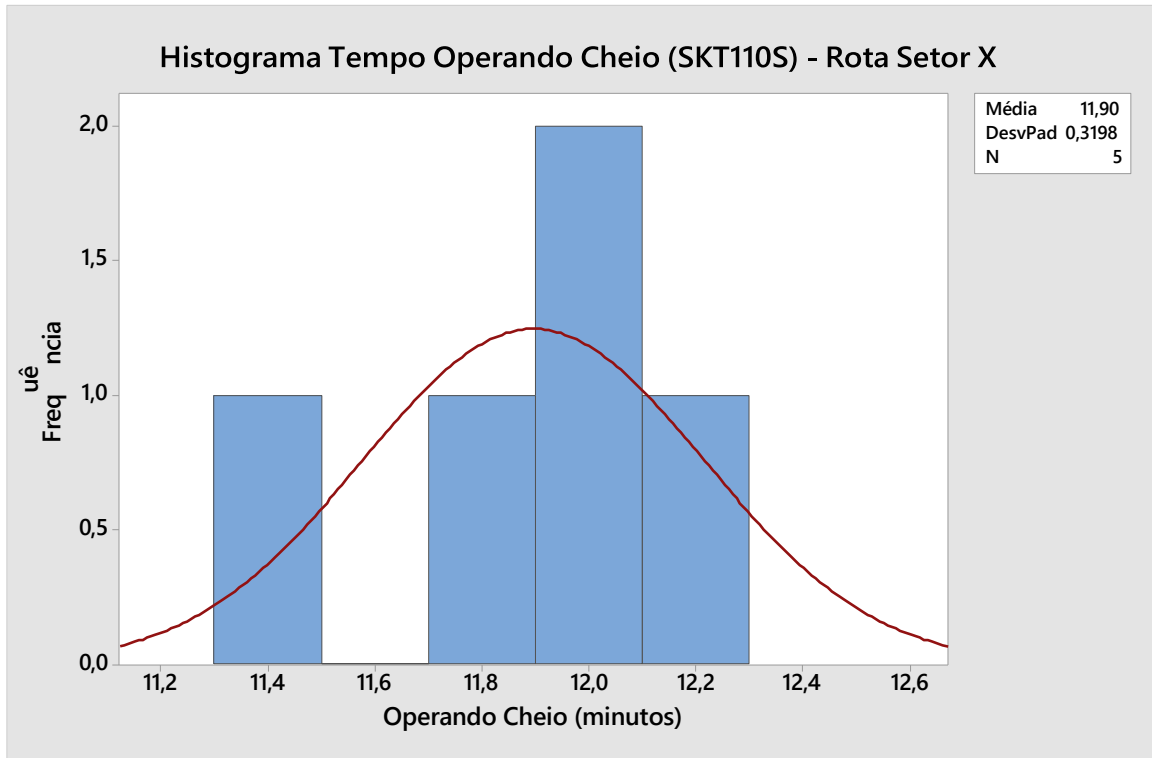


Figura 27 - Histograma Tempo Operando Cheio (SKT110S) - Rota Setor X

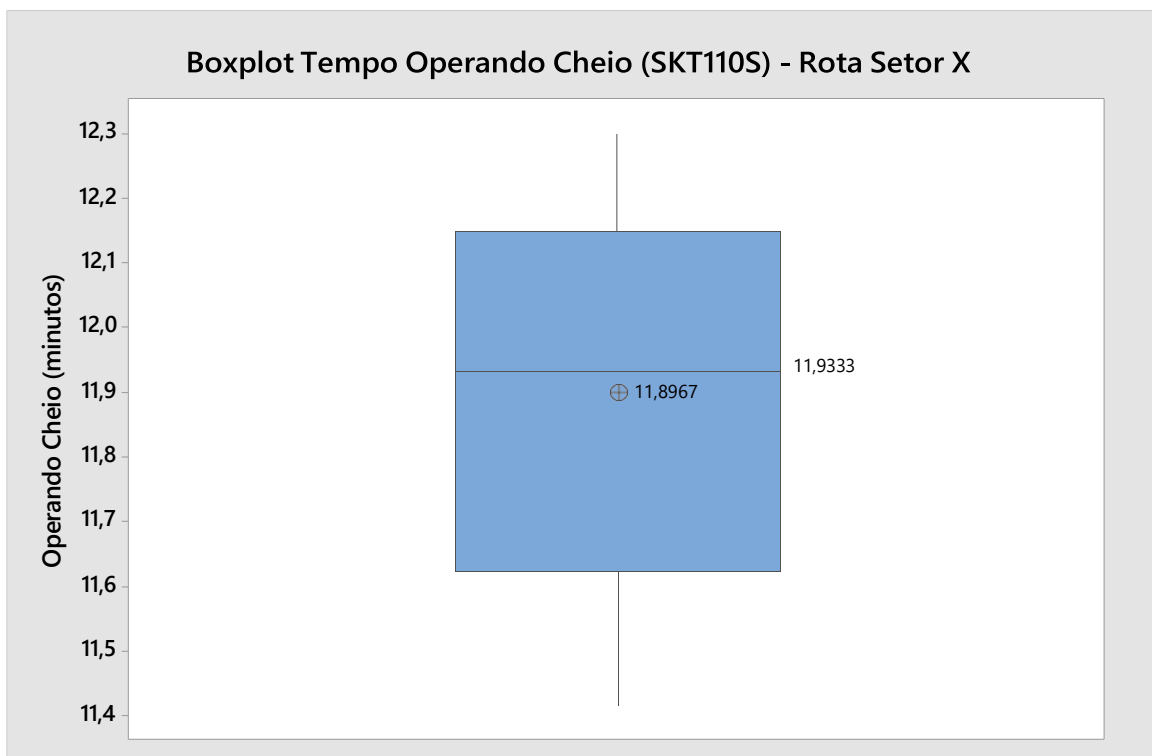


Figura 28 - Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT110S) - Rota Setor X

A velocidade média do SKT110 no trecho carregado foi calculada conforme a seguir:

$$\text{Distância (km)} = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times \text{tempo (h)}$$

$$2,8 = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times (11,90/60)$$

$$\text{Velocidade média carregado SKT110S} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = 14,1$$

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S levou um tempo (11,90 minutos) similar ao tempo do caminhão SKT90S (11,74 minutos) para deslocar do ponto de carregamento até o Setor X, o que sugere uma performance superior do SKT110S, visto que este transporta cerca de 15 toneladas a mais.

d) Tempo de Manobra para Basculamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de manobra para basculamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

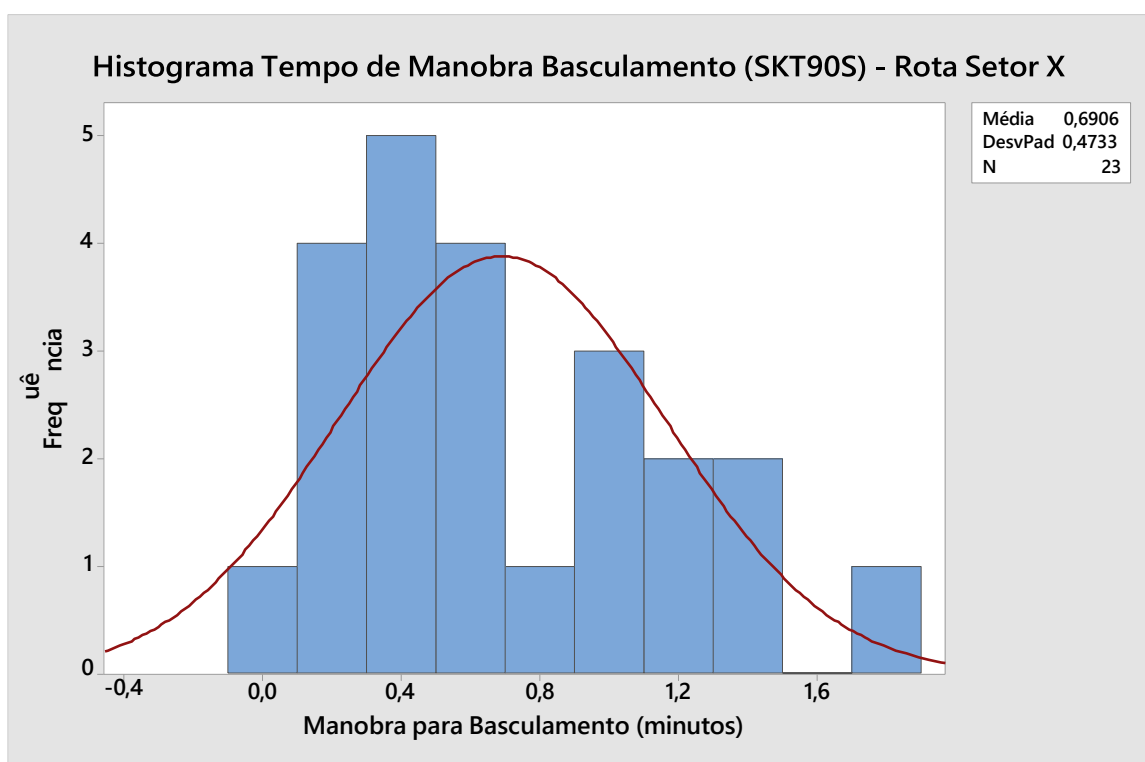


Figura 29 - Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X

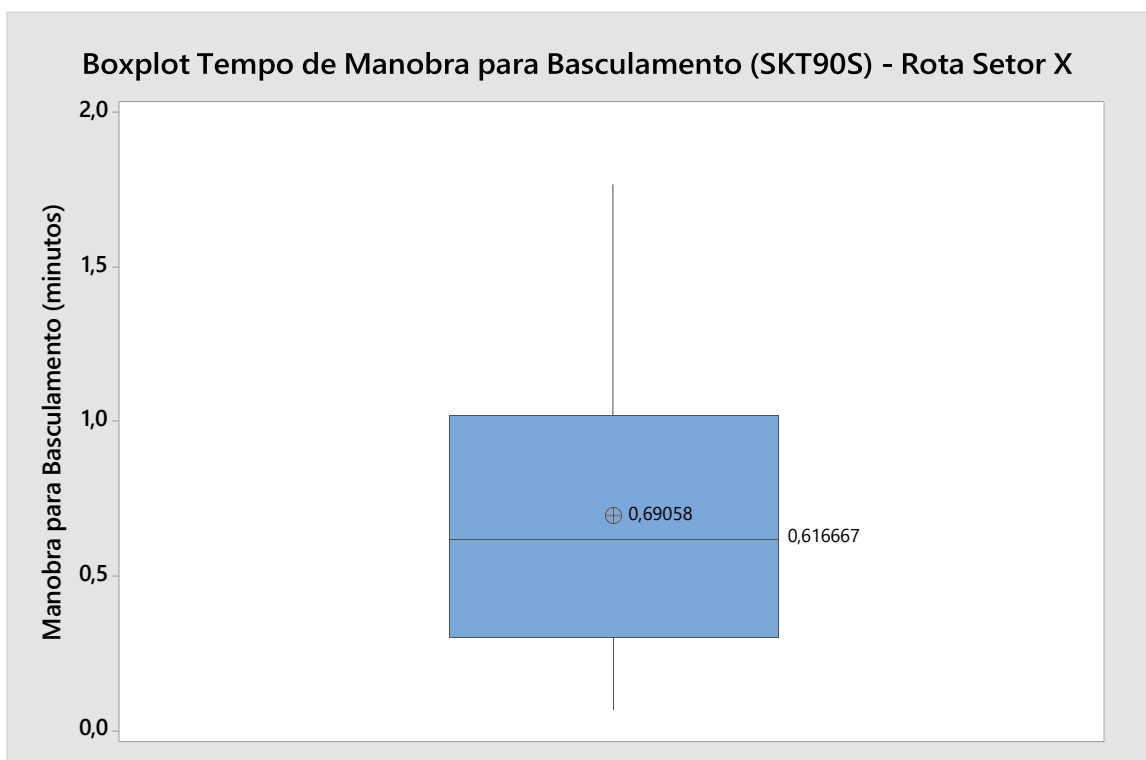


Figura 30 - Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de manobra para basculamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

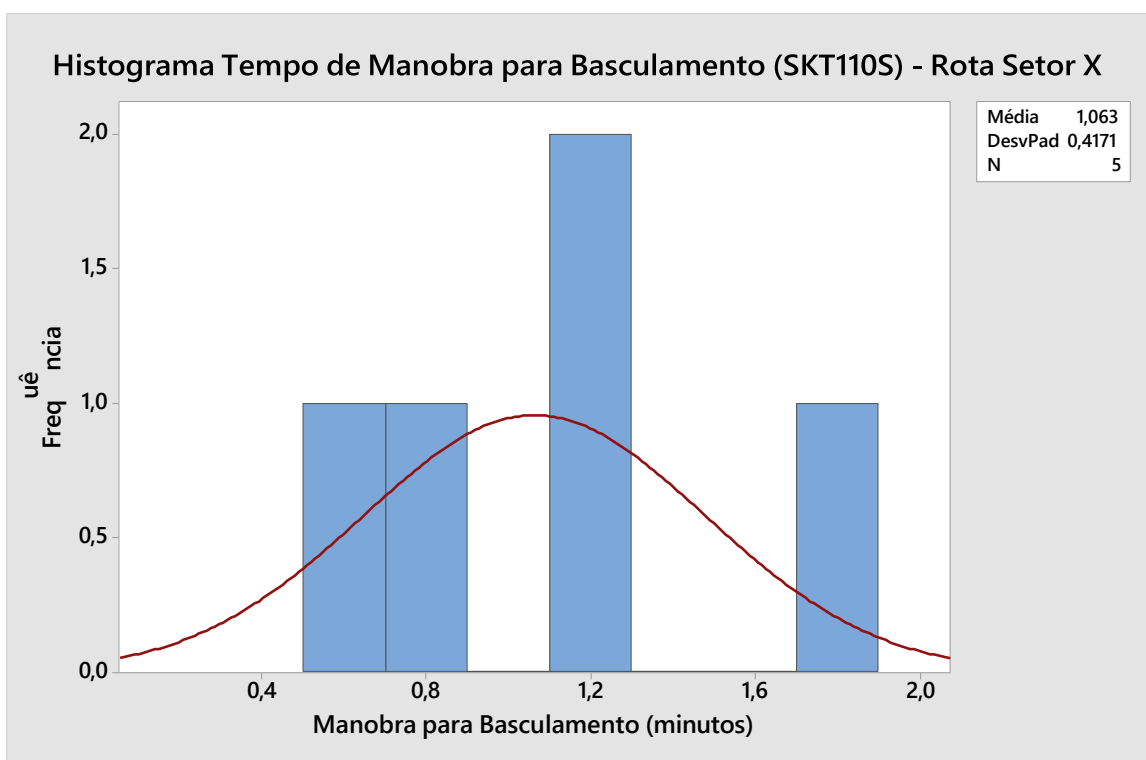


Figura 31 - Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X

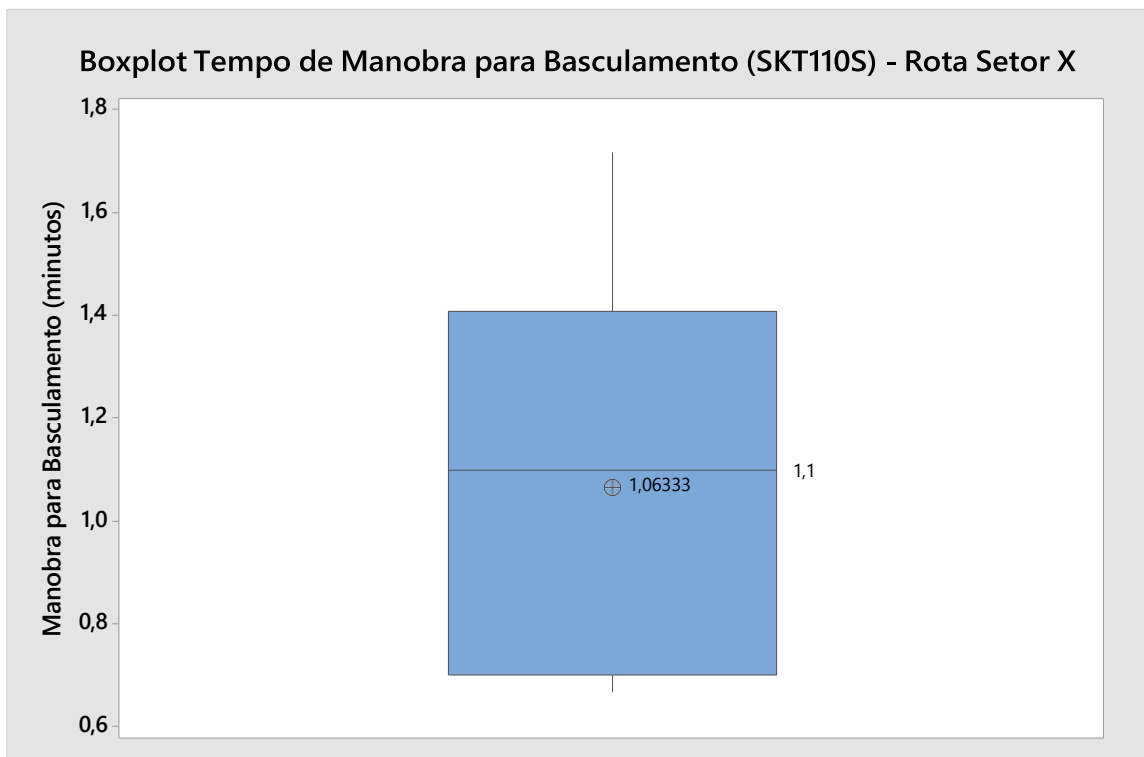


Figura 32 - Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige um tempo maior (1,06 minutos) de manobra para basculamento do que o caminhão SKT90S (0,69 minutos). Pode-se atribuir o tempo de manobra elevado às condições da praça de basculamento, especialmente do piso, uma vez que, por ser área de pilha, existe uma restrição geotécnica quanto à utilização de materiais de forro para melhorar as condições de tráfego dos equipamentos e tratar o surgimento de “borrachudos” na pista. Dessa forma, com o tráfego intenso de caminhões carregados e a impossibilidade de forrar as vias com material competente, o tempo de manobra na praça se eleva e se agrava com o porte do SKT110S.

e) Tempo de Basculamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de basculamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

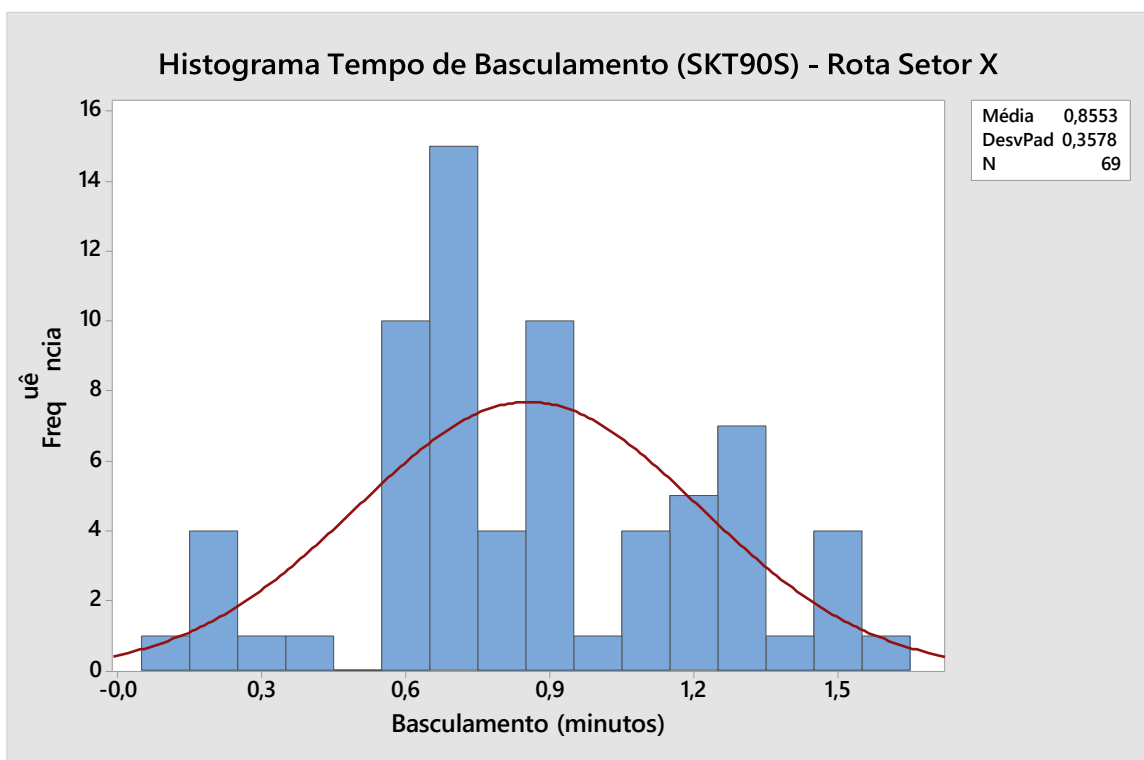


Figura 33 - Histograma Tempo de Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X

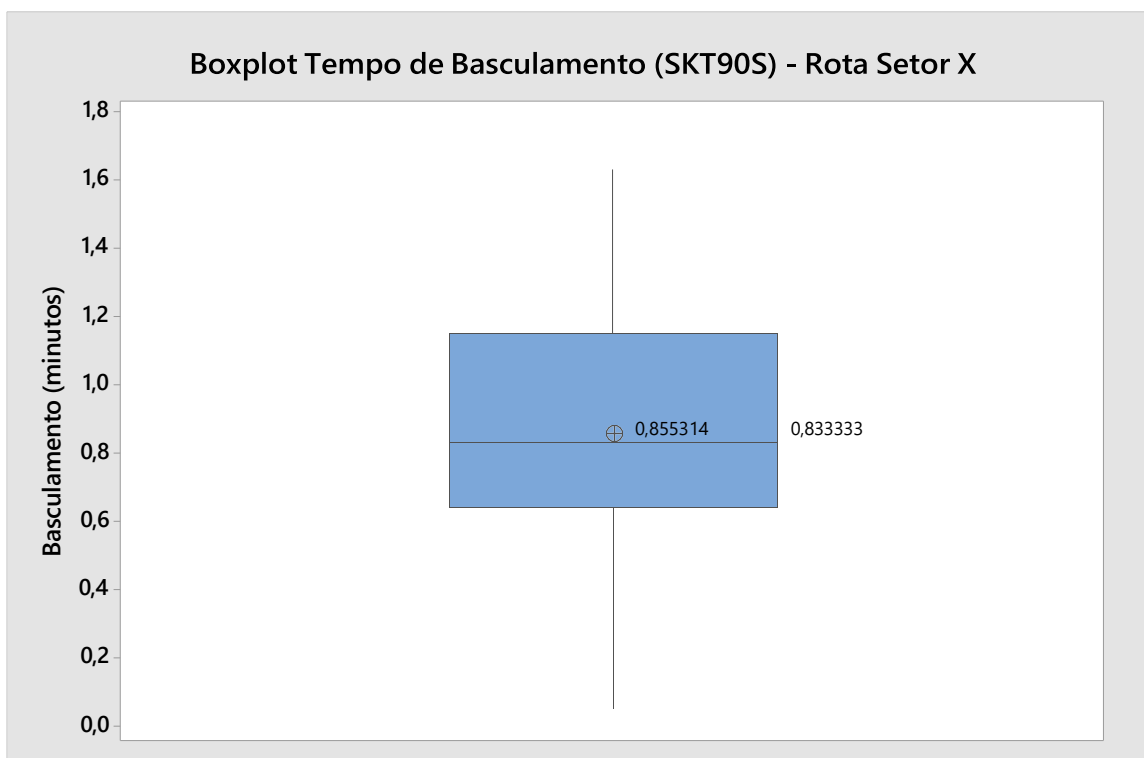


Figura 34 - Boxplot Tempo de Basculamento (SKT90S) - Rota Setor X

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de basculamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

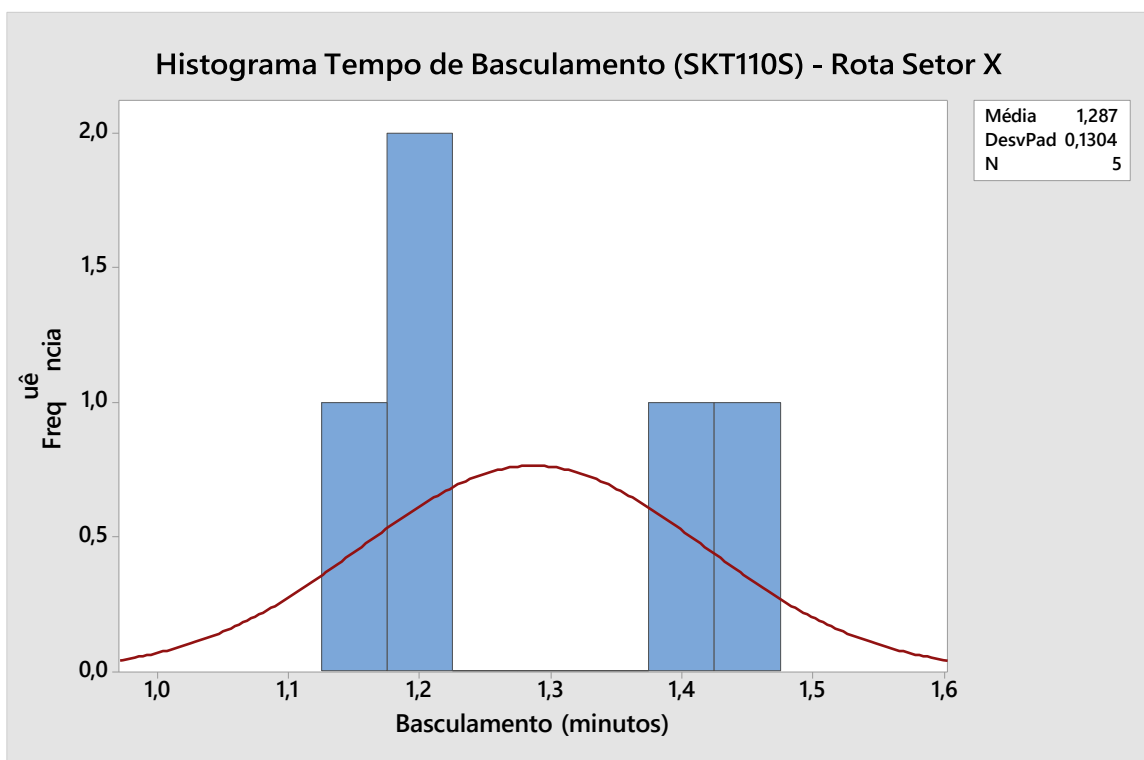


Figura 35 - Histograma Tempo de Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X

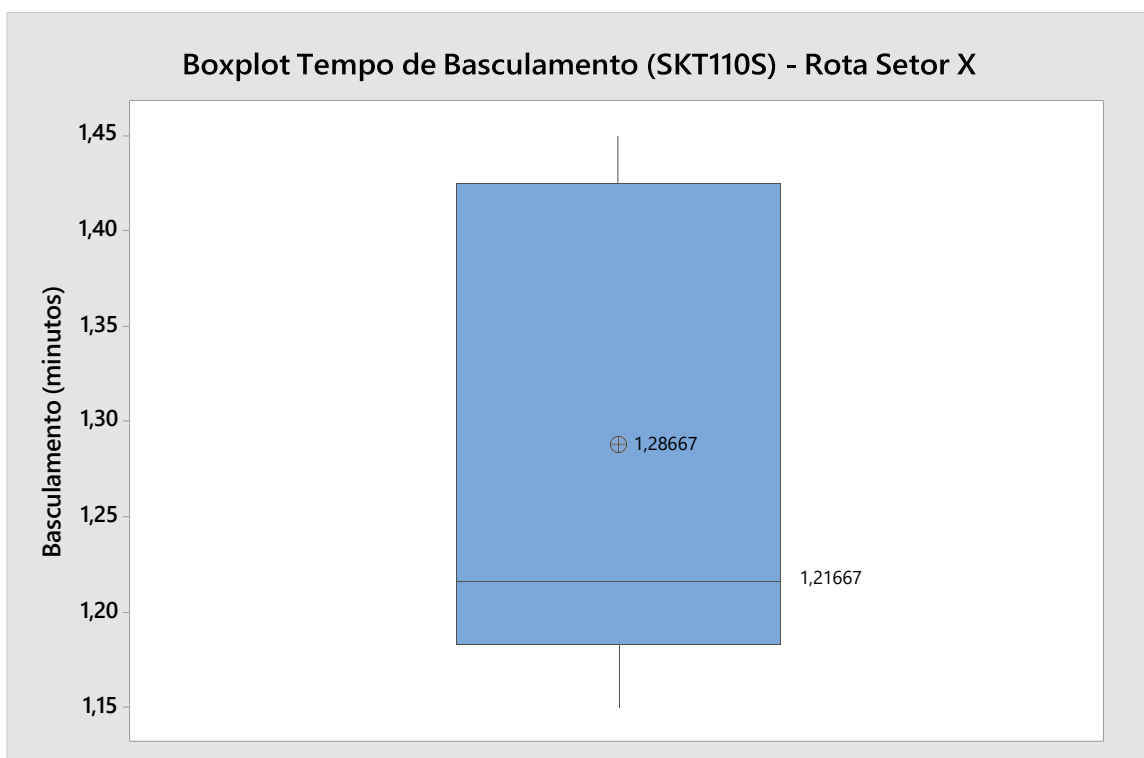


Figura 36 - Boxplot Tempo de Basculamento (SKT110S) - Rota Setor X

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige um tempo maior (1,29 minutos) de basculamento do que o caminhão SKT90S (0,86 minutos), o que se justifica pelas maiores dimensões do caminhão.

Além disso, vale ressaltar o problema da carga morta, presente na frota SKT90S e que se agrava no SKT110S. Em função da umidade média elevada do rejeito filtrado (~18%), o material se prende à balsa dos caminhões, demandando maior tempo de basculamento durante as tentativas de desprendimento do material.

f) Tempo Operando Vazio

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos operando vazio foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

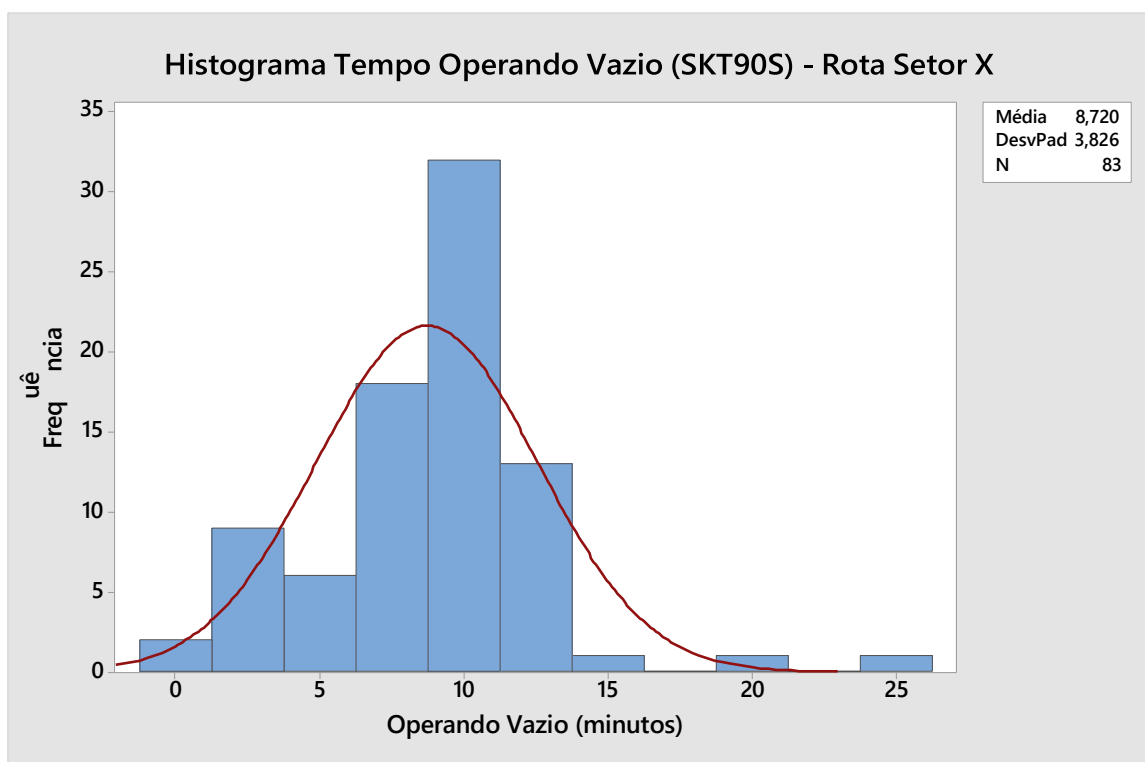


Figura 37 - Histograma Tempo Operando Vazio (SKT90S) - Rota Setor X

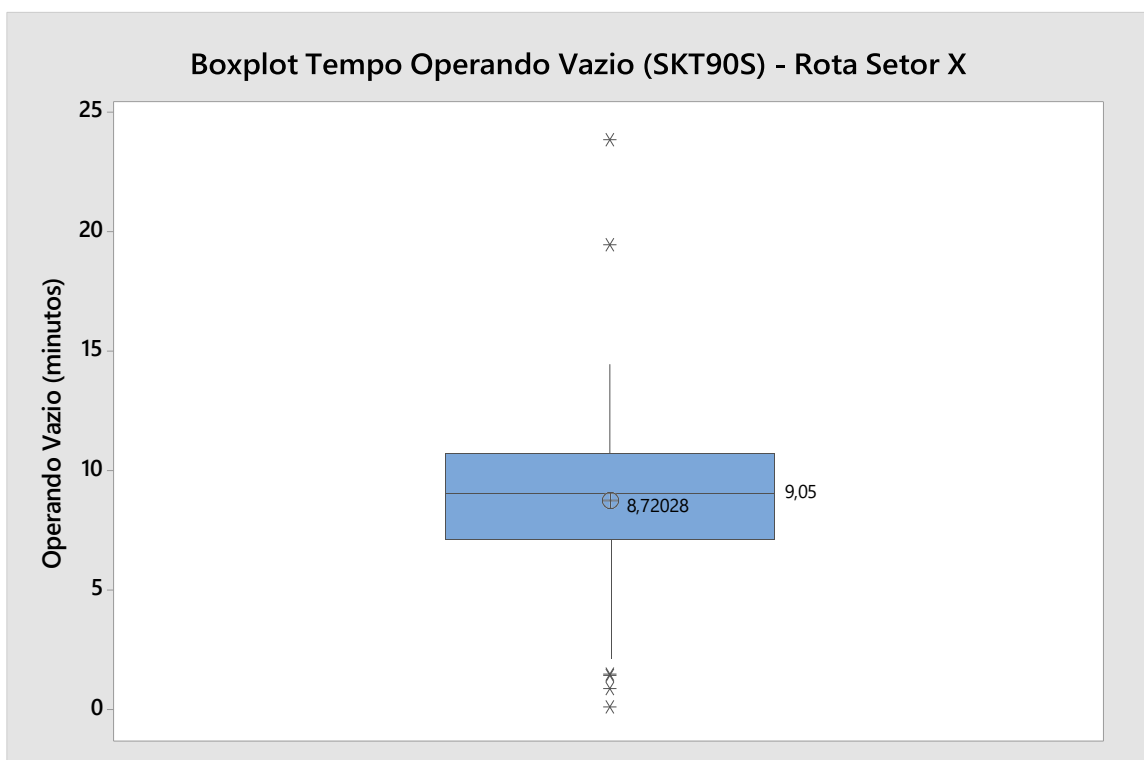


Figura 38 - Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT90S) - Rota Setor X

O boxplot tempo operando vazio do caminhão SKT90S apontou a presença de alguns *outliers*. Com exceção dos dois valores de acima de 15 minutos, que podem ser atribuídos a filas ou algum evento que motivou paradas durante o deslocamento, como um pare e siga, por exemplo, os *outliers* menores que 5 minutos se devem a apontamento incorreto, uma vez que a DMT desse trajeto é 2,8 km, conforme a figura 3, e que é impossível um caminhão desse porte e com limitações de velocidade, percorrer esse trajeto em tempos tão pequenos. A seguir, foram apresentados o histograma e boxplot, gerados após a remoção dos *outliers*.

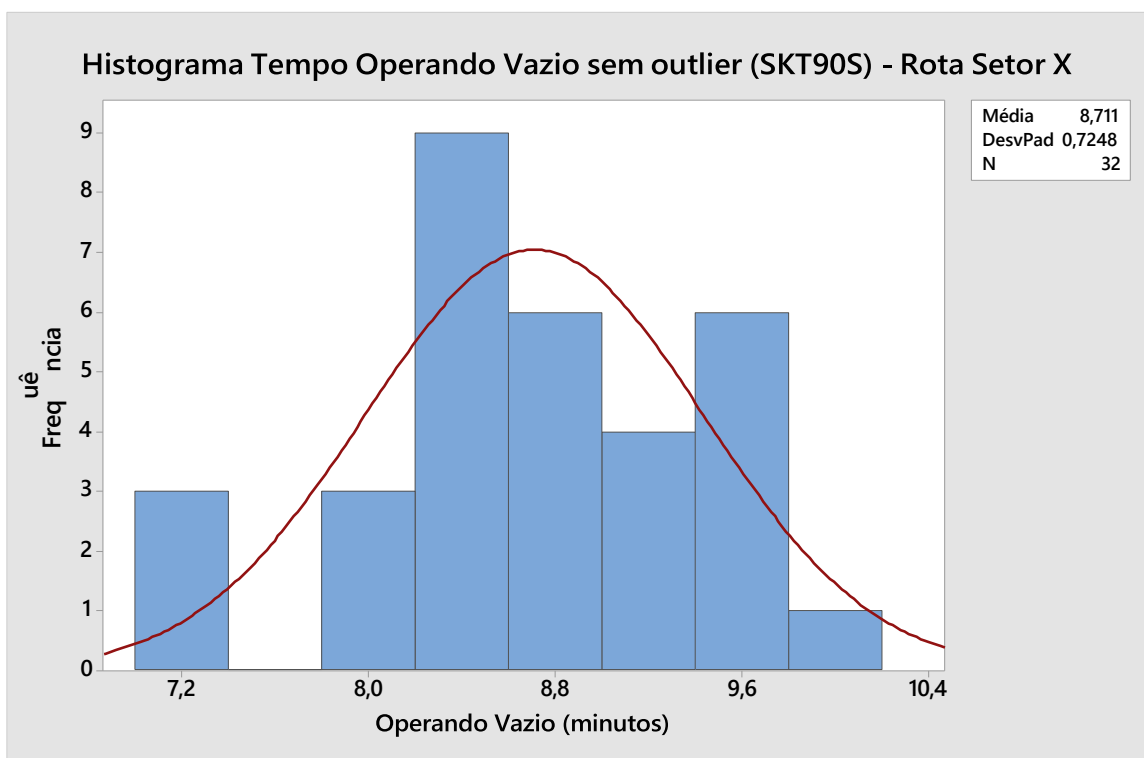


Figura 39 - Histograma Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X

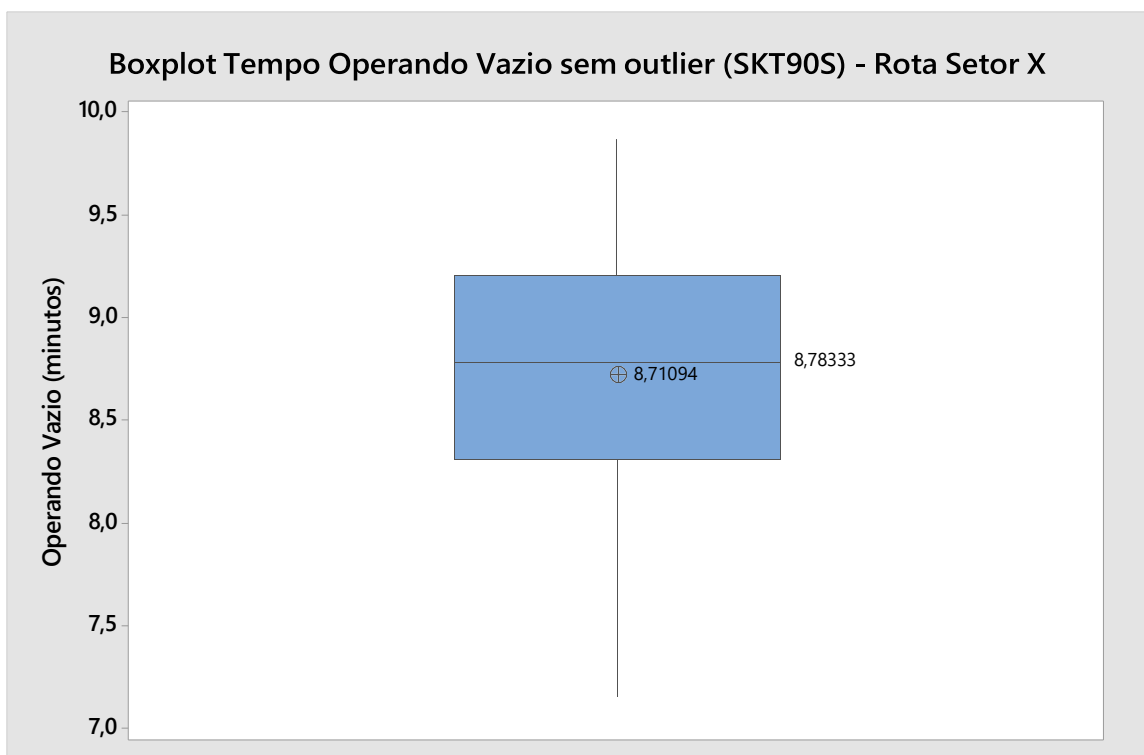


Figura 40 - Boxplot Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) - Rota Setor X

A velocidade média do SKT90 no trecho vazio foi calculada conforme a seguir:

$$Distância (km) = velocidade \left(\frac{km}{h} \right) \times tempo (h)$$

$$2,8 = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times (8,71/60)$$

$$\text{Velocidade média vazio SKT90S} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = 19,3$$

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos operando vazio foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

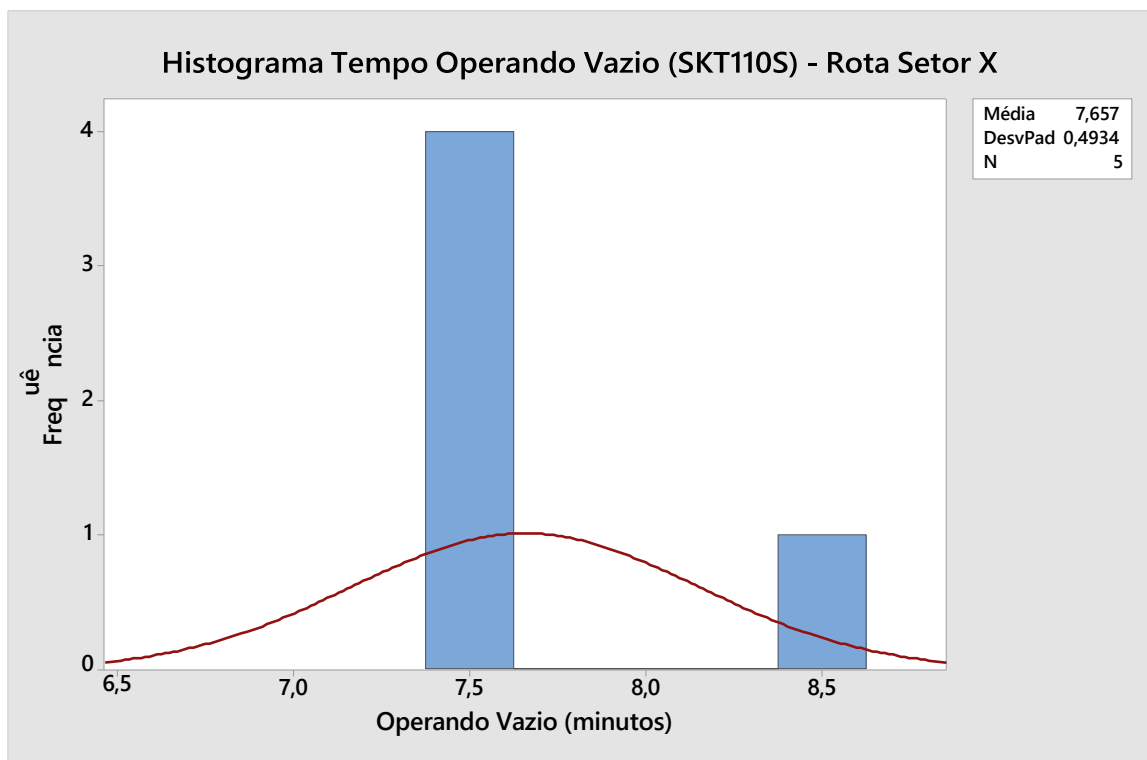


Figura 41 - Histograma Tempo Operando Vazio (SKT110S) - Rota Setor X

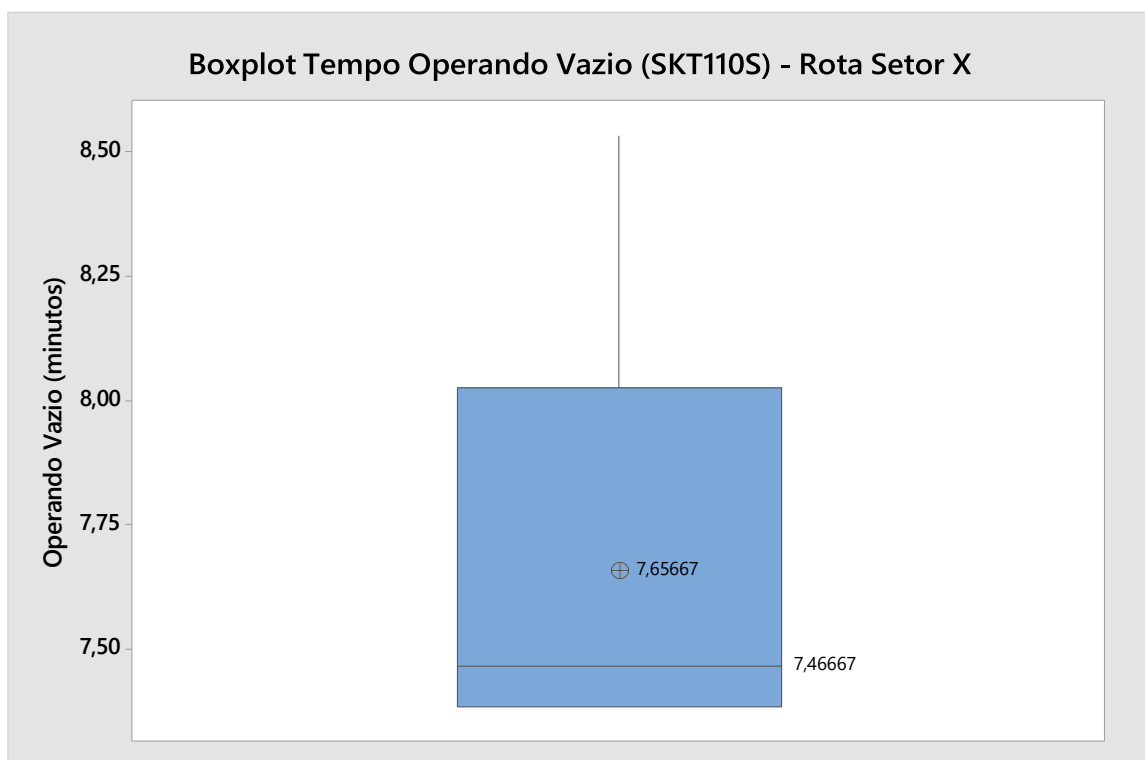


Figura 42 - Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT110S) - Rota Setor X

A velocidade média do SKT110 no trecho vazio foi calculada conforme a seguir:

$$\text{Distância (km)} = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times \text{tempo (h)}$$

$$2,8 = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times (7,66/60)$$

$$\text{Velocidade média vazio SKT110S} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = 21,9$$

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S levou um tempo (7,66 minutos) menor se comparado ao tempo do caminhão SKT90S (8,71 minutos) para deslocar do ponto de basculamento até a praça de carregamento, o que sugere uma performance superior do SKT110S, visto que este pesa cerca de 5 toneladas a mais, conforme as tabelas 1 e 2.

g) Tempo de Ciclo

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de ciclo foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

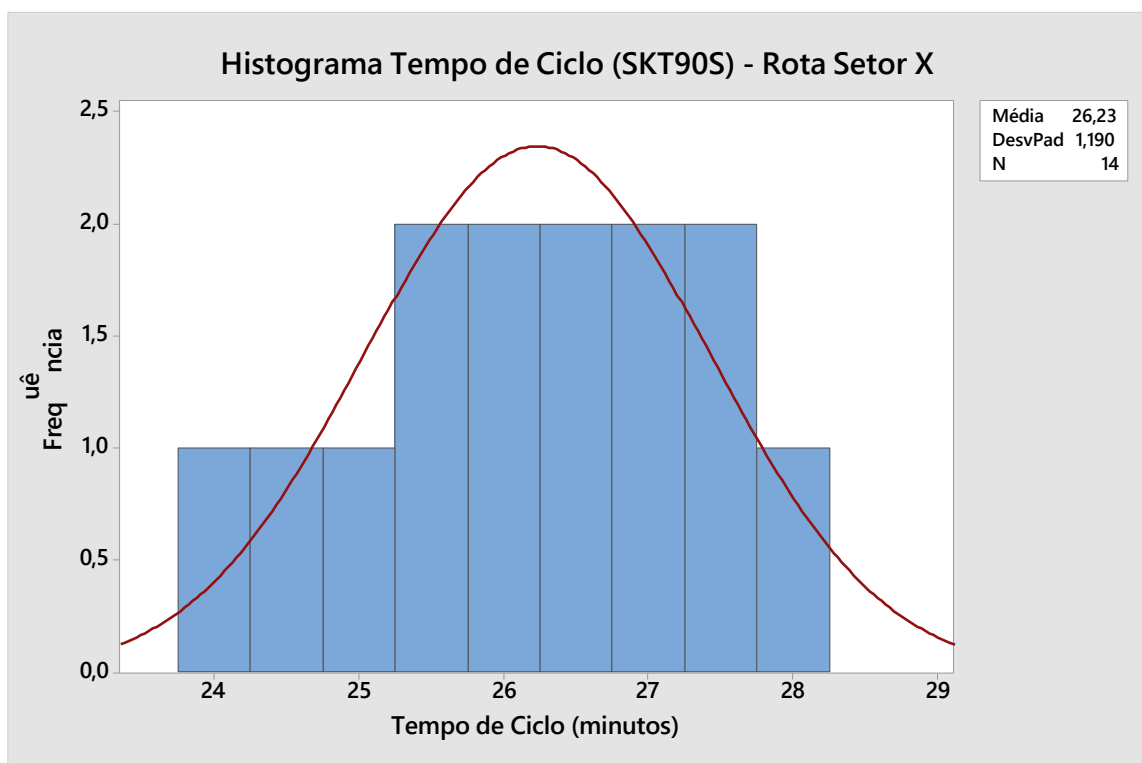


Figura 43 - Histograma Tempo de Ciclo (SKT90S) - Rota Setor X

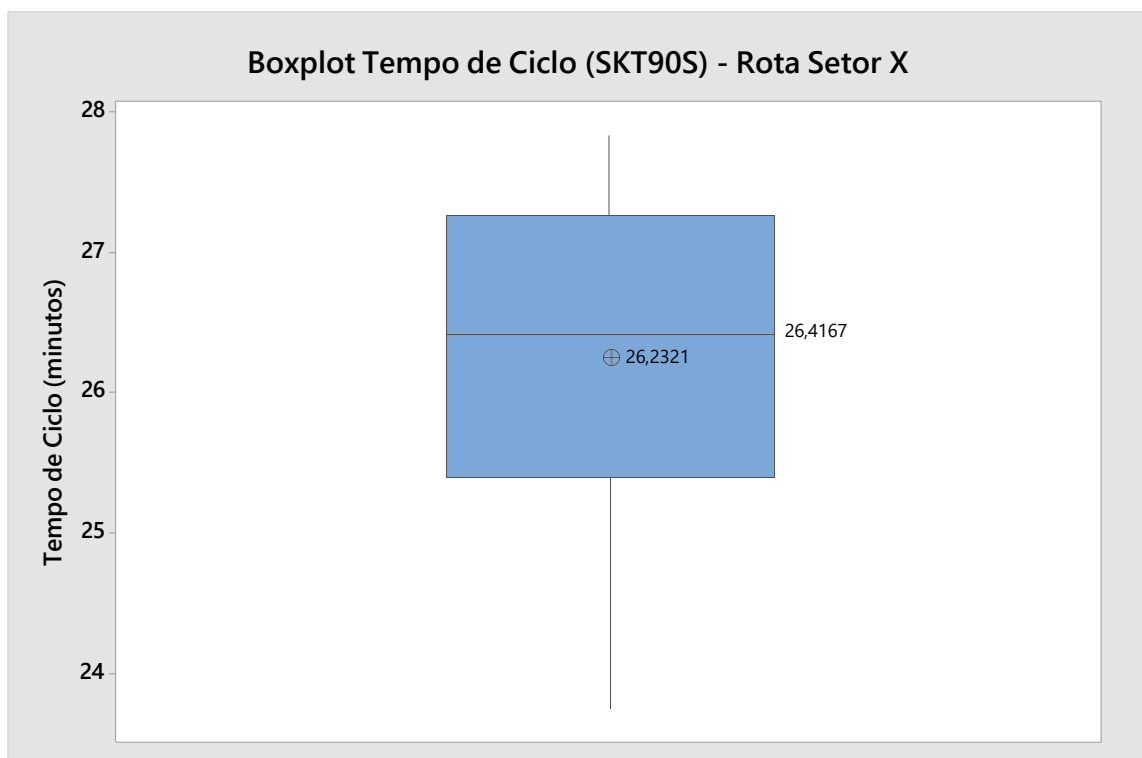


Figura 44 - Boxplot Tempo de Ciclo (SKT90S) - Rota Setor X

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de ciclo foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

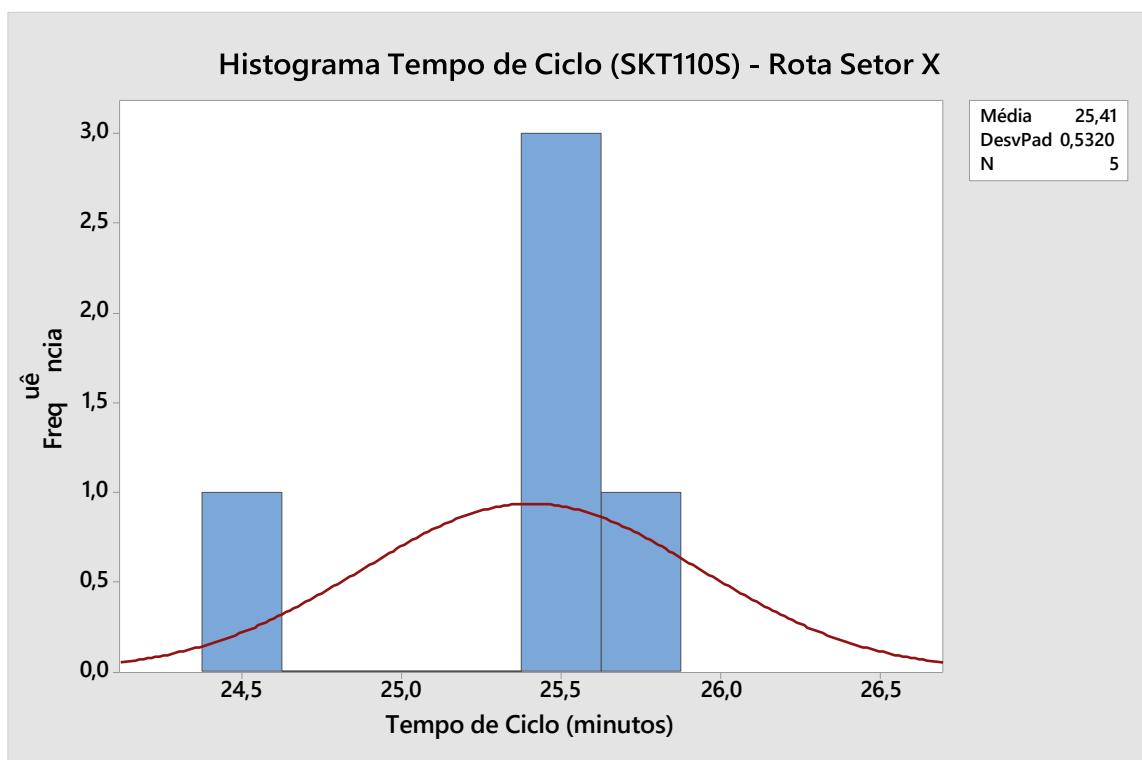


Figura 45 - Histograma Tempo de Ciclo (SKT110S) - Rota Setor X

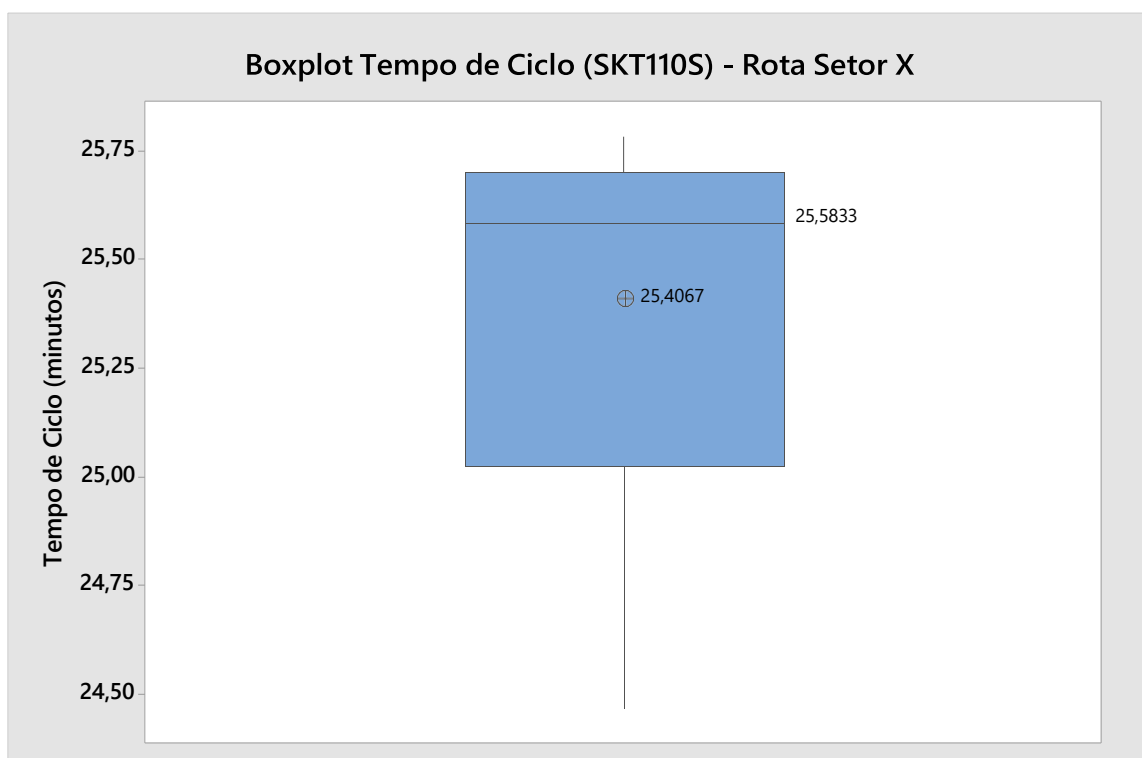


Figura 46 - Boxplot Tempo de Ciclo (SKT110S) - Rota Setor X

Observa-se que, em média, para a rota Setor X, o caminhão SKT110S obteve um tempo de ciclo (25,41 minutos) ligeiramente menor se comparado ao tempo do caminhão SKT90S (26,23 minutos), o que indica uma maior produtividade do SKT110S.

h) Produtividade (t/h) do caminhão SKT90S e do SKT110S

Para o caminhão SKT90S, que não dispõe de balança integrada, foi considerada uma carga média de 55 toneladas de rejeito filtrado. A produtividade foi calculada conforme a seguir:

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{\text{carga média}}{\text{tempo de ciclo médio}}$$

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{55}{26,23/60}$$

$$\text{Produtividade SKT90S } \left(\frac{t}{h}\right) = 125,81$$

Para o caminhão SKT110S, que dispõe de balança integrada, a carga média foi calculada conforme a seguir:

$$\text{Carga média (t)} = \frac{(\text{massa}_1) + (\text{massa}_2) \dots}{x_1 + x_2 \dots}$$

$$\text{Carga média (t)} = \frac{(71,0) + (77,9) + (71,2) + (71,9) + (70,7)}{1 + 1 + 1 + 1 + 1}$$

$$\text{Carga média (t)} = \frac{362,7}{5} = 72,54$$

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{\text{carga média}}{\text{tempo de ciclo médio}}$$

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{72,54}{25,41/60}$$

$$\text{Produtividade SKT110S } \left(\frac{t}{h}\right) = 171,29$$

i) Resumo Comparativo para a Rota Setor X

A tabela abaixo apresenta um resumo comparativos dos tempos dos caminhões para a rota Setor X.

Tabela 4 – Resumo comparativo dos caminhões Sany SKT90S e SKT110S para a rota Setor X.
Fonte: O autor.

	Tempo +- desvio padrão (minutos)	
	SKT90S	SKT110S
Manobra para Carregamento	0,53 +- 0,21	0,97 +- 0,18
Carregamento	2,46 +- 0,61	3,34 +- 0,25
Operando Cheio	11,74 +- 1,19	11,90 +- 0,32
Velocidade média carregado (km/h)	14,3	14,1
Manobra para Basculamento	0,69 +- 0,47	1,06 +- 0,42
Basculamento	0,86 +- 0,36	1,29 +- 0,13
Operando Vazio	8,71 +- 0,72	7,66 +- 0,49
Velocidade média vazio (km/h)	19,3	21,9
Tempo de Ciclo	26,23 +- 1,19	25,41 +- 0,53
Produtividade (t/h)	125,8	171,3

4.2 Rota Pulmão 2

a) Tempo de Manobra para Carregamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de manobra para carregamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

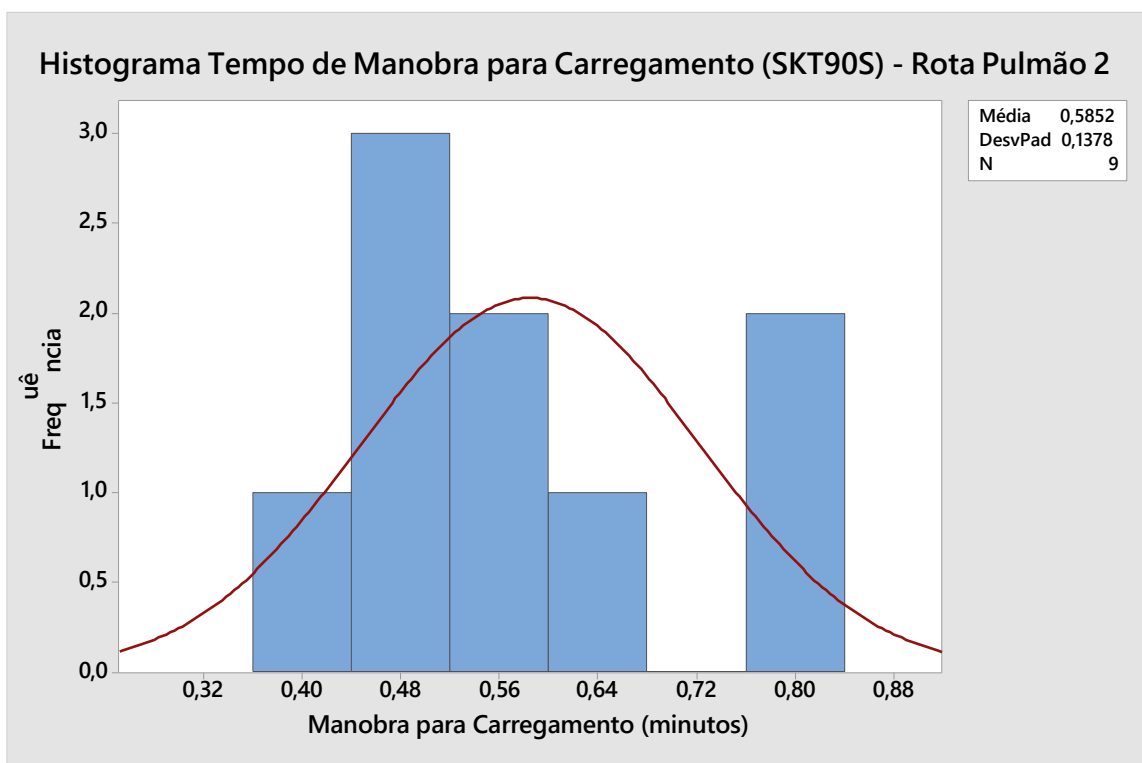


Figura 47 – Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

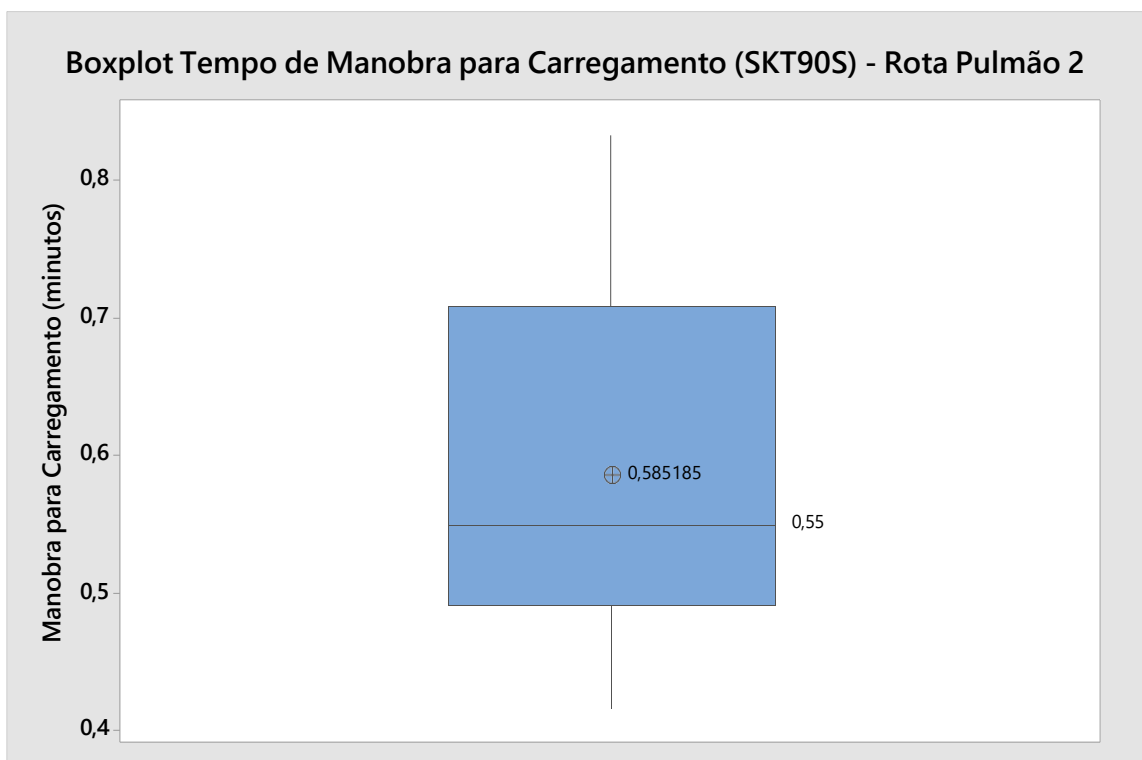


Figura 48 – Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de manobra para carregamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

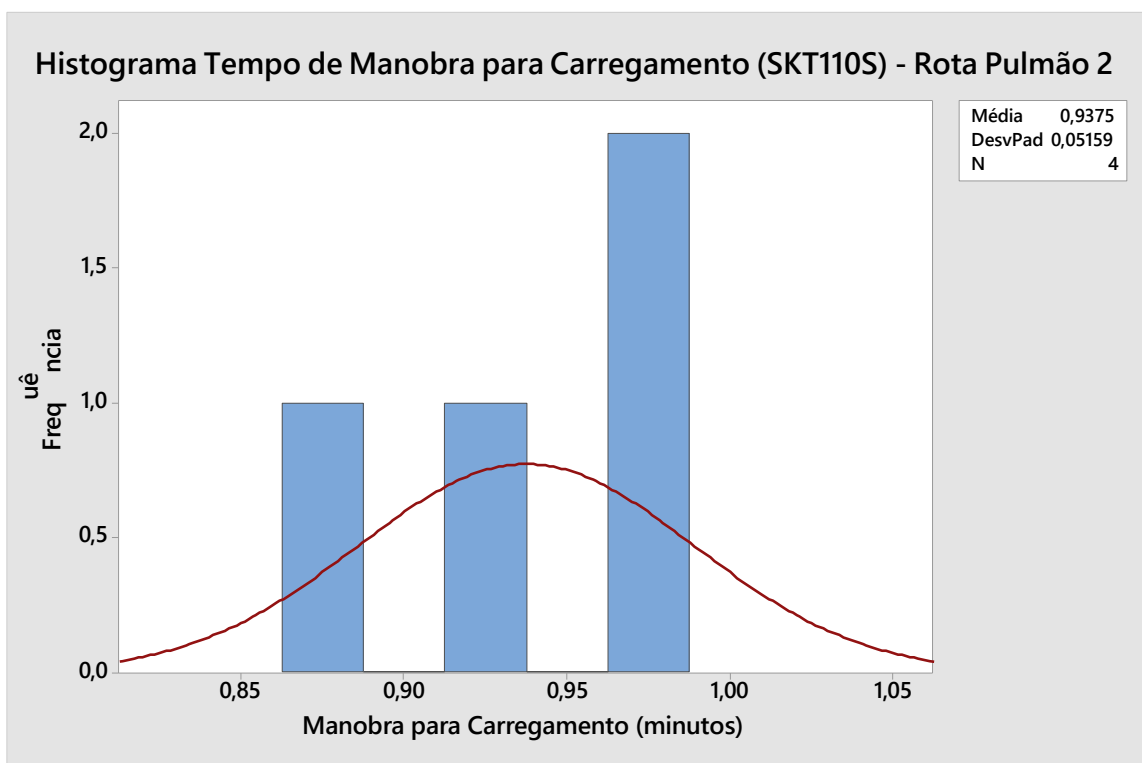


Figura 49 – Histograma Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

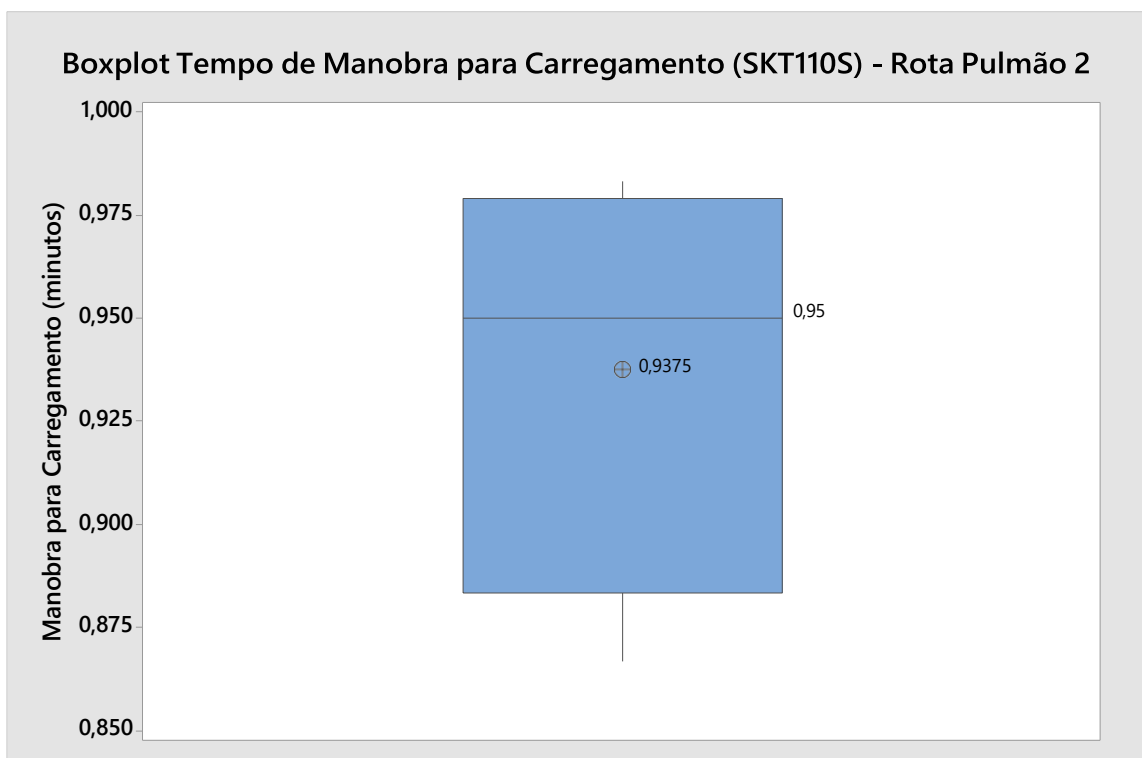


Figura 50 – Boxplot Tempo de Manobra para Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige um tempo maior (0,94 minutos) de manobra para carregamento do que o caminhão SKT90S (0,59 minutos), o que se justifica pelas maiores dimensões do caminhão.

b) Tempo de Carregamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de carregamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

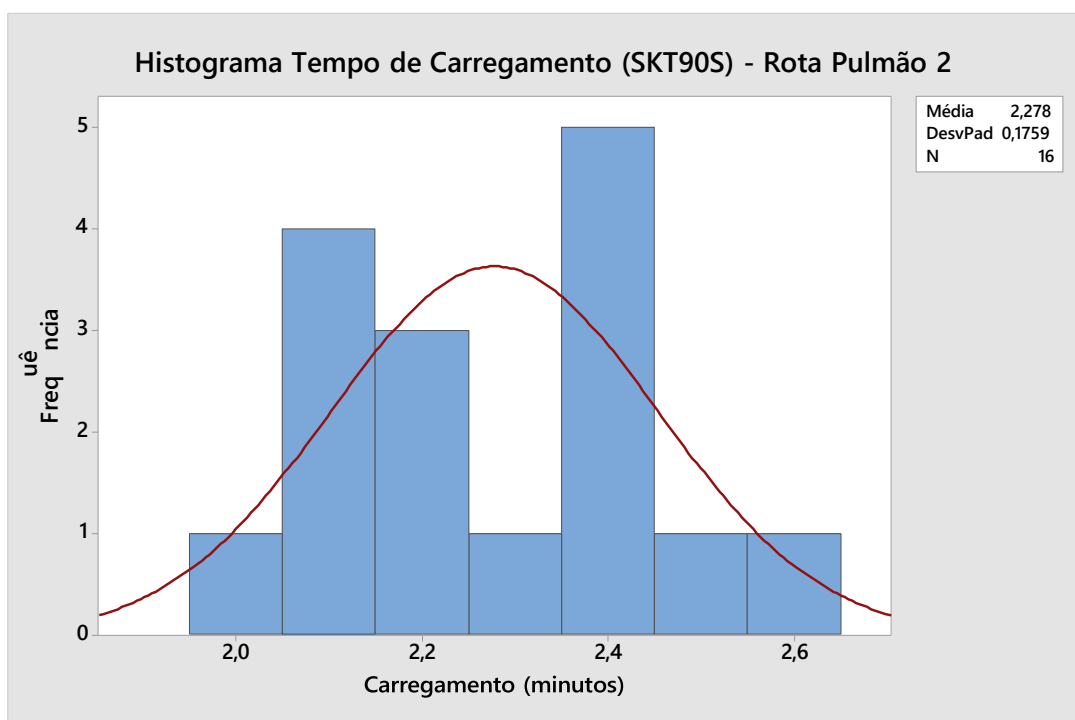


Figura 51 – Histograma Tempo de Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

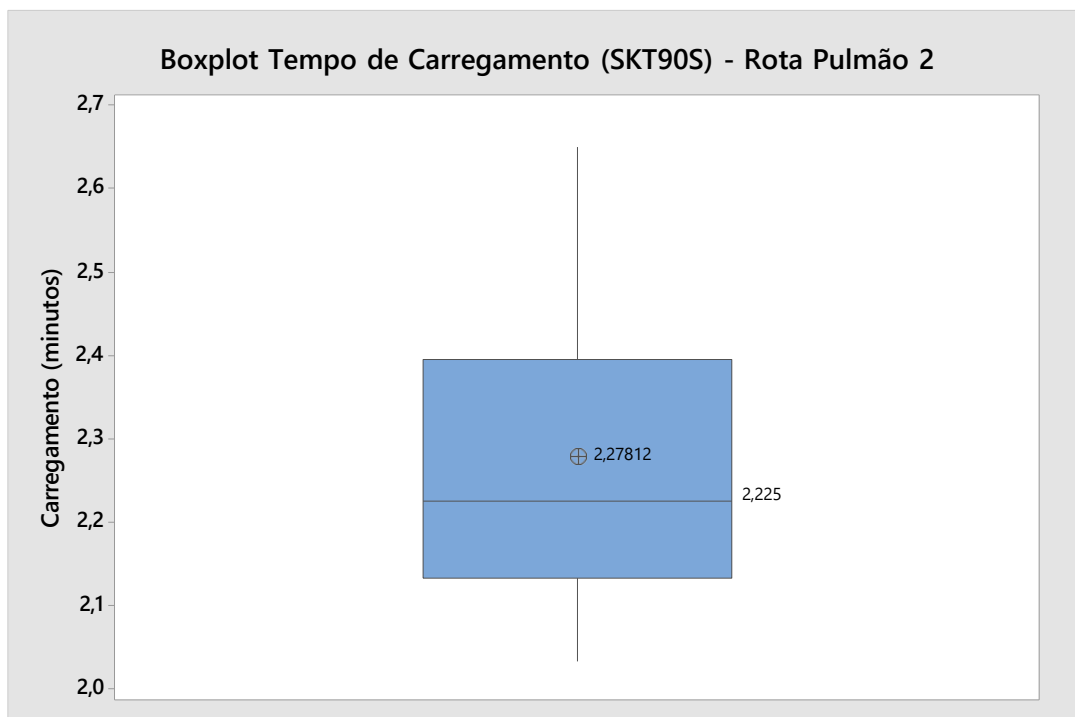


Figura 52 – Boxplot Tempo de Carregamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de carregamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

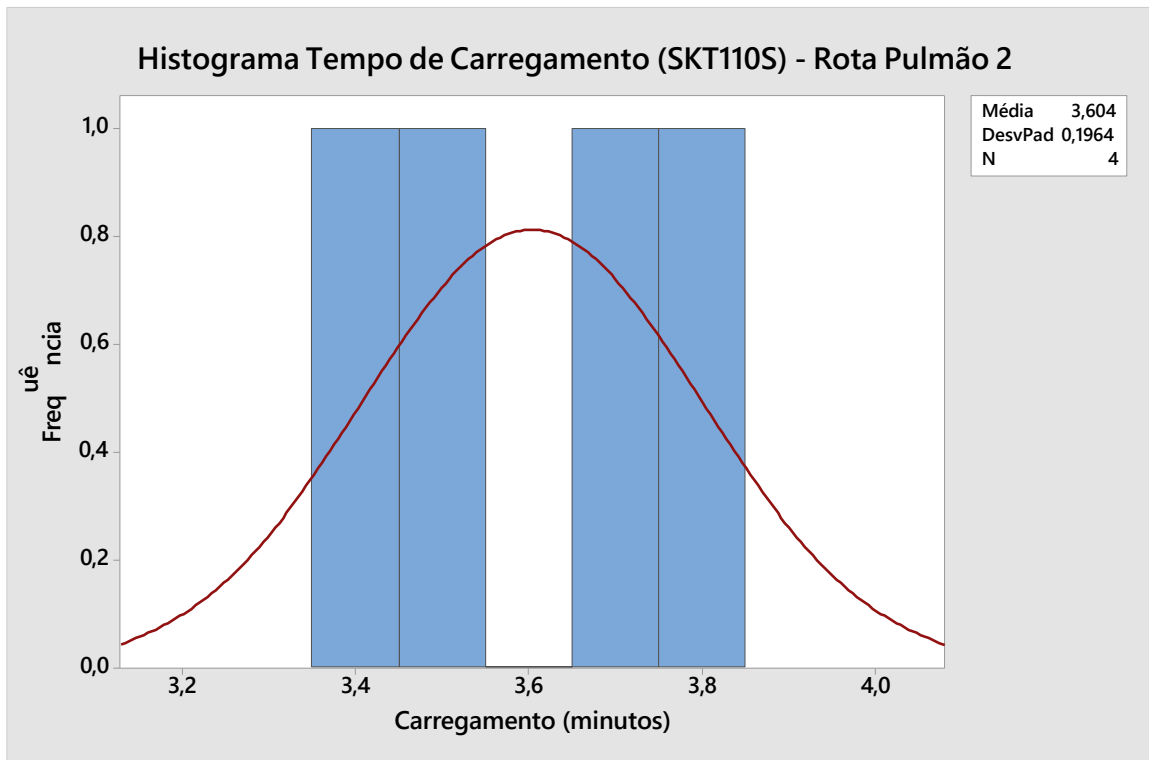


Figura 53 – Histograma Tempo de Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

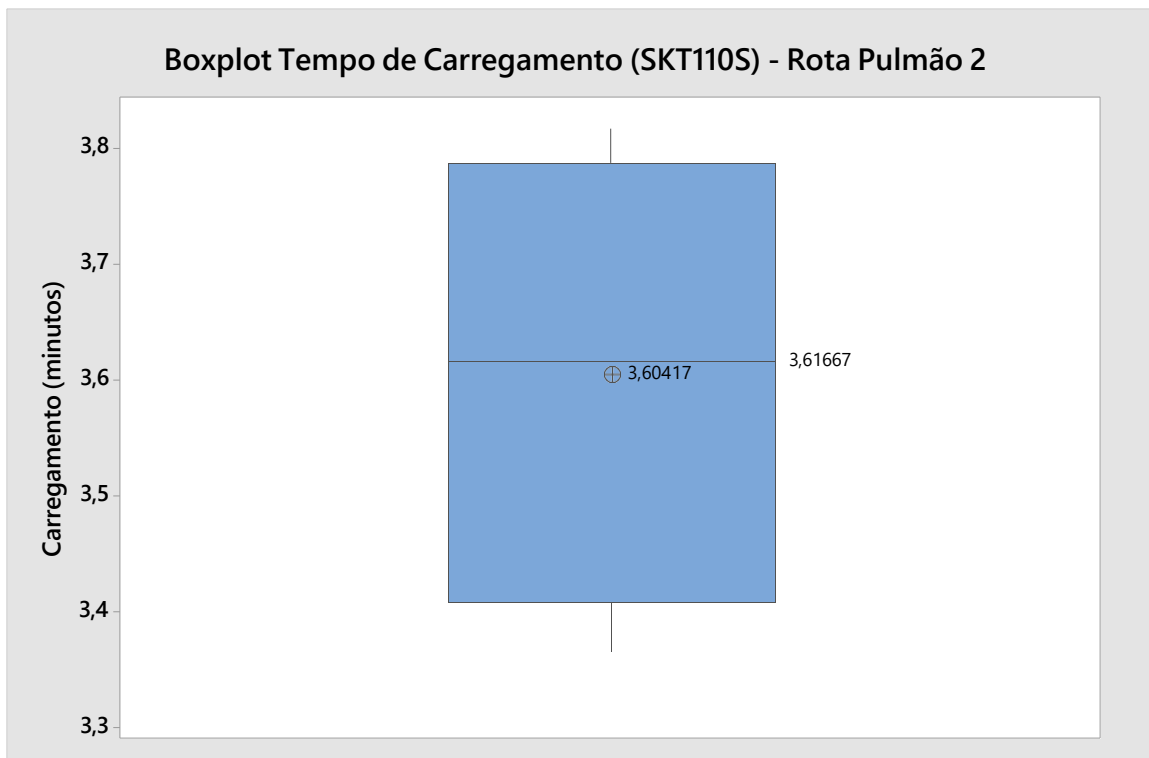


Figura 54 – Boxplot Tempo de Carregamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige 1,32 minutos a mais de tempo de carregamento (3,60 minutos) do que o caminhão SKT90S (2,28 minutos). Conforme apresentado nas figuras 18 e 19, em média, cada passe da retroescavadeira demanda 0,47 minutos, ou seja, os dois passes adicionais demandariam 0,94 minutos. A diferença observada de 1,32 minutos pode ser atribuída a eventuais ajustes no platô de carregamento da retroescavadeira e a quebra do cone de rejeito filtrado, facilitando o enchimento da concha.

c) Tempo Operando Cheio

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos operando cheio foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

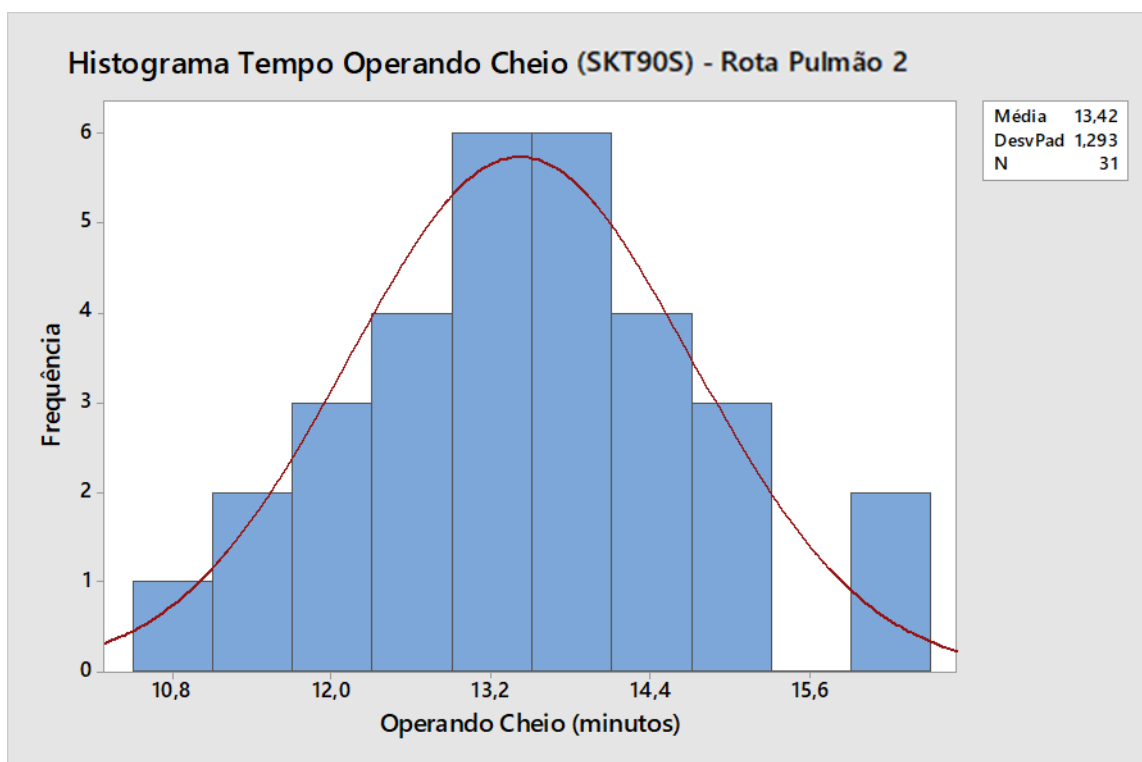


Figura 55 – Histograma Tempo Operando Cheio (SKT90S) – Rota Pulmão 2

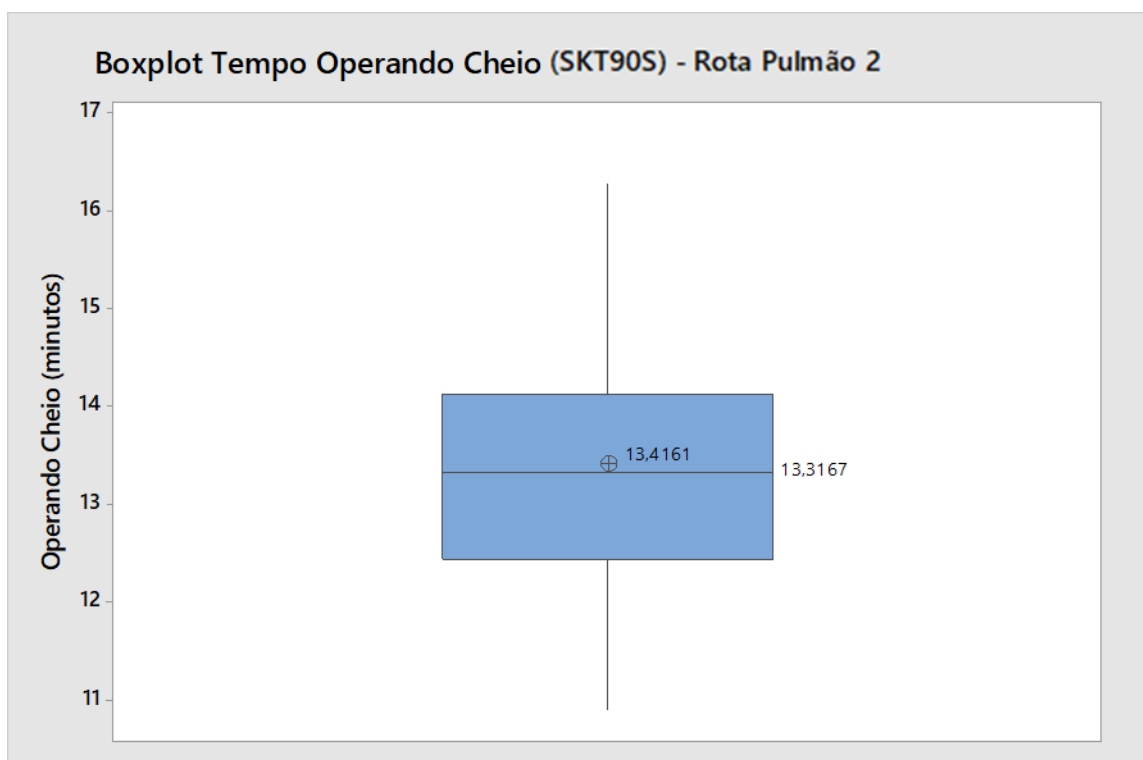


Figura 56 – Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT90S) – Rota Pulmão 2

A velocidade média do SKT90 no trecho carregado foi calculada conforme a seguir:

$$\text{Distância (km)} = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times \text{tempo (h)}$$

$$3,3 = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times (13,42/60)$$

$$\text{Velocidade média carregado SKT90S} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = 14,8$$

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos operando cheio foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

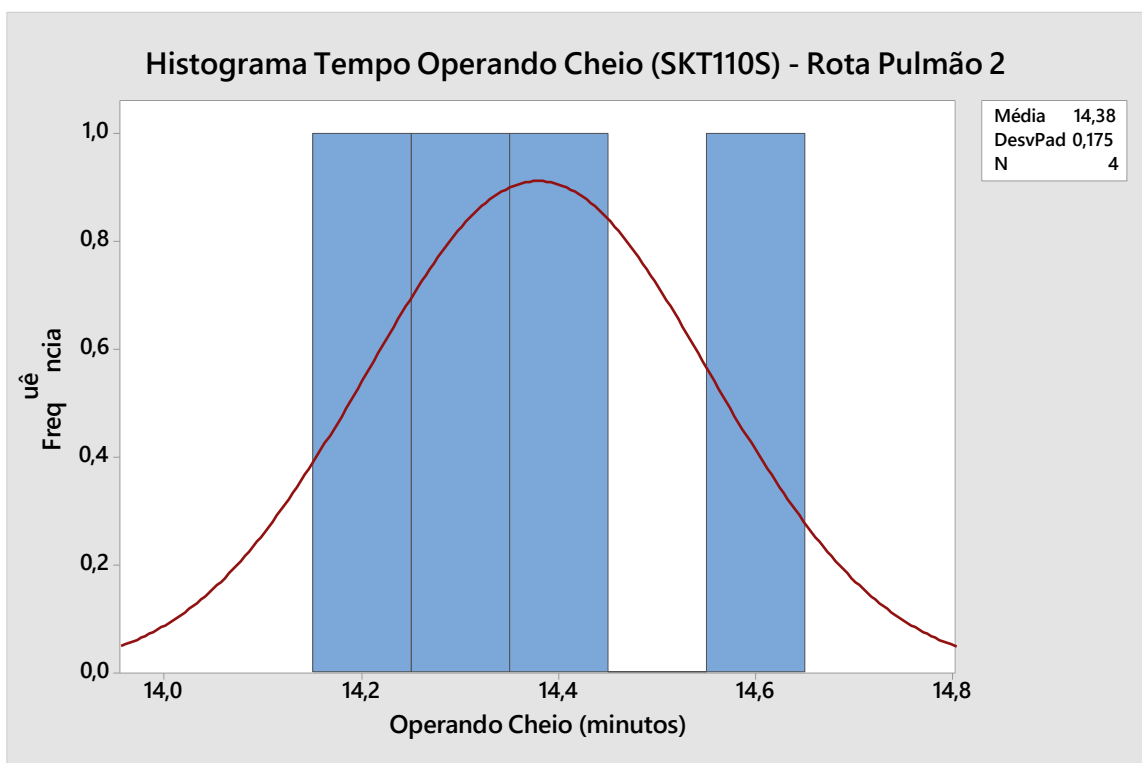


Figura 57 – Histograma Tempo Operando Cheio (SKT110S) – Rota Pulmão 2

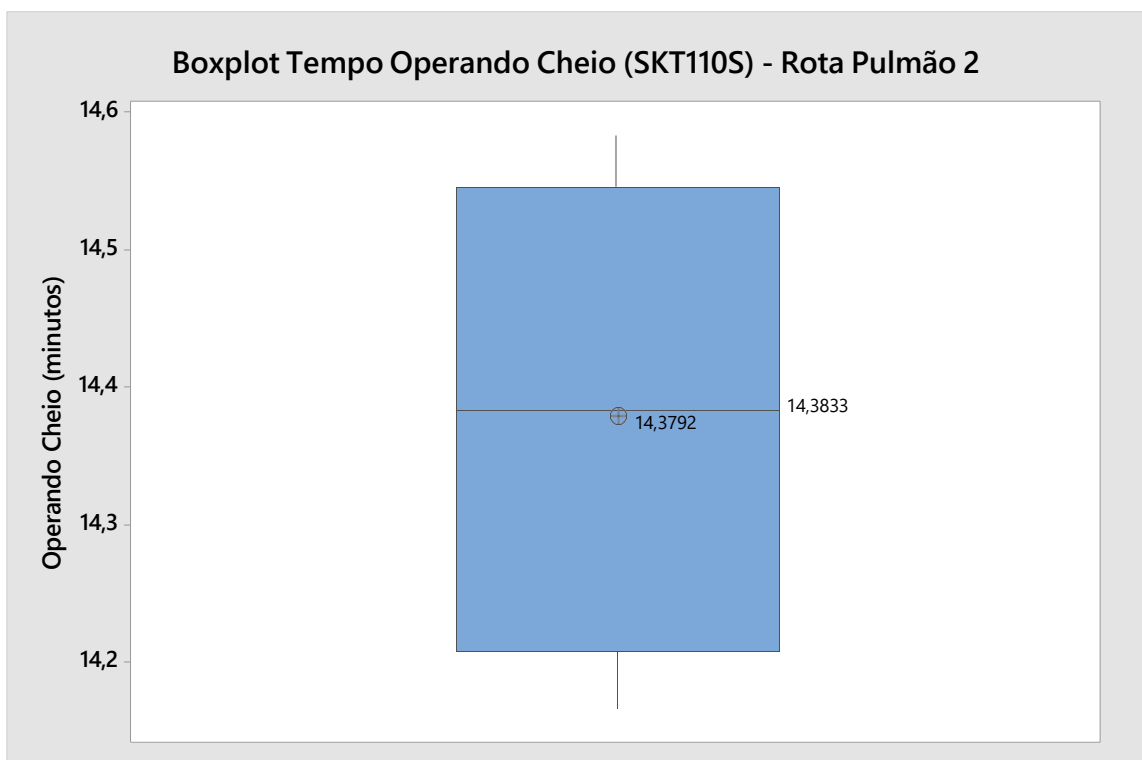


Figura 58 – Boxplot Tempo Operando Cheio (SKT110S) – Rota Pulmão 2

A velocidade média do SKT110 no trecho carregado foi calculada conforme a seguir:

$$Distância (km) = velocidade \left(\frac{km}{h} \right) \times tempo (h)$$

$$3,3 = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times (14,38/60)$$

$$\text{Velocidade média carregado SKT110S} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = 13,8$$

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S levou um tempo (14,38 minutos) ligeiramente superior (0,96 minutos a mais) se comparado ao tempo do caminhão SKT90S (13,42 minutos) para deslocar do ponto de carregamento até o Pulmão 2, o que sugere uma performance superior do SKT110S, visto que este transporta cerca de 15 toneladas a mais.

d) Tempo de Manobra para Basculamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de manobra para basculamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

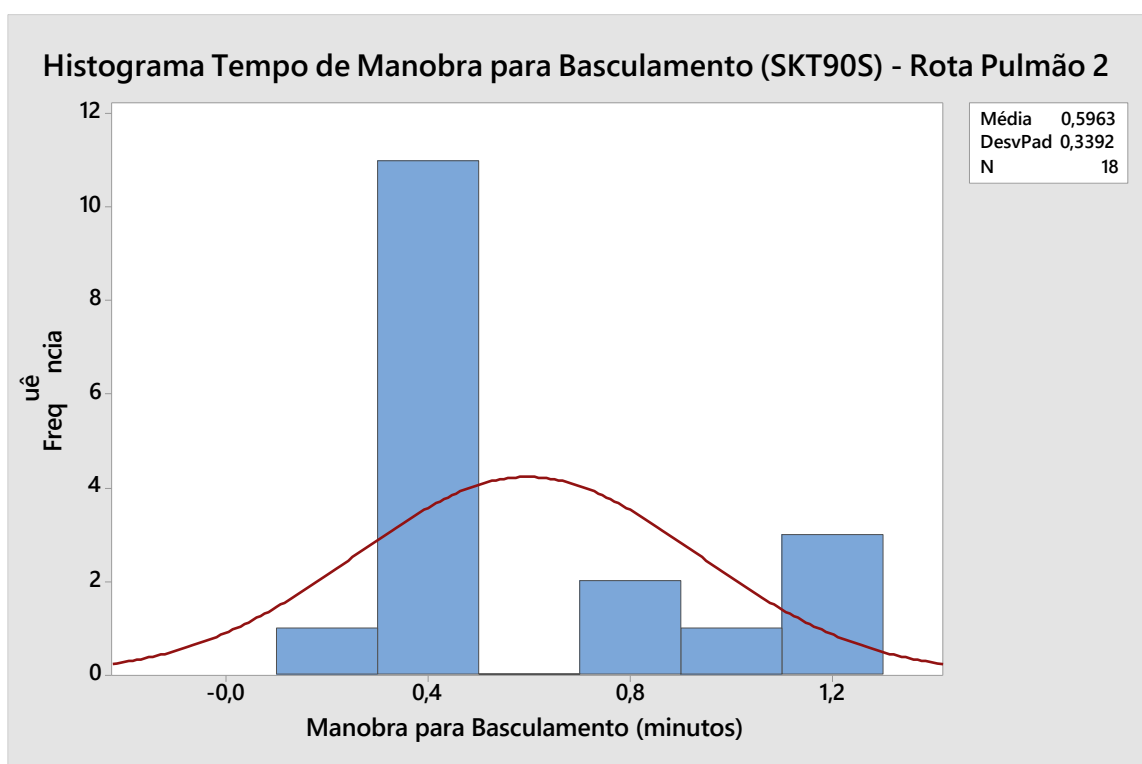


Figura 59 – Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

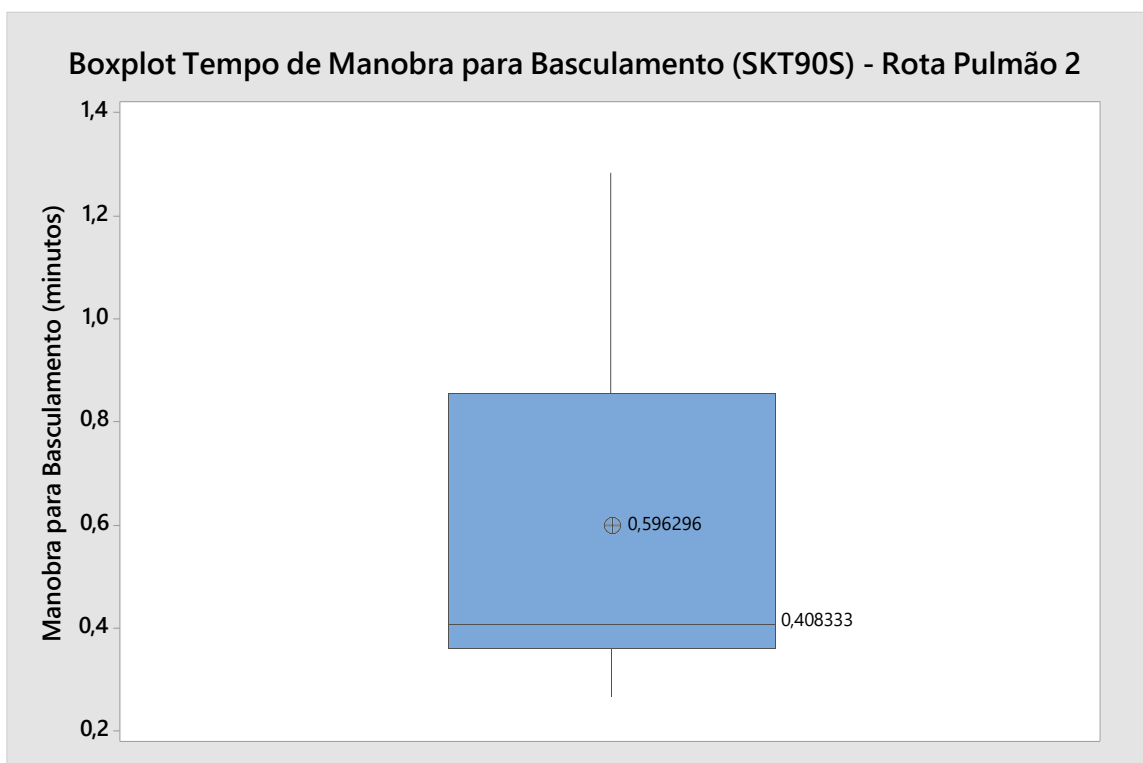


Figura 60 – Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de manobra para basculamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

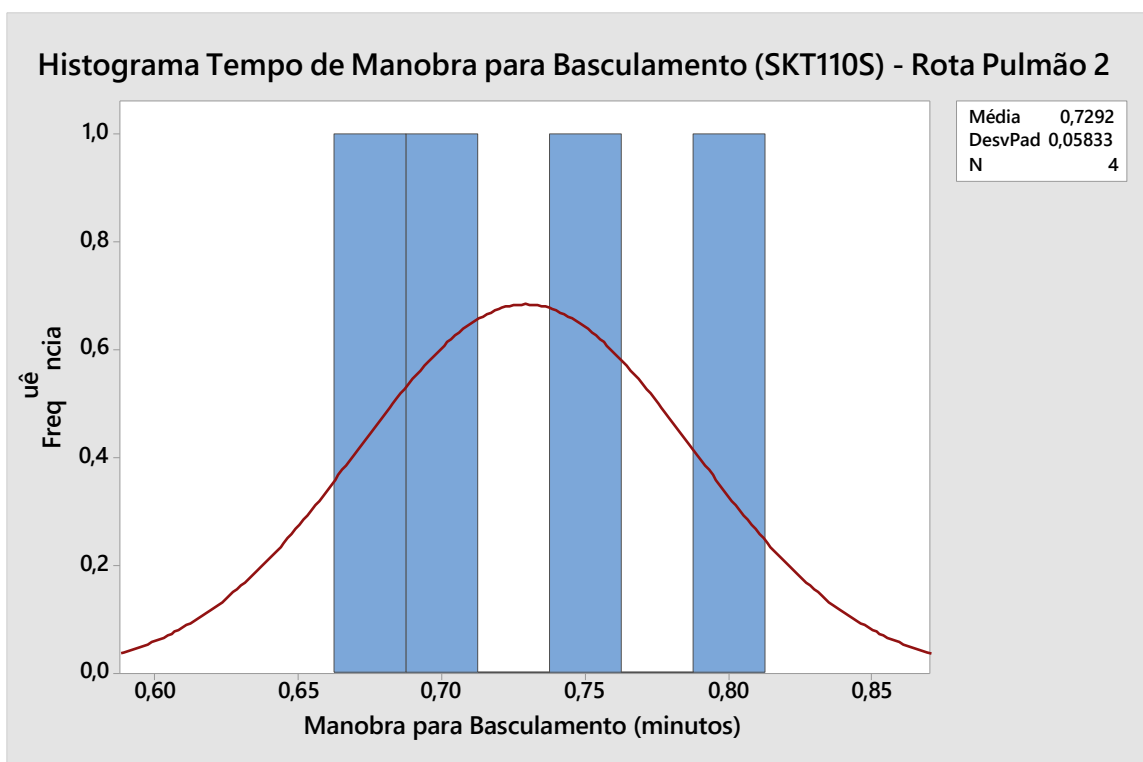


Figura 61 – Histograma Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

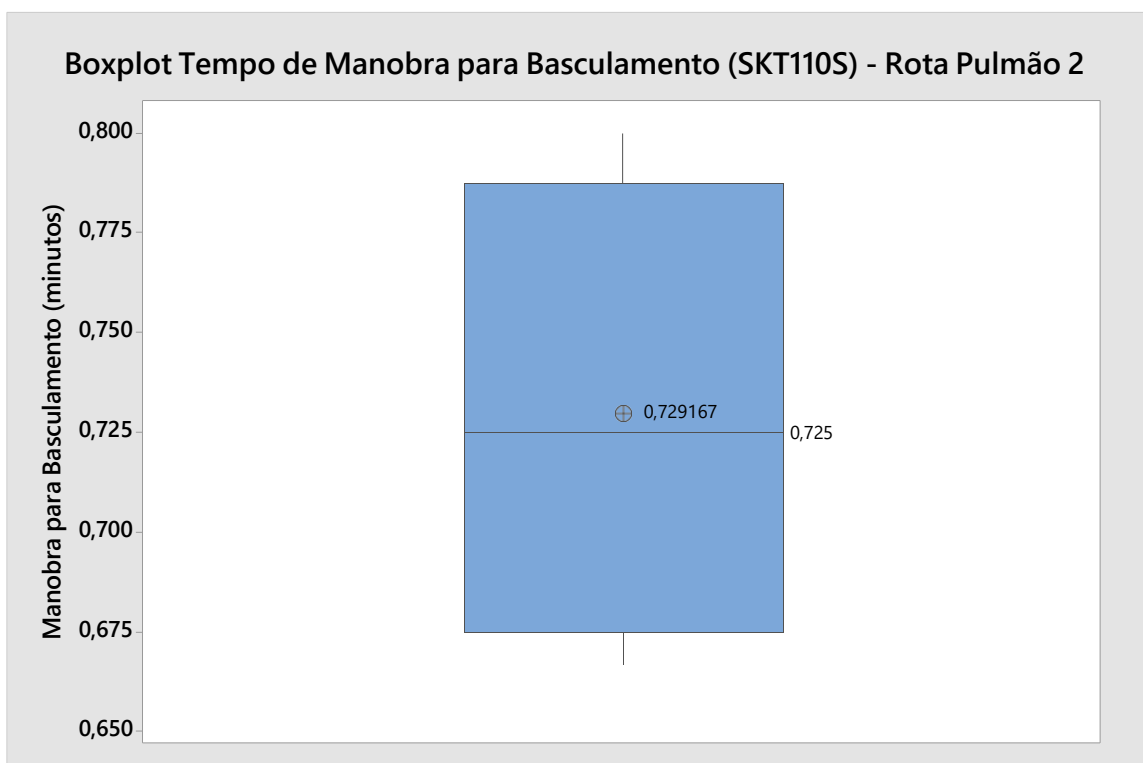


Figura 62 – Boxplot Tempo de Manobra para Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige um tempo maior (0,73 minutos) de manobra para basculamento do que o caminhão SKT90S (0,60 minutos). Pode-se atribuir o tempo de manobra elevado às dimensões maiores do SKT110S.

e) Tempo de Basculamento

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de basculamento foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

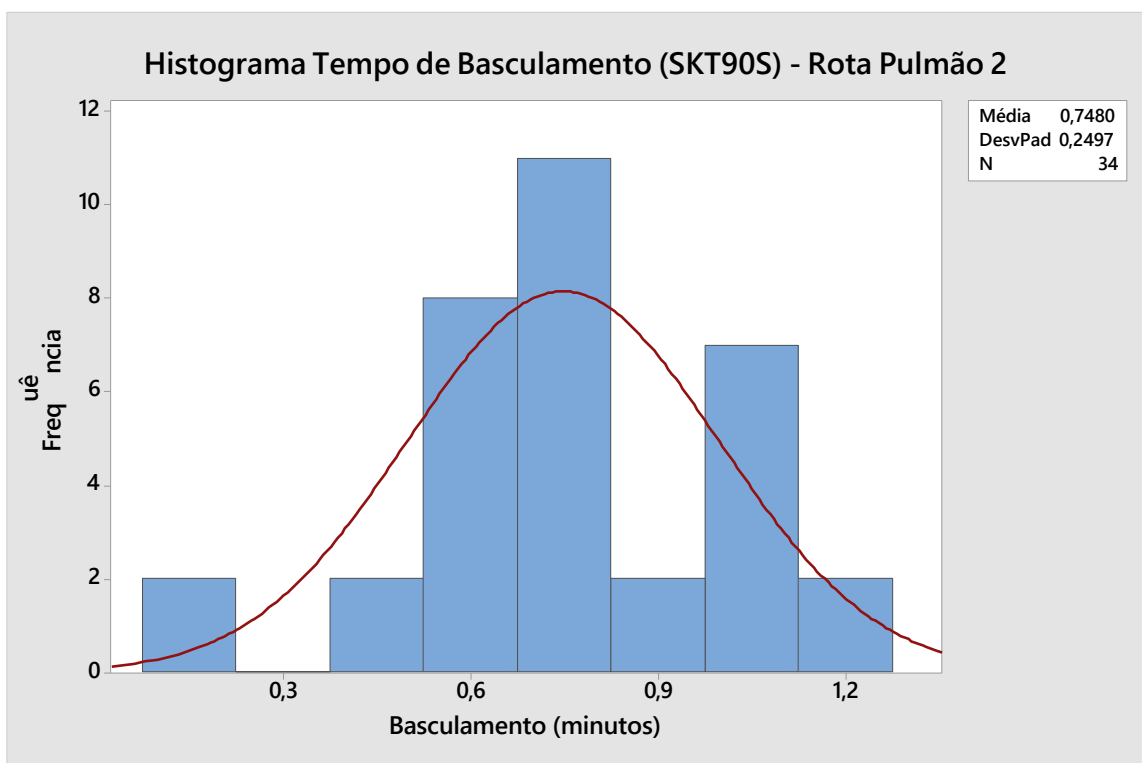


Figura 63 – Histograma Tempo de Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

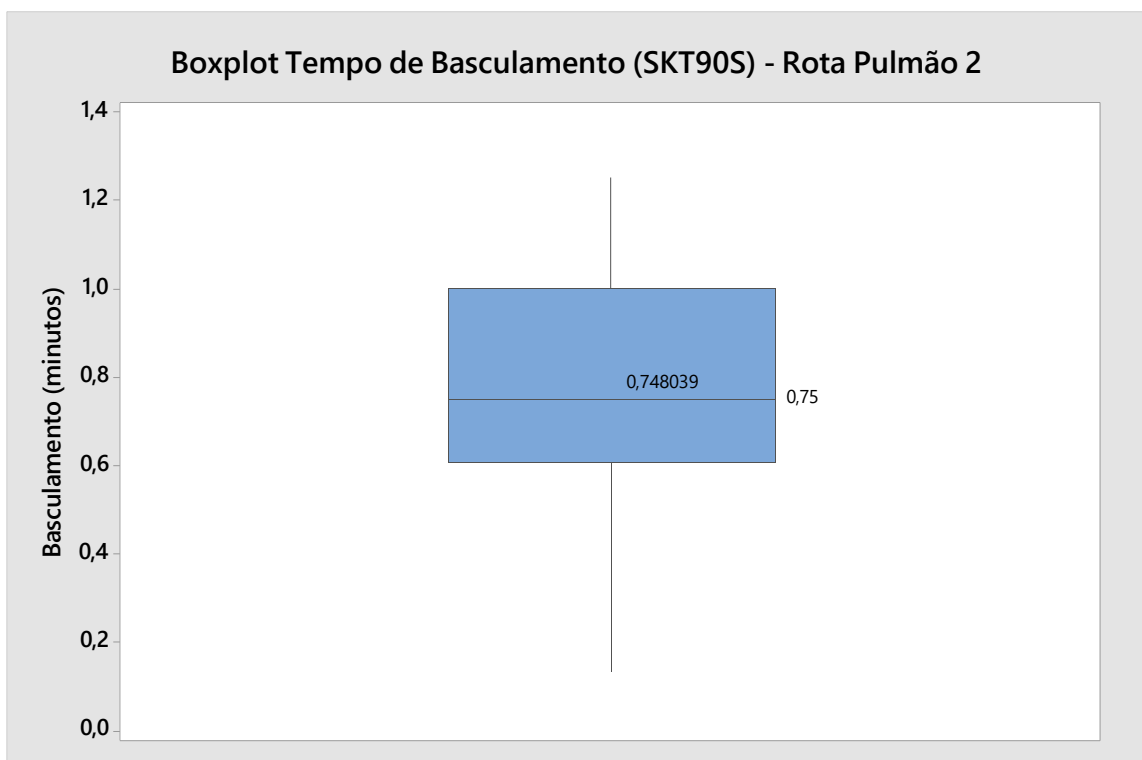


Figura 64 – Boxplot Tempo de Basculamento (SKT90S) – Rota Pulmão 2

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de basculamento foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

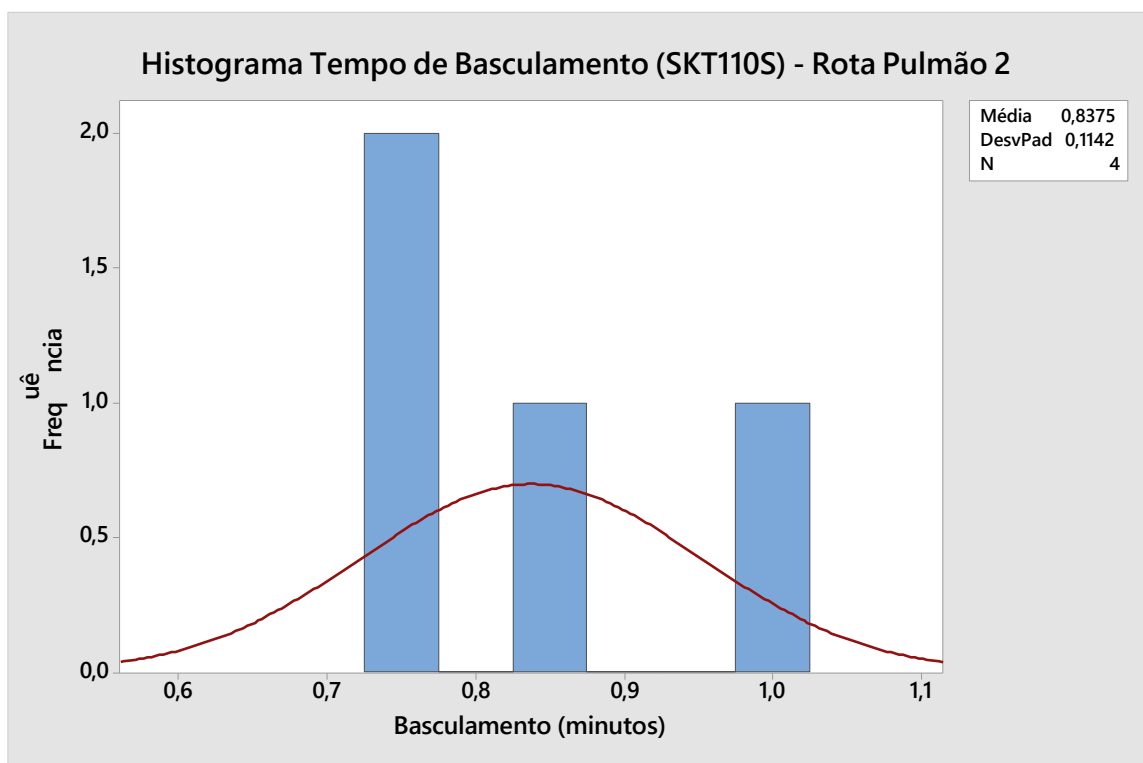


Figura 65 – Histograma Tempo de Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

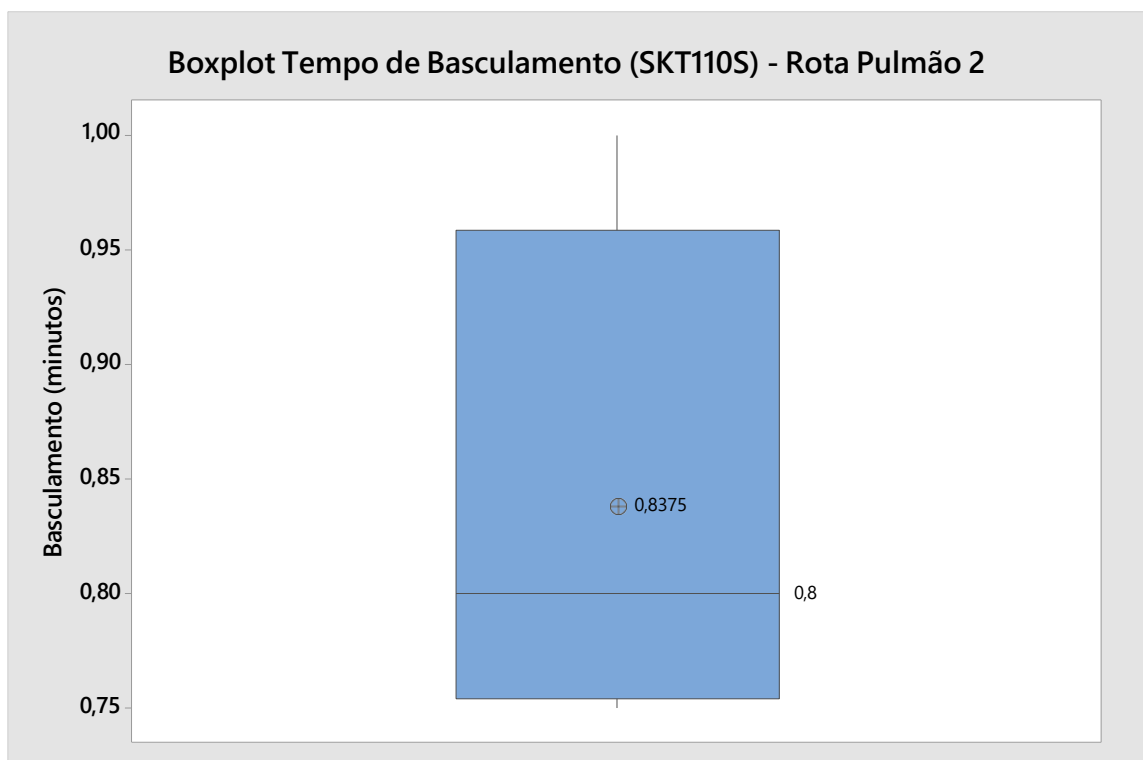


Figura 66 – Boxplot Tempo de Basculamento (SKT110S) – Rota Pulmão 2

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S exige um tempo maior (0,84 minutos) de basculamento do que o caminhão SKT90S (0,75 minutos), o que se justifica pelas maiores dimensões do caminhão.

Vale ressaltar o problema da carga morta, presente na frota SKT90S e que se agrava no SKT110S. Em função da umidade média elevada do rejeito filtrado (~18%), o material se prende à balsa dos caminhões, demandando maior tempo de basculamento durante as tentativas de desprendimento do material.

f) Tempo Operando Vazio

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos operando vazio foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

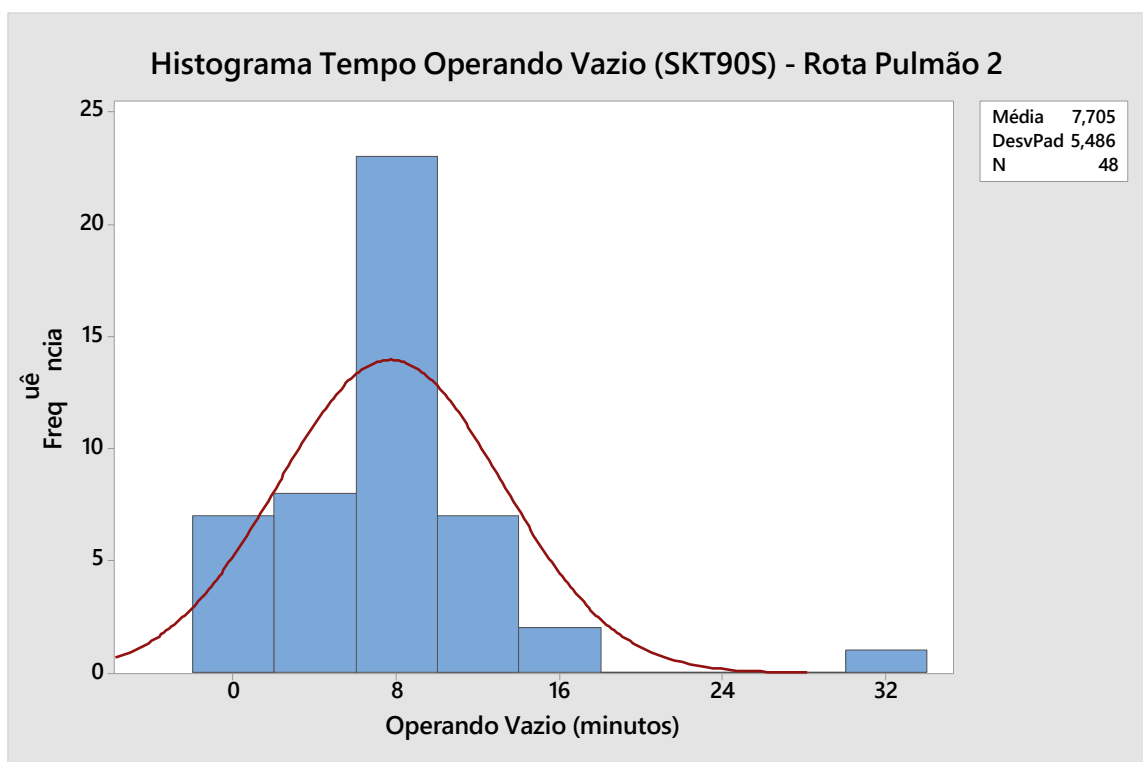


Figura 67 – Histograma Tempo Operando Vazio (SKT90S) – Rota Pulmão 2

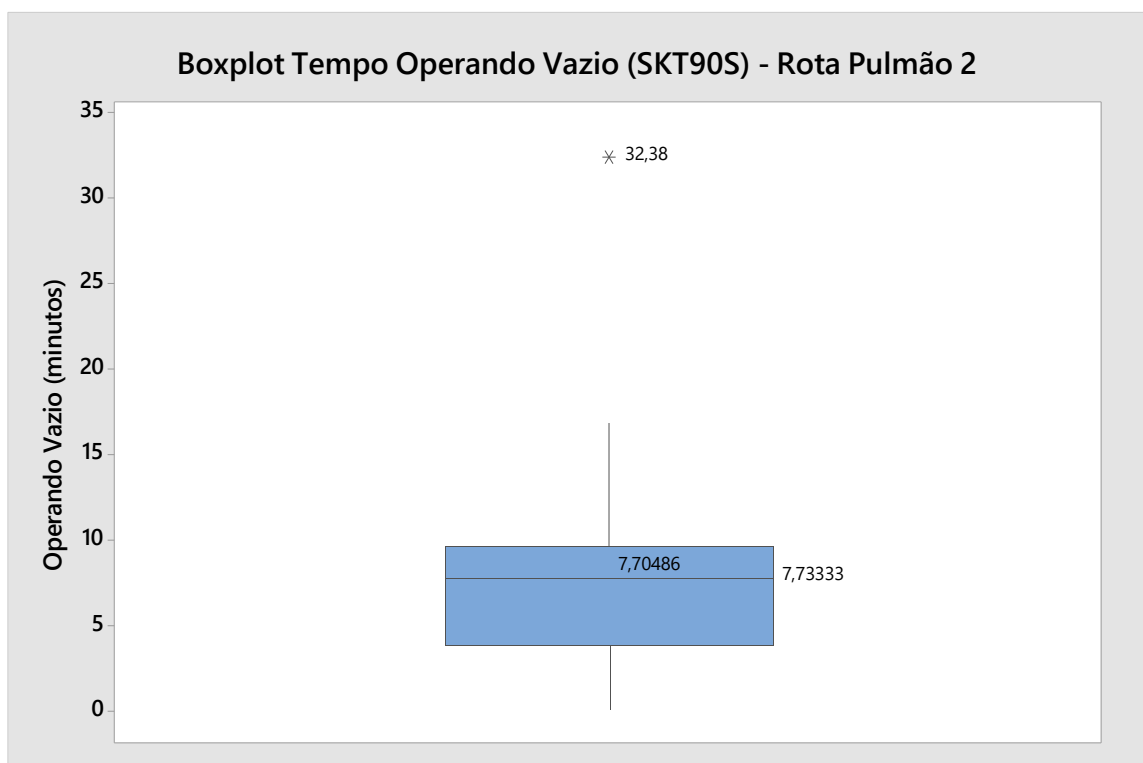


Figura 68 – Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT90S) – Rota Pulmão 2

O boxplot tempo operando vazio do caminhão SKT90S apontou a presença de um *outlier* (32,28). Esse valor pode ser atribuído à filas ou algum evento que motivou paradas durante o deslocamento, como um pare e siga, por exemplo. Foram gerados novos boxplots e foram constatados outros *outliers* menores que a média calculada. Esses valores podem ser atribuídos a apontamento incorreto, uma vez que a DMT desse trajeto é 3,3 km, conforme a figura 4, e que é impossível um caminhão desse porte e com limitações de velocidade, percorrer esse trajeto em tempos tão pequenos. A seguir, foram apresentados o histograma e boxplot, gerados após a remoção dos *outliers*.

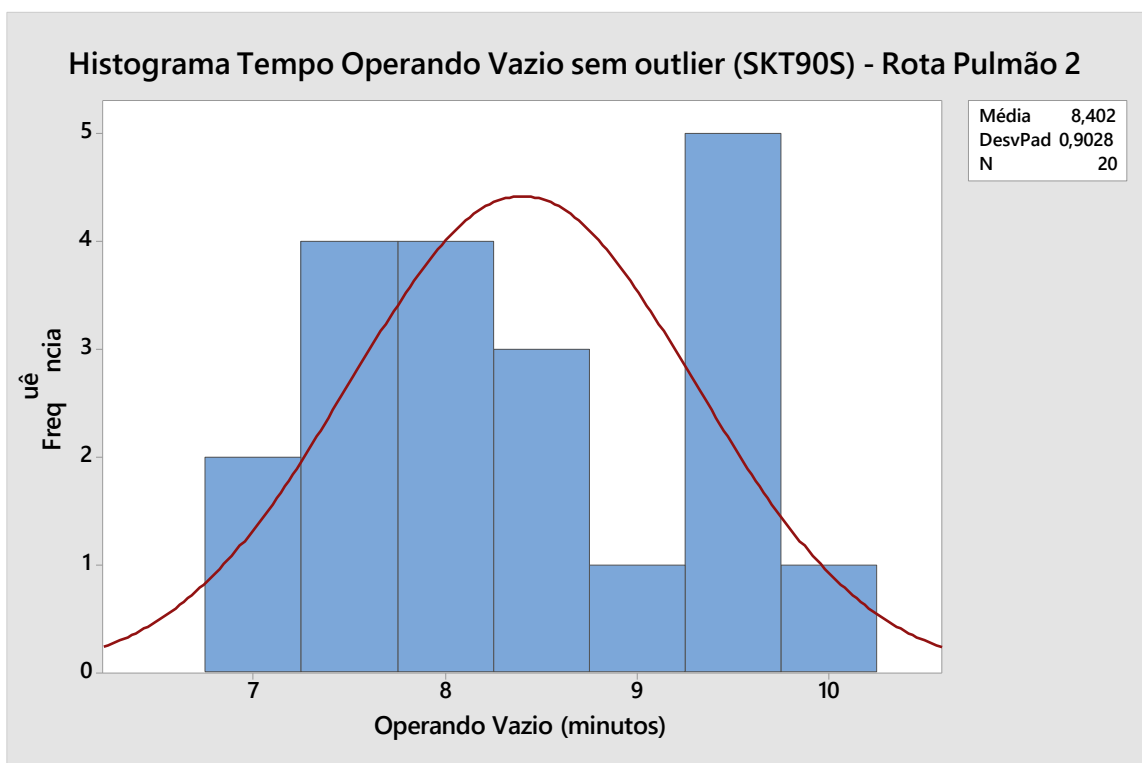


Figura 69 – Histograma Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) – Rota Pulmão 2

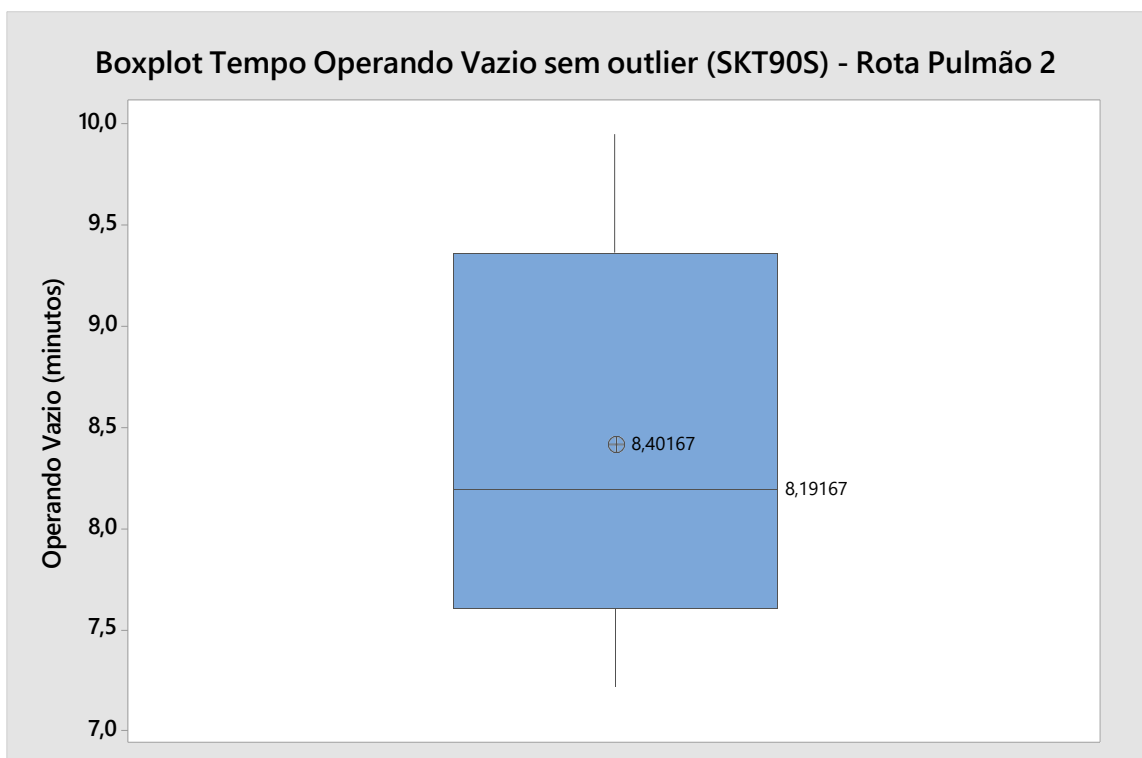


Figura 70 – Boxplot Tempo Operando Vazio sem outlier (SKT90S) – Rota Pulmão 2

A velocidade média do SKT90 no trecho vazio foi calculada conforme a seguir:

$$Distância (km) = velocidade \left(\frac{km}{h} \right) \times tempo (h)$$

$$3,3 = \text{velocidade} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \times (8,40/60)$$

$$\text{Velocidade média vazio SKT90S} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = 23,6$$

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos operando vazio foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

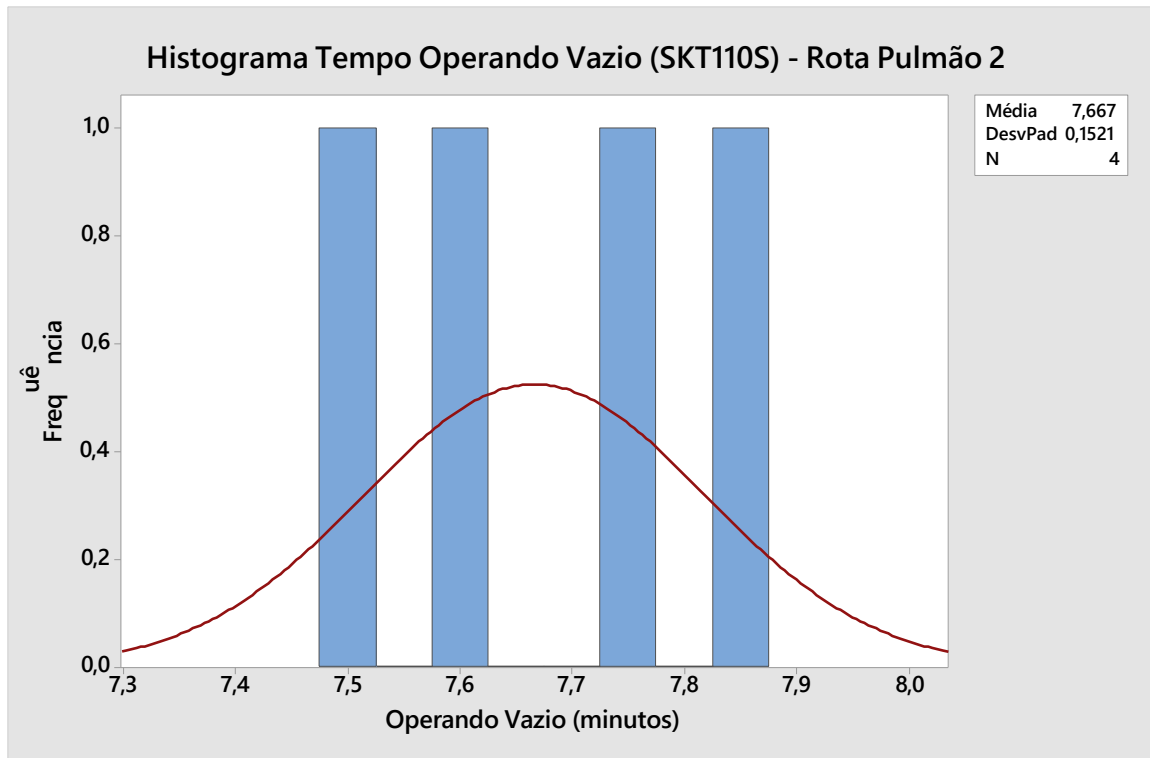


Figura 71 – Histograma Tempo Operando Vazio (SKT110S) – Rota Pulmão 2

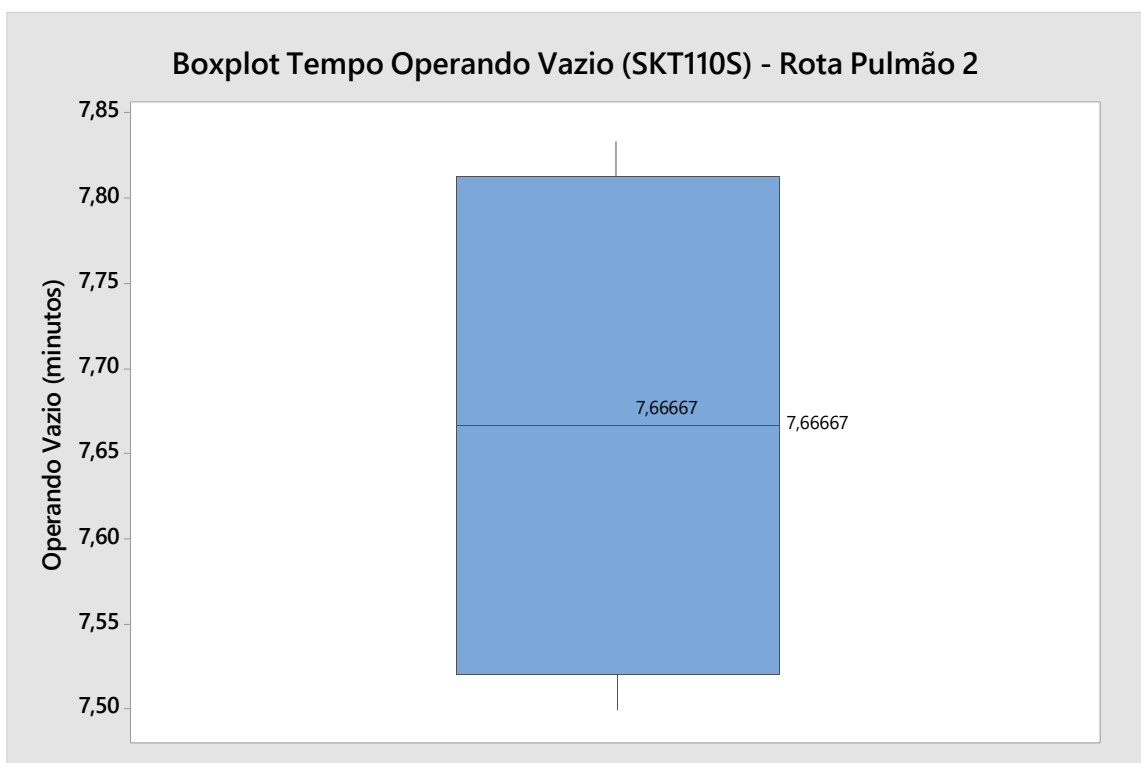


Figura 72 – Boxplot Tempo Operando Vazio (SKT110S) – Rota Pulmão 2

A velocidade média do SKT110 no trecho vazio foi calculada conforme a seguir:

$$Distância (km) = velocidade \left(\frac{km}{h} \right) \times tempo (h)$$

$$3,3 = velocidade \left(\frac{km}{h} \right) \times (7,67/60)$$

$$Velocidade \text{ média vazio SKT110S } \left(\frac{km}{h} \right) = 25,8$$

Observa-se que, em média, o caminhão SKT110S levou um tempo (7,67 minutos) menor se comparado ao tempo do caminhão SKT90S (8,40 minutos) para deslocar do ponto de basculamento até a praça de carregamento, o que sugere uma performance superior do SKT110S, visto que este pesa cerca de 5 toneladas a mais, conforme as tabelas 1 e 2.

g) Tempo de Ciclo

Para a frota de transporte SKT90S, os tempos de ciclo foram coletados do sistema de gestão de frota utilizado na empresa e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

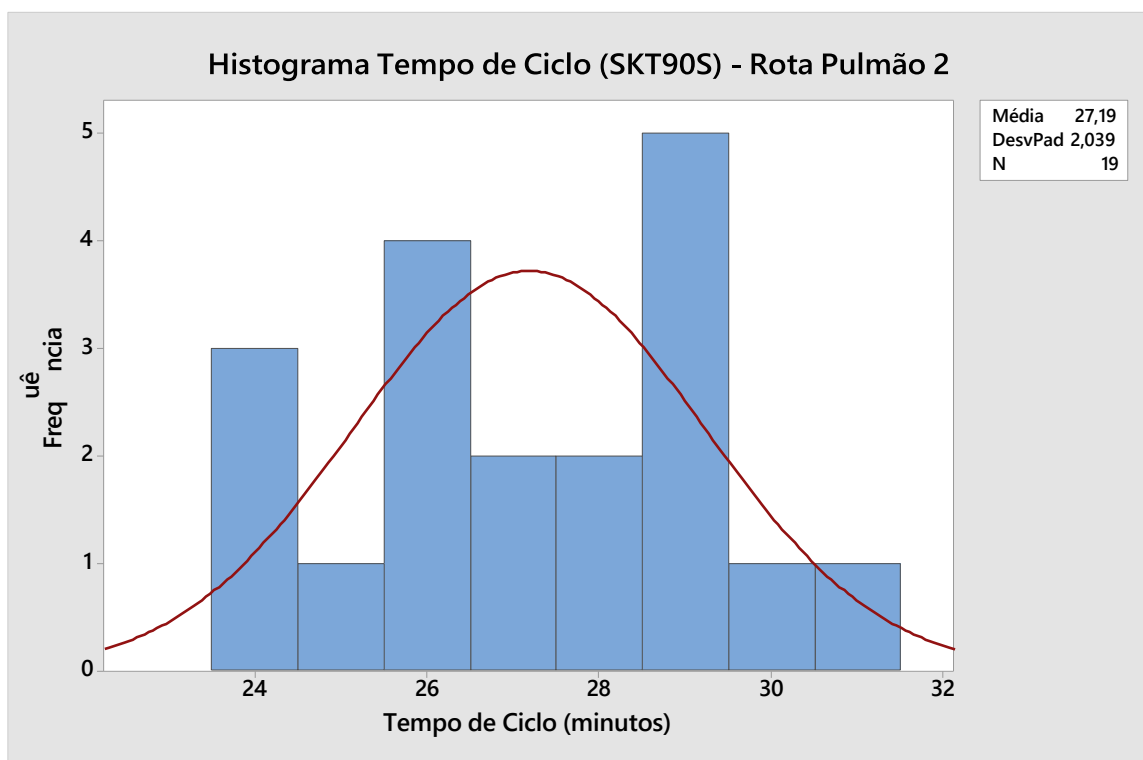


Figura 73 – Histograma Tempo de Ciclo (SKT90S) – Rota Pulmão 2

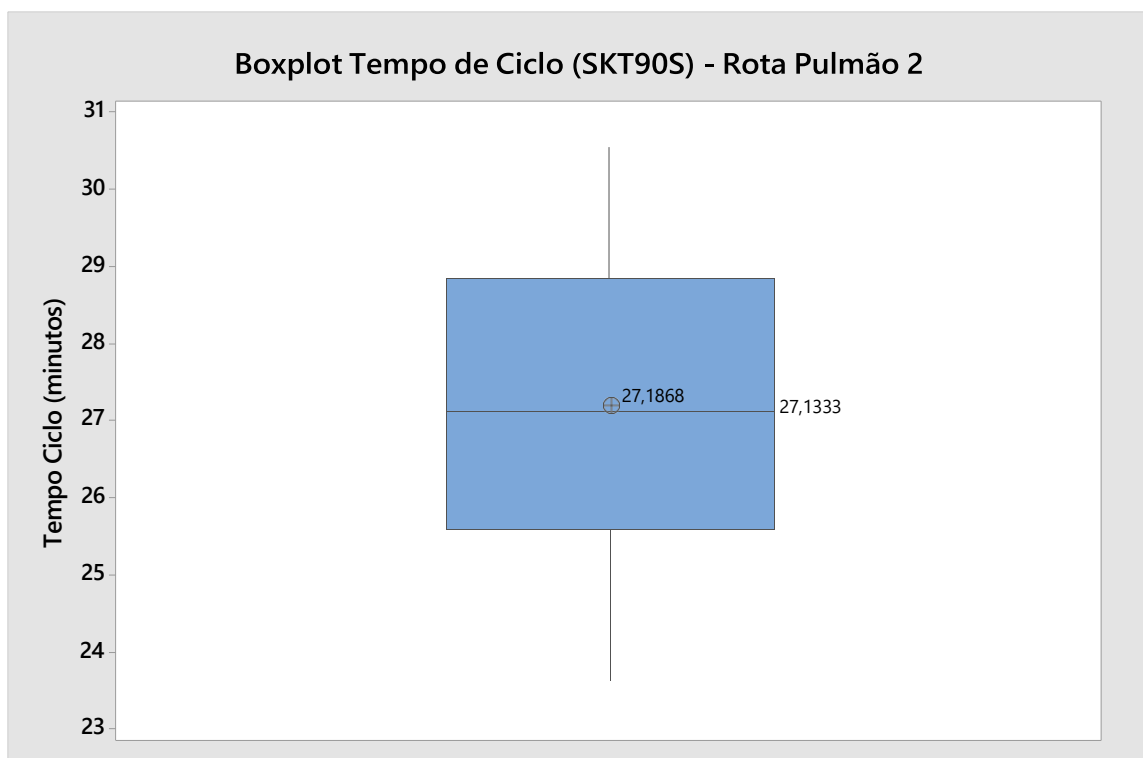


Figura 74 – Boxplot Tempo de Ciclo (SKT90S) – Rota Pulmão 2

Para o caminhão SKT110S testado, os tempos de ciclo foram coletados manualmente e apresentados no histograma e boxplot abaixo.

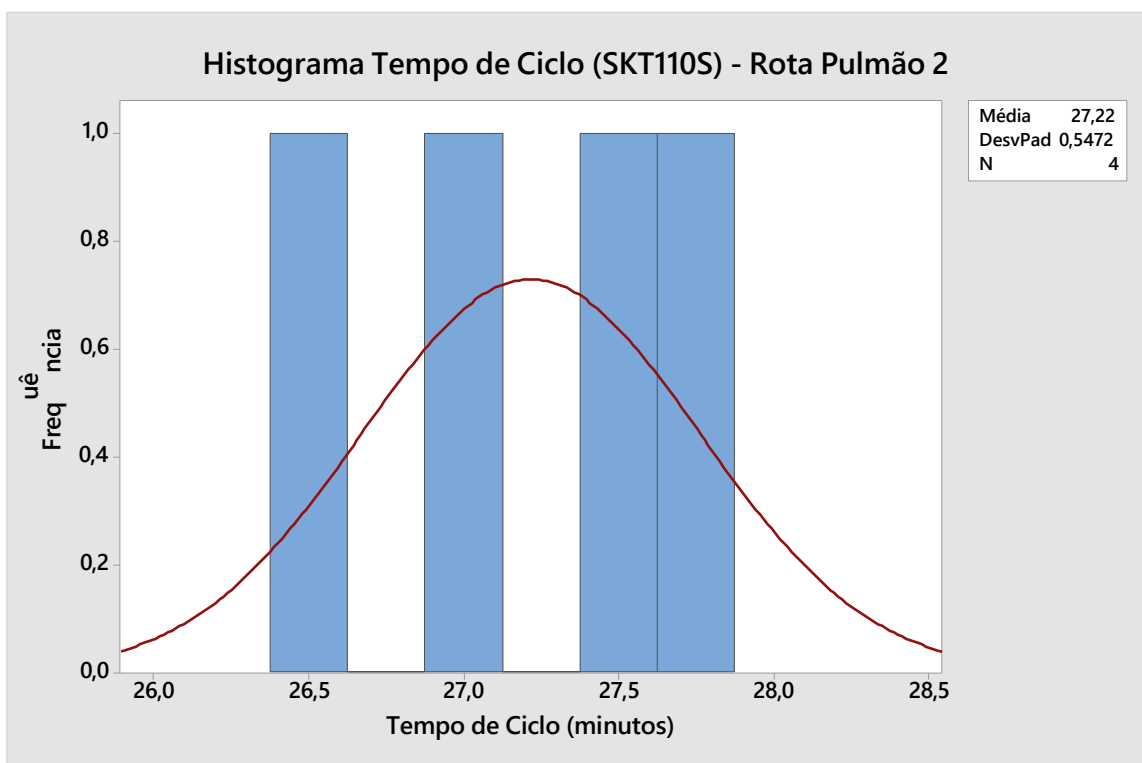


Figura 75 – Histograma Tempo de Ciclo (SKT110S) – Rota Pulmão 2

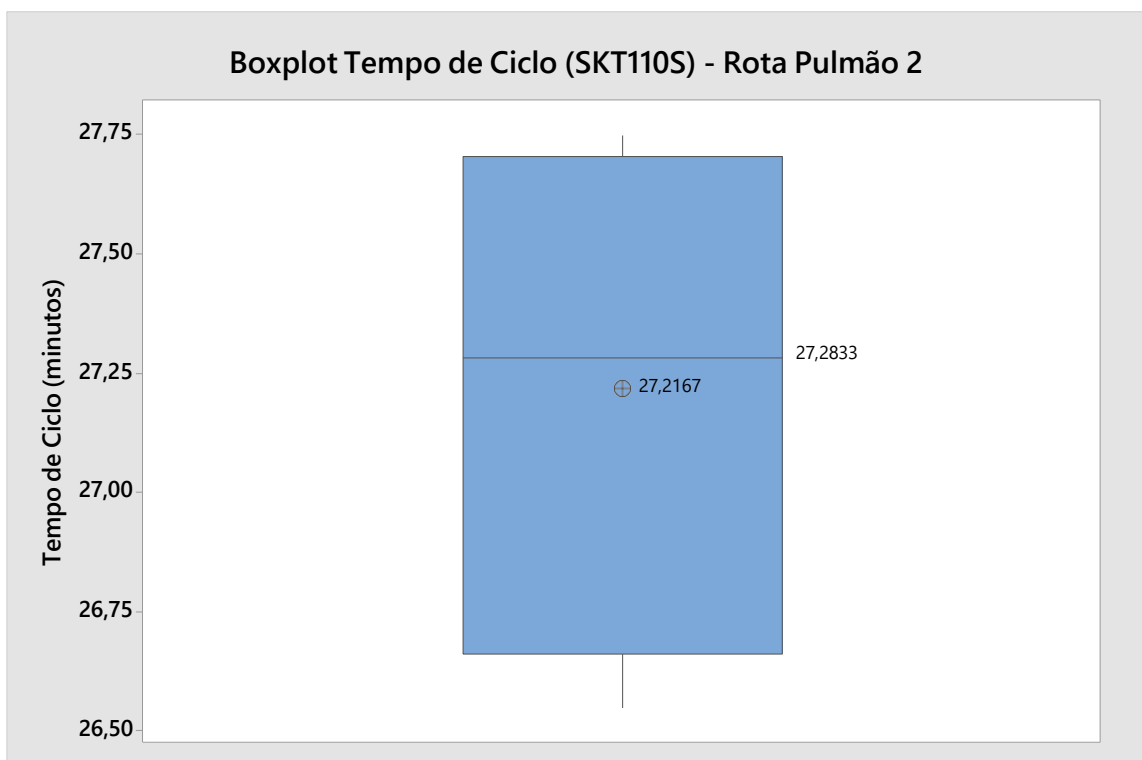


Figura 76 – Boxplot Tempo de Ciclo (SKT110S) – Rota Pulmão 2

Observa-se que, em média, para a rota Pulmão 2, o caminhão SKT110S obteve um tempo de ciclo (27,22 minutos) praticamente similar ao tempo do caminhão SKT90S (27,19 minutos), o

que indica uma maior produtividade do SKT110S, dada a sua maior capacidade de transporte de carga.

a) Produtividade (t/h) do caminhão SKT90S e do SKT110S

Para o caminhão SKT90S, que não dispõe de balança integrada, foi considerada uma carga média de 55 toneladas de rejeito filtrado. A produtividade foi calculada conforme a seguir:

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{\text{carga média}}{\text{tempo de ciclo médio}}$$

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{55}{27,19/60}$$

$$\text{Produtividade SKT90S } \left(\frac{t}{h}\right) = 121,37$$

Para o caminhão SKT110S, que dispõe de balança integrada, a carga média foi calculada conforme a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Carga média (t)} &= \frac{(\text{massa}_1) + (\text{massa}_2) \dots}{x_1 + x_2 \dots} \\ \text{Carga média (t)} &= \frac{(79,0) + (73,0) + (76,0) + (77,0)}{1 + 1 + 1 + 1} \\ \text{Carga média (t)} &= \frac{305}{4} = 76,25 \end{aligned}$$

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{\text{carga média}}{\text{tempo de ciclo médio}}$$

$$\text{Produtividade } \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{76,25}{27,22/60}$$

$$\text{Produtividade SKT110S } \left(\frac{t}{h}\right) = 168,06$$

b) Resumo Comparativo para a Rota Pulmão 2

A tabela abaixo apresenta um resumo comparativos dos tempos dos caminhões para a rota Pulmão 2.

Tabela 5 - Resumo comparativo dos caminhões Sany SKT90S e SKT110S para a rota Pulmão 2.
Fonte: O autor.

	Tempo +- desvio padrão (minutos)	
	SKT90S	SKT110S
Manobra para Carregamento	0,59 +- 0,14	0,94 +- 0,05
Carregamento	2,28 +- 0,18	3,60 +- 0,20
Operando Cheio	13,42 +- 1,29	14,38 +- 0,17
Velocidade média carregado (km/h)	14,8	13,8
Manobra para Basculamento	0,60 +- 0,34	0,73 +- 0,06
Basculamento	0,75 +- 0,25	0,84 +- 0,11
Operando Vazio	8,40 +- 0,90	7,67 +- 0,15
Velocidade média vazio (km/h)	23,6	25,8
Tempo de Ciclo	27,19 +- 2,04	27,22 +- 0,55
Produtividade (t/h)	121,4	168,1

5. CONCLUSÕES

As duas rotas de transporte de rejeito filtrado selecionadas para o estudo foram a Rota Setor X, cuja DMT é 2,8 km e a rota Pulmão 2, cuja DMT é 3,3 km.

Enquanto o caminhão SKT90S demandou 5 passes, o caminhão SKT110S demandou 7 passes da retroescavadeira, exigindo, necessariamente, maior tempo de carregamento.

Para a rota Setor X, no trecho carregado, os caminhões desenvolveram velocidades médias muito próximas (SKT90S: 14,3 km/h e SKT110S: 14,1 km/h), enquanto no trecho vazio, o SKT110S (21,9 km/h) superou em 2,6 km/h a velocidade média do SKT90S (19,3 km/h). Sob a ótica do desvio padrão, o tempo de ciclo do caminhão SKT90S (26,23 +- 1,19 minutos) foi similar ao tempo do caminhão SKT110S (25,41 +- 0,53 minutos). Contudo, a produtividade do SKT110S (171,3 t/h) superou em 45,5 t/h a do SKT90S (125,8 t/h).

Para a rota Pulmão 2, no trecho carregado, os caminhões desenvolveram velocidades médias relativamente próximas (SKT90S: 14,8 km/h e SKT110S: 13,8 km/h), enquanto no trecho vazio, o SKT110S (25,8 km/h) superou em 2,2 km/h a velocidade média do SKT90S (23,6 km/h). Sob a ótica do desvio padrão, o tempo de ciclo do caminhão SKT90S (27,19 +- 2,04 minutos) foi similar ao tempo do caminhão SKT110S (27,22 +- 0,55 minutos). Contudo, a produtividade do SKT110S (168,1 t/h) superou em 46,7 t/h a do SKT90S (121,4 t/h).

Destaca-se a presença de balança integrada no SKT110S, facilitando o acompanhamento da massa transportada em operações em que não se dispõe de fácil acesso à balança rodoviária, como é o caso da mina em estudo.

Por fim, conclui-se sobre a importância desse estudo para subsidiar a tomada de decisão na seleção de equipamentos de transporte, junto a um dimensionamento de frota adequado, buscando aumentar a produtividade, reduzir os custos associados ao transporte de rejeitos e otimizar o desempenho operacional.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, sugere-se:

- Avaliar a viabilidade da substituição da frota de caminhões SKT90S pelo SKT110S, não somente em relação à produtividade e custo, mas também sobre a ótica da operacionalidade de um caminhão de peso elevado em áreas de pilhas de rejeito, cujos acessos e vias possuem limitação geotécnica para a manutenção das condições de infraestrutura necessárias para a operação eficiente desse equipamento;
- Avaliar o impacto da carga morta na produtividade da frota de transporte;
- Avaliar a viabilidade do aumento do porte do equipamento de carga, levando-se em conta as limitações do ponto de carregamento quanto ao peso do equipamento, umidade elevada do rejeito e a demanda de material competente para forrar o piso e/ou o platô de carregamento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.; SILVA, R. Viabilidade de empreendimentos minerários com o uso de equipamentos de grande porte. Anais do Congresso Brasileiro de Mineração, 2020.

CATERPILLAR. A Reference Guide to Mining Machine Applications. 2009.

CHAVES, A. P. Mineração a Céu Aberto. 2. ed. São Paulo: Editora ABC, 2010.

CHOUDHARY, S., et al. Optimization of Haulage Operations in Open-Pit Mines. Journal of Mining Science, 2009.

DIAS, L. P., ALMEIDA, P. L. Análise de Fatores Geotécnicos no Carregamento e Transporte em Minas a Céu Aberto. Tese de Mestrado, UFOP, 2018.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. Introductory mining engineering. John Wiley & Sons, 2002.

LIMA, A.; FERREIRA, G. Dimensionamento de frotas e sua influência na produtividade de operações de mineração. Revista Brasileira de Mineração, 2018.

MARQUES, J. Dimensionamento de Frotas na Mineração: Um Estudo de Caso. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2012.

RIPPERGER, W., SUTHERLAND, I., THOMSON, K. Mineral Processing Technology. Elsevier, 2002.

SANTOS, M. A., BUENO, D. Avaliação da Produtividade de Caminhões em Minas a Céu Aberto. Revista Escola de Minas, 2011.

SANY (a). SKT90S. Disponível em: < https://www.sanyglobal.com/product/truck/off-highway_mining_truck/75/479/>. Acesso em: out. 2024.

SANY (b). SKT110S. Disponível em: < https://www.copemaquinas.com.br/_files/ugd/6827a5_63a87815106e489a941a7a93d3ab40fa.pdf>. Acesso em: out. 2024.

SANY (c). SY750H. Disponível em: < https://www.sanyglobal.com/pt/product/excavator/large_excavator/115/847/>. Acesso em: out. 2024.

SILVA, L.; COSTA, M. Movimentação de rejeitos e descaracterização de barragens: desafios e soluções operacionais. Engenharia de Minas e Meio Ambiente, 2021.

SILVA, R. et al. Automação em Operações de Mineração: O Caminho para o Futuro. Anais do Congresso Brasileiro de Mineração, 2020.

SILVA, R. et al. Produtividade em Operações de Mineração a Céu Aberto: Um Enfoque Prático. Revista Escola de Minas, 2010.

SOUZA, A. F. Automação e Produtividade em Minas a Céu Aberto. Anais do Congresso Brasileiro de Mineração, 2013.

SOUZA, J. et al. Otimização de operações unitárias na mineração. Revista de Engenharia de Minas, 2019.

UZAN, A. M. Estudo de dimensionamento de Frota de uma mina a céu aberto. Trabalho de Conclusão de Curso, UFMG, 2020.