



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECONOMIA**



**USO DA SIMULAÇÃO NA ANÁLISE DA CAPACIDADE DE
ATENDIMENTO DA FROTA DE CAMINHÕES
POLIGUINDASTES EM UMA USINA SIDERÚRGICA DE MINAS
GERAIS**

Pedro Henrique Pereira Andrade

OURO PRETO – MG

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECONOMIA



Pedro Henrique Pereira Andrade

**USO DA SIMULAÇÃO NA ANÁLISE DA CAPACIDADE DE
ATENDIMENTO DA FROTA DE CAMINHÕES
POLIGUINDASTES EM UMA USINA SIDERÚRGICA DE MINAS
GERAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção, Administração e Economia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do grau Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Pf. Dr. Aloisio de Castro Gomes Júnior

OURO PRETO – MG

2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Henrique Pereira Andrade

Uso da simulação na análise da capacidade de atendimento da frota de caminhões poliguindastes em uma usina siderúrgica de Minas Gerais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovada em 31 de agosto de 2023

Membros da banca

Doutor Aloísio de Castro Gomes Júnior - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor Helton Cristiano Gomes - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutora Irce Fernandes Gomes Guimarães - Universidade Federal de Ouro Preto

Aloísio de Castro Gomes Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/08/2023



Documento assinado eletronicamente por **Aloísio de Castro Gomes Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/09/2023, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0584735** e o código CRC **F13C070D**.

RESUMO

Os caminhões poliguindastes na siderurgia desempenham um papel importante na movimentação e gestão de materiais e resíduos dentro da usina, sendo utilizados para movimentação de matérias-primas, distribuição interna de materiais e remoção de resíduos. A logística desses caminhões envolve aspectos como planejamento de rotas, manutenções preventivas, segurança operacional, monitoramento e controle. O presente trabalho teve como objetivo central elaborar um modelo computacional para simular a dinâmica operacional do processo de atendimento de solicitações diárias de parte da frota de caminhões poliguindastes em uma usina siderúrgica, avaliando os resultados obtidos no cenário atual e propondo mudanças que possam gerar melhorias nos indicadores de performance. Grande parte dos dados foram obtidos por meio de relatórios e resumos operacionais do sistema de telemetria instalado nos equipamentos, realizando um tratamento estatístico antes de inseri-los e implementá-los no modelo elaborado no *software* de simulação Arena®. De acordo com os dados obtidos nesta simulação, nas condições do atual cenário simulado a frota de caminhões está com uma alta taxa de ocupação, sendo necessário equilibrar adequadamente a taxa de ocupação com a necessidade de manutenção, minimizando os impactos negativos e maximizando a eficiência e a vida útil dos equipamentos.

Palavras chaves: caminhão poliguindaste; logística; simulação.

ABSTRACT

Polycrane trucks in the steel industry play a crucial role in the movement and management of materials and waste within the plant. They are used for transporting raw materials, internal material distribution, and waste removal. The logistics of these trucks involve aspects such as route planning, preventive maintenance and availability, safety, monitoring, and control. The main objective of this study was to develop a computational model to simulate the operational dynamics of the process of handling daily requests from a fleet of truck-mounted cranes in a steel plant. The study evaluated the results obtained in the current scenario and proposed changes to improve performance indicators.

A significant amount of data was collected from reports and operational summaries generated by the telemetry system installed in the equipment. The data underwent statistical treatment before being inserted and implemented in the simulation model developed using the Arena® software. According to the data obtained from this simulation, under the conditions of the current scenario, the truck fleet has a high occupancy rate. It is necessary to properly balance the occupancy rate with maintenance requirements to minimize negative impacts and maximize equipment efficiency and lifespan.

Keywords: polycrane trucks; logistics; simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura logística nas organizações | 12 |
| Figura 2 - Metodologia de simulação | 17 |
| Figura 3 - Ciclo de vida da operação das caçambas | 25 |
| Figura 4 - Ciclo de vida da operação do técnico de controle | 25 |
| Figura 5 – Ciclo de vida da operação do caminhão poliguindaste | 25 |
| Figura 6 - Diagrama de ciclo de atividade DCA | 26 |
| Figura 7 - Divisão da planta da usina por geo áreas | 27 |
| Figura 8 - Divisão da planta da usina por geo áreas virtuais | 27 |
| Figura 9 - Etapa 1 do modelo de simulação | 34 |
| Figura 10 - Etapa 2 do modelo de simulação | 35 |
| Figura 11 - Etapa 3 do modelo de simulação | 36 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Caçambas movimentadas no ano de 2022 | 23 |
| Gráfico 2 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação da aciaria | 47 |
| Gráfico 3 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação da aciaria sem outliers | 47 |
| Gráfico 4 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 1 | 48 |
| Gráfico 5 - Gráfico 4 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 1 sem outliers | 48 |
| Gráfico 6 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 2 | 49 |
| Gráfico 7 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 2 sem outliers | 49 |
| Gráfico 8 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 1 | 50 |
| Gráfico 9 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 1 sem outliers | 50 |
| Gráfico 10 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 2 | 51 |
| Gráfico 11 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 2 sem outliers | 51 |
| Gráfico 12 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do DRI sem outliers | 52 |
| Gráfico 13 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do gasômetro | 52 |
| Gráfico 14 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do gasômetro sem outliers | 53 |
| Gráfico 15 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do GRI | 53 |
| Gráfico 16 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do GRI sem outliers | 54 |
| Gráfico 17 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do Harsco | 54 |
| Gráfico 18 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LCG | 55 |
| Gráfico 19 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LCG sem outliers | 55 |
| Gráfico 20 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LTQ | 56 |
| Gráfico 21 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LTQ sem outliers | 56 |
| Gráfico 22 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação da oficina central | 57 |
| Gráfico 23 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de carvão | 57 |
| Gráfico 24 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de carvão sem outliers | 58 |
| Gráfico 25 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de minério | 58 |
| Gráfico 26 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de sucatas | 59 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 27 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de sucatas sem outliers | 59 |
| Gráfico 28 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do PBT sem outliers | 60 |
| Gráfico 29 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do intervalo entre solicitações | 60 |
| Gráfico 30 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do intervalo entre solicitações sem outliers..... | 61 |
| Gráfico 31 - Distribuição estatística dos tempos de operação aciaria | 62 |
| Gráfico 32 - Distribuição estatística dos tempos de operação alto forno 1 | 62 |
| Gráfico 33 - Distribuição estatística dos tempos de operação alto forno 2 | 62 |
| Gráfico 34 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 1 | 63 |
| Gráfico 35 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 2 | 63 |
| Gráfico 36 - Distribuição estatística dos tempos de operação DRI..... | 63 |
| Gráfico 37 - Distribuição estatística dos tempos de operação gasômetro | 64 |
| Gráfico 38 - Distribuição estatística dos tempos de operação GRI..... | 64 |
| Gráfico 39 - Distribuição estatística dos tempos de operação Harsco | 64 |
| Gráfico 40 - Distribuição estatística dos tempos de operação LCG..... | 65 |
| Gráfico 41 - Distribuição estatística dos tempos de operação LTQ | 65 |
| Gráfico 42 - Distribuição estatística dos tempos de operação oficina central..... | 65 |
| Gráfico 43 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de carvão | 66 |
| Gráfico 44 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de minério..... | 66 |
| Gráfico 45 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de sucatas | 66 |
| Gráfico 46 - Distribuição estatística dos tempos de operação PBT | 67 |
| Gráfico 47 - Distribuição estatística dos tempos de operação intervalo de atendimentos | 67 |
| Gráfico 48 - Distribuição estatística dos tempos de operação aciaria (Jan e Fev/23) | 67 |
| Gráfico 49 - Distribuição estatística dos tempos de operação alto forno 1 (Jan - Fev/23) | 68 |
| Gráfico 50 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 1 (Jan-Fev/23). | 68 |
| Gráfico 51 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 2 (Jan-Fev/23). | 68 |
| Gráfico 52 - Distribuição estatística dos tempos de operação GRI (Jan-Fev/23) | 69 |
| Gráfico 53 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de carvão (Jan_Fev) | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Distribuição das solicitações realizada por geo área virtual e geo área | 28 |
| Tabela 2 - Tabela sintética das solicitações realizada por geo área..... | 29 |
| Tabela 3 - Tipos de materiais solicitados para retirada | 29 |
| Tabela 4 - Relação de resíduos retirados por área | 29 |
| Tabela 5 - Estatísticas descritivas sem retirada dos valores outliers | 30 |
| Tabela 6 - Estatísticas descritivas sem valores outliers | 31 |
| Tabela 7 - Sumário de distribuição com amostragem de dados de janeiro/23 | 33 |
| Tabela 8 - Sumário de distribuição com amostragem de dados de janeiro/23 e fevereiro/23..... | 33 |
| Tabela 9 - Distribuição de caçambas por geo área | 37 |
| Tabela 10 - Tabela adaptada das solicitações realizada por geo área..... | 38 |
| Tabela 11 - Velocidade média dos caminhões por vaga | 39 |
| Tabela 12 - Resultados de simulação dos cenários (1,2, 3 e 4) propostos pelo trabalho | 42 |

LISTA DE NOTAÇÕES

AF 1 – Alto Forno 1

AF 2 – Alto Forno 2

DCA – Diagrama de ciclo de atividades

DRI – Depósito de resíduos industriais

GRI – Gerenciamento de resíduos industriais

IAB – Instituto Aço Brasil

LCG – Laminação de chapas grossas

LTQ – Laminação de tiras a quente

PBT – Placa, blocos e tarugos

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução..... | 9 |
| 1.1. Objetivos | 10 |
| 1.1.1. Objetivo geral | 10 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 10 |
| 1.1.3. Estrutura do trabalho | 10 |
| 2. Referencial Teórico | 10 |
| 2.1. Logística | 10 |
| 2.2. Transporte e equipamentos | 13 |
| 2.3. Simulação | 14 |
| 2.3.1. Elementos de um modelo de simulação | 15 |
| 2.3.2. Modelos de simulação | 15 |
| 2.3.3. Fases de um estudo de simulação | 16 |
| 2.3.4. Vantagens e desvantagens no uso da simulação | 19 |
| 2.3.5. Aplicação da simulação na área siderúrgica..... | 20 |
| 3. Metodologia | 22 |
| 3.1. Descrição do cenário estudado | 22 |
| 3.2. Processo de atendimento do caminhão poliguindaste | 24 |
| 3.3. Modelo da simulação utilizando o Diagrama de Ciclo de Atividades (DCA) | 24 |
| 3.4. Extração dos dados..... | 26 |
| 3.5. Tratamento de dados | 30 |
| 3.6. Identificação da distribuição dos dados | 31 |
| 3.7. Modelo de simulação..... | 34 |
| 4. Simulação e resultado | 37 |
| 4.1. Cenários Simulados..... | 40 |
| 4.2. Resultados | 41 |
| 5. Conclusão | 43 |
| APÊNDICE A – GRÁFICOS DO TIPO BOXPLOT DOS DADOS DE OPERAÇÃO DAS GEO ÁREAS ESTUDADAS | 47 |
| APÊNDICE B – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE OPERAÇÕES DAS ÁREAS ESTUDADAS (JANEIRO/2023) | 62 |
| APÊNDICE C – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE OPERAÇÕES DAS ÁREAS ESTUDADAS (JANEIRO E FEVEREIRO/2023)..... | 67 |

1. Introdução

A indústria siderúrgica é o ramo da metalurgia que consiste na fabricação e tratamento de aço, sendo um importante fornecedor de insumos para diversos setores da indústria de transformação. Segundo os dados do Instituto Aço Brasil – IAB, em termos de estrutura do setor, a indústria brasileira é composta por 31 usinas, com capacidade instalada de 51,0 milhões de t/ano de aço bruto ao final de 2021, sendo responsável pela produção de 36,1 milhões de toneladas de aço, conferindo ao Brasil a 9ª posição no *ranking* mundial de produtos de aço.

A empresa objeto deste estudo trata-se de uma multinacional do setor siderúrgico, que possui uma unidade de operação no estado de Minas Gerais. A planta de operação iniciou suas atividades em 1986 e no ano de 2023 atingiu a marca de 100 milhões de aço bruto produzidos. Atualmente, a usina tem capacidade instalada de produção de 4,5 milhões de toneladas anuais de aço líquido, em uma planta de 10.000.000 m² e produz um mix de produtos em aço, como placas, chapas, chapas em bobina, chapas e bobinas laminadas a quente, lingotes, blocos e tarugos, perfis estruturais médios e pesados e fio-máquina.

O setor siderúrgico, apesar da importância para o desenvolvimento econômico, é um segmento responsável pela geração de grande quantidade de resíduos industriais, em razão das características relacionadas a cada etapa de seu processo produtivo. Por essa razão, o gerenciamento dos resíduos industriais tornou-se um tema estratégico para a empresa. Neste contexto, os caminhões poliguindastes, que são equipamentos projetados para movimentação de cargas pesadas, têm um papel crucial devido à sua capacidade de movimentação de materiais, contribuindo desta forma para eficiência operacional (podem ser usados para carregar e descarregar materiais em diferentes áreas), segurança no transporte (possuem capacidade de carga ajustável e reduz a necessidade do manuseio dos resíduos por parte humana) e flexibilidade (podem acessar áreas de difícil alcance, realizar movimentos precisos e posicionar as cargas conforme necessário) nas operações. Por esses motivos, o não atendimento desses equipamentos às áreas da usina pode afetar a logística interna, resultando em possíveis atrasos na produção.

Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta um estudo de modelagem do processo de funcionamento do caminhão poliguindaste e busca avaliar características acerca do processo e capacidade de atendimento de parte da frota de caminhões disponíveis.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é construir um modelo de simulação no software Arena® das atividades desenvolvidas por parte da frota de caminhões poliguindastes de uma usina siderúrgica localizada em Minas Gerais a fim de analisar indicadores de desempenho no cenário atual e propor possíveis cenários alternativos que possam contribuir para a melhoria das operações envolvidas.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do estudo são:

- Realizar uma estudo teórico sobre: logística, transporte e simulação;
- Realizar a coleta e tratamento de dados e informações acerca da operação dos caminhões poliguindaste;
- Simular cenários alternativos e desenvolver uma análise comparativa entre cenário real e cenários modelados, avaliando as medidas de desempenho e impactos gerados.

1.1.3. Estrutura do trabalho

O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica sobre o tema em questão, abordando os conceitos de logística, simulação e alguns exemplos da aplicabilidade da simulação no setor siderúrgico. O capítulo 3 compreende à apresentação da empresa em questão, descrição do processo a ser simulado e qual metodologia foi utilizada para extração dos dados, tratamento estatístico e construção do modelo. O capítulo 4 apresenta os elementos utilizados na simulação e resultados obtidos. No capítulo 5 será apresentado a conclusão do trabalho.

2. Referencial Teórico

2.1. Logística

O desenvolvimento da logística está muito ligado às operações e táticas militares durante a Segunda Guerra Mundial. Bowersox e Closs (1996, apud Nogueira, 2018, p. 23) afirmam que a logística inicialmente foi empregada na área militar para definição de

estratégias de guerra, combinando de forma mais eficiente o tempo, custos e os recursos disponíveis para o deslocamento das tropas e fornecimento de armamentos, abastecimento de munição e alimentação durante o trajeto, expondo-as o mínimo possível ao inimigo.

Após a Segunda Guerra Mundial, a logística tornou-se uma ferramenta indispensável para as empresas, pois todo o mundo necessitava de todos os tipos de produtos e a produção não supria toda a demanda. Segundo Paoleschi (2011, p. 18), O estudo da logística para contribuir com a redução de custos dentro do ambiente industrial teve início na década de 1960, quando surgiram os primeiros sistemas MRP II para planejamento, programação e controle da produção.

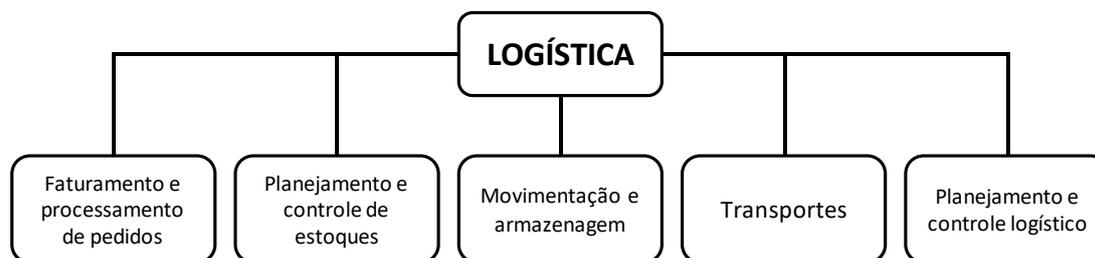
O mercado veio a se tornar cada vez mais exigente e diversos modelos, ferramentas de planejamento e filosofia de produção surgiram. Incorporou-se à logística industrial, na década de 1980, os primeiros sistemas para planejamento e administração de recursos, denominados de ERP (*Enterprise Resources Planning*, Planejamento dos Recursos da Empresa). Pode-se dizer que é um sistema integrado que possibilita um fluxo de informações único, contínuo e consistente por toda a empresa.

Paoleschi (2011, p. 20) também afirma que a tendência atual da área de sistemas de informações gerenciais não é de apenas visualizar a empresa isoladamente, mas toda a cadeia de suprimento, conseguindo realizar o planejamento estratégico e tático de maneira global, além do operacional para a empresa.

Por esse motivo, Ballou (2006, p. 27) define logística como um processo, lidando com além dos bens materiais, mas também com o fluxo de serviços, o que significa que inclui todas as atividades importantes para a disponibilização de bens e serviços aos consumidores quando e onde estes quiserem adquiri-los.

Um processo logístico eficiente deve compreender as áreas operacionais (suprimento, produção, distribuição) e buscar a minimização dos custos envolvidos, garantir a melhoria dos níveis de serviço e maximizar os lucros da organização. Segundo Nogueira (2018), o estudo da logística visa otimizar o conjunto de atividades que compõem a logística, de modo a atingir resultados de “distribuição” e “serviço ao cliente” com o menor custo possível. A eficiência da estrutura logística, ilustrada pela Figura 1, torne-se uma condição básica para a competitividade de todos os setores da economia.

Figura 1 - Estrutura logística nas organizações



Fonte: Adaptado de Nogueira, 2018

A logística interna (*inbound*) é um subcampo da logística que inclui todo fluxo, movimento físico e operações de suporte realizadas dentro de um armazém ou instalação de manufatura. São todas as atividades com algum tipo de fluxo interno, desde a origem das matérias primas e produtos até o recebimento e armazenagem em estoque.

Giacomelli, Pires (2016, p. 28) definem que uma grande parte das operações *inbound* caracterizam-se como desperdício (custo invisível), ou seja, ações que não agregam valor ao negócio. Entretanto, essas operações estão presentes em todas as empresas para atendimento de eventual necessidade, seja de layout, de cronograma das ações ou pelo tipo de produção ou negócio em questão. São exemplos de operações logísticas executadas em um armazém ou fábrica: recepção de material (matéria-prima, embalagens etc.), armazenamento, expedição de produtos, abastecimento de linhas de produção, recolha de produto acabado, etiquetagem etc. As empresas veem buscando melhoria e a otimização dos processos logísticos, de modo a eliminar todas as tarefas que não agreguem valor ao produto.

De acordo com Bowersox et al. (2014, p. 128) o planejamento logístico é responsável por coordenar o transporte, o armazenamento e o estoque dentro da empresa e entre os parceiros da cadeia de suprimentos, tornando-se essencial para a utilização eficaz dos recursos. Bowersox também afirma que:

A falta de ferramentas precisas e abrangentes de planejamento logístico e da cadeia de suprimentos historicamente resulta em mau uso da capacidade de produção, armazenamento e transporte. O foco cada vez mais forte na melhoria da utilização de ativos em conjunto com a melhoria nas capacidades e técnicas de administração da informação e análise de decisão tornou os sistemas abrangentes de planejamento mais realistas. (BOWERSOX et al. (2014, p. 128).

2.2. Transporte e equipamentos

A logística empresarial, segundo Silva et al. (2012), estuda como melhorar os níveis de serviços prestados a seus clientes e consumidores por meio de controle efetivo das atividades de movimentação de materiais, lidando com o desafio da distância entre a produção e demanda, de modo que os consumidores tenham os produtos onde e quando quiserem da maneira que desejam.

As atividades inerentes ao processo produtivo incluem o transporte de cargas, sejam elas contínuas ou não e diante disso, o transporte é componente mais importante dos custos logísticos para maioria das empresas. Por representarem grande parte dos custos de uma empresa, os modelos modais devem ser analisados detalhadamente para definir especificamente quais equipamentos podem ou não atender às necessidades do processo produtivo.

As atividades de transporte, de acordo com Grant (2013, p. 72), podem ser definidas como o planejamento e a execução da movimentação de mercadorias por uma transportadora entre dois pontos com um custo efetivo e cumprimento de prazos e condições especificadas pelo expedidor. Um sistema de transporte eficiente e de menor custo contribui para intensificar a competitividade no mercado, aumentar as economias de escala na produção e reduzir os preços dos produtos em geral.

Para se organizar um sistema de transporte é preciso ter uma visão sistêmica, que envolve planejamento, mas para isso é preciso que se conheça: os fluxos nas diversas ligações da rede; o nível de serviço atual; o nível de serviço desejado; as características ou parâmetros sobre a carga e os tipos de equipamentos disponíveis e suas características (capacidade, fabricante etc.).

Conforme descrito por Silva et al. (2012), estão disponíveis no mercado vários tipos de equipamentos de movimentação. Existem equipamentos que servem para o manuseio da grande variedade de materiais que normalmente as empresas necessitam armazenar. Como por exemplo, carrinho hidráulico, empilhadeira manual, empilhadeira frontal, empilhadeira frontal com contrapeso, empilhadeira elétrica com patola, empilhadeira pantográfica, empilhadeira lateral, empilhadeira trilaterais, empilhadeira selecionadora de pedidos dentre outras, cada uma com uma especificação e mais apropriada para determinado tipo de serviço.

A contratação ou aquisição de equipamentos pesados, por se tratar de um elevado custo, faz-se necessário uma pesquisa minuciosa para evitar a rápida obsolescência desses

equipamentos e nem os projetar acima das expectativas de uso. É necessário prever como o equipamento irá operar, isto é, se terá capacidade de atender as exigências de pontualidade do serviço, tempo de viagem, flexibilidade para lidar com diferentes tipos de cargas, gerenciar os riscos no ambiente de trabalho, possíveis danos e mau funcionamento etc. tornando-se capaz de executar outras funções logísticas.

2.3. Simulação

À medida que os problemas reais crescem com complexidade e a evolução dos sistemas computacionais, a simulação surge como uma ferramenta cada vez mais utilizada nas mais diversas áreas de conhecimento, sendo um meio importante para melhor compreender as propriedades dos processos e para se fazer inferências sobre suas características.

A simulação é um mecanismo de análise quantitativa que pode ser caracterizado como sendo a imitação e observação de um processo ou sistemas do mundo real (ou ainda não existentes) ao longo do tempo, permitindo realizar uma análise do comportamento do objeto estudado e testá-lo com variados cenários, sem o envolvimento de riscos físicos e com custo reduzido.

Sabadinni (2020) define a simulação como um método utilizado para estudar o desempenho de um sistema por meio de modelagem, baseando-se em fenômenos conhecidos que permitem estruturar os componentes do sistema e realizar experimentos que auxiliam na compreensão do sistema real.

De acordo com Sellitto et al. (2009), a simulação computacional pode ser definida da seguinte maneira:

A simulação computacional consiste no uso de um modelo computacional para exploração de conhecimento e experimentação na realidade. A simulação permite testes *what if*: altera-se um ou mais parâmetros do modelo e observa-se o que acontece em um ou mais parâmetros de saída. Este tipo de teste possibilita que se antevejam os resultados de mudanças de porte antes que sejam feitas, evitando gastos e riscos desnecessários. Pode-se exigir uma solução de compromisso: o modelo deve ser simples o suficiente para ser manuseado e preciso o suficiente para ser útil (PIDD, 1998 apud SELLITTO et al., 2009, p. 7).

2.3.1. Elementos de um modelo de simulação

Os elementos básicos para a construção de um modelo de simulação, de acordo com Almeida (2015, p. 15), são:

- Entidades: são elementos do sistema cujo comportamento é explicitamente rastreado, podendo ser permanentes ou temporários e agrupados em classes, conjuntos ou atributos (informações).
- Recursos: são elementos contáveis e não são modelados ou rastreados individualmente.
- Atributos: variáveis com valores únicos para cada entidade do sistema.
- Filas: termo de simulação para linhas, nas quais as entidades aguardam sua vez para atendimento.
- Eventos: são as mudanças de estado do sistema.
- Atividades: são as operações que envolvem entidades e mudam seus estados.
- Relógio da simulação: O relógio mantém o controle da evolução temporal da simulação na unidade de tempo escolhida e à medida em que o relógio da simulação avança, os eventos são realizados e o estado do sistema é atualizado.

2.3.2. Modelos de simulação

Os modelos de simulação, de acordo com Law (2015, p.5), podem ser de natureza dinâmica (mudança de estado ao longo do tempo), aleatórios (usando variáveis aleatórias) ou formados por entidades que interagem logicamente para um propósito, sendo estes modelos classificados em três dimensões:

- 1) Modelos de simulação estática vs. Dinâmica: Um modelo de simulação estática é uma representação de um sistema num determinado momento, ou um que pode ser usado para representar um sistema em que o tempo simplesmente não desempenha qualquer papel. Modelos de Monte Carlo, usados para avaliar funções matemáticas ou modelos financeiros são exemplos de modelos estáticos. Por outro lado, um modelo de simulação dinâmica representa um sistema à medida que evolui ao longo do tempo, tal como uma esteira rolante numa fábrica.

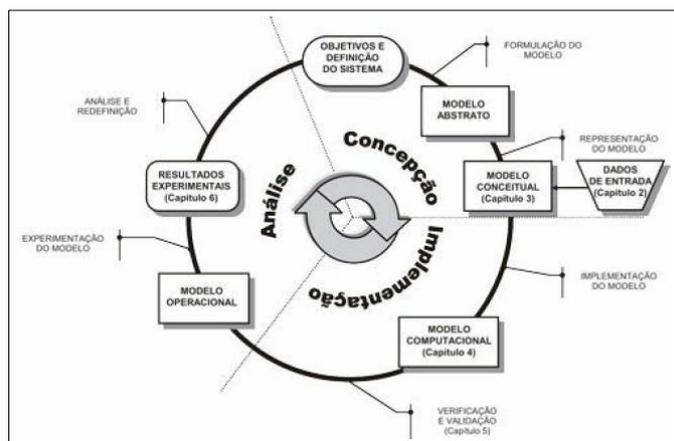
- 2) Modelos de Simulação Deterministas vs. Estocásticos. Se um modelo de simulação não contém quaisquer componentes probabilísticos (isto é, aleatórios), é chamado determinístico; um de equações diferenciais que descrevem uma reação química pode exemplificar tal modelo. Nos modelos determinísticos, a saída é "determinada", uma vez que o conjunto de quantidades e relações de entrada no modelo foram especificados, embora possa levar muito tempo de computador para avaliar o que é. Muitos sistemas, no entanto, devem ser modelados como tendo pelo menos alguns componentes de entrada aleatórios, e estes dão origem a modelos estocásticos de simulação. Os modelos de simulação estocástica produzem resultados que são em si aleatórios, e devem ser tratados, portanto, apenas como uma estimativa das características reais do modelo.
- 3) Modelos de Simulação Contínua vs. Discreta: A decisão de utilizar um sistema discreto ou contínuo para um determinado sistema depende dos objetos específicos do estudo. Para exemplo, um modelo de fluxo de tráfego numa autoestrada seria discreto se as características e o movimento de carros individuais fossem importantes. Em alternativa, se os carros puderem ser tratados "no agregado", o fluxo de tráfego pode ser descrito por equações diferenciais num modelo contínuo.

2.3.3. Fases de um estudo de simulação

O desenvolvimento de um projeto de simulação computacional envolve diversas etapas, que se estendem desde a compreensão do contexto em que o objeto de estudo está inserido até a formulação das soluções resultantes.

A concepção de um modelo de simulação, segue a proposta do método científico: uma hipótese é formulada, faz-se um planeamento experimental, seguido da validação das hipóteses (por meio de experimentação) e avaliação dos resultados obtidos. Para Chwif e Medina (2014, p. 59), o desenvolvimento de um modelo de simulação compõe-se de três grandes etapas: concepção ou formulação do modelo; implementação do modelo e análise dos resultados do modelo (Figura 2):

Figura 2 - Metodologia de simulação



Fonte: CHWIF e MEDINA (2014, p. 61)

Para Santos (1999, p. 4), as fases básicas para elaboração de um projeto de simulação são:

- 1) **Formulação do problema:** Cada projeto deve começar com a definição do problema a ser resolvido. É importante que a definição esteja clara para todos que participam do projeto.
- 2) **Determinação dos objetivos e planejamento global do projeto:** O objetivo indica as questões que devem ser respondidas pela simulação. Neste ponto deve ser considerado se a simulação é a metodologia apropriada para o problema. Nesta fase deve-se fazer também uma estimativa do tamanho da equipe envolvida, custo, tempo, etc...
- 3) **Construção do Modelo:** A construção de um modelo de um sistema é provavelmente mais arte que ciência. Embora não seja possível fornecer um conjunto de instruções que possibilitem construir à cada vez modelos apropriados, existem alguns linhas mestres que podem ser seguidas. A arte de modelar é melhorada se extrair as partes essenciais de um problema, selecionar e modificar as considerações básicas que caracterizam o sistema e então enriquecer e elaborar o modelo até a aproximação de resultados úteis. Assim, a melhor alternativa é começar com um modelo simples e ir aumentando sua complexidade. Entretanto a complexidade do modelo não necessita exceder o necessário para acompanhar os propósitos para qual o modelo foi construído. Não é necessário se ter uma relação de um para um entre o modelo e o sistema real. Somente a essência do sistema real é necessária. É indispensável

envolver o usuário na construção do modelo. Isto faz com que a qualidade do modelo resultante fique melhor e aumenta a confiança do usuário na sua futura aplicação.

- 4) Coleta de dados: Há uma interação constante entre a construção de um modelo e a coleta dos dados de entrada necessários. Geralmente quanto mais complexo o modelo, mais dados são necessários. Como a coleta de dados toma um tempo muito grande do tempo total de um projeto de simulação, é necessário começar esta coleta o mais cedo possível.

O processo de coleta de dados é uma etapa crítica no processo de construção de modelos. Essa etapa se inicia pela escolha adequada das variáveis de entrada para o sistema a ser simulado, tendo como objetivo principal garantir que a amostra obtida seja uma boa representação da realidade. Os dados coletados devem ser validados a fim de não propagar à simulação possíveis erros coletados.

A aleatoriedade que ocorre nos eventos na maioria dos sistemas leva à necessidade de tratamento estatístico dos dados que irão ser utilizados. A etapa de tratamento de dados compreende a utilização de técnicas estatísticas de amostragem e de medidas (média, moda, mediana, valor máximo e mínimo, desvio padrão, amplitude, variância e coeficiente de assimetria) para identificar as características da amostra coletada e descrever os dados levantados, identificar as possíveis falhas nos valores amostrados e aumentar o conhecimento acerca do fenômeno estudado.

Chwif e Medina (2014, p. 97) afirmam que todo levantamento de dados está sujeito a valores não usuais, conhecidos como *outliers*. As razões mais comuns para o seu surgimento são algum erro na coleta de dados ou eventos inesperados. Trata-se de um valor individual ou um conjunto de valores que está fora do padrão geral. No caso de sua utilização num modelo de simulação, pode levar a conclusões equivocadas, podendo gerar dados de saída distorcidos.

- 5) Codificação: Como a maioria dos sistemas do mundo real resulta em modelos que requerem muitas informações e de cálculos, o modelo deve ser programado em um computador digital. O modelador deve decidir se programa em uma linguagem de programação comum como Python, Java, C (++ , #), Pascal, Basic, etc..., ou se usa um pacote como o Arena, Simul, Promodel, Crystal Ball, etc...
- 6) Testes: Após a codificação dos programas é necessário testá-los para verificar se eles

não tem algum erro de programação. Deve-se preparar um conjunto de dados com a finalidade exclusiva de se testar os programas.

- 7) Validação: Nesta fase se verifica se o modelo é uma representação precisa do sistema que se quer modelar. É nesta fase que se faz a chamada calibração do modelo, ou seja, são feitos ajustes até que os resultados nos dê garantias de que o modelo é uma boa representação do problema sendo modelado.
- 8) Produção: Nesta etapa o modelo é colocado em produção e os dados obtidos são analisados. A produção pode envolver a execução, várias vezes, do modelo, variando-se os dados e os parâmetros de entrada.
- 9) Avaliação global dos resultados: Nesta fase avalia-se se os resultados obtidos estão condizentes com os esperados. Caso sejam encontradas discrepâncias podemos ter que voltar à etapa de construção do modelo.
- 10) Documentação e implementação: É fundamental, como em qualquer projeto, que a simulação seja documentada de forma clara e concisa. Os resultados obtidos também devem ser documentados e arquivados. A implantação, se o usuário participou do processo, tende a ser bem mais simples do que nos casos em que o usuário não teve uma participação ativa.

2.3.4. Vantagens e desvantagens no uso da simulação

A simulação é uma prática amplamente utilizada e é um método de estudo de sistemas complexos cada vez mais popular. Existem muitas áreas de aplicação para simulação, como por exemplo, no planejamento logístico de depósitos e armazéns, determinação de quantidades, tipo e layout de equipamentos e pessoal, planejamento de transportes, filas e fluxo de passageiros, engenharia de tráfego etc.

Entretanto, conforme afirma Law (2015), há algumas características boas e más de simulação, assim como alguns erros em estudos de simulação que podem prejudicar ou levar à erros um projeto de simulação.

Algumas possíveis vantagens da simulação são:

- Os sistemas mais complexos do mundo real com elementos estocásticos não podem ser descritos por um modelo matemático. Assim, a simulação é muitas vezes o único tipo de investigação possível.

- A simulação permite estimar o desempenho de um sistema existente sob algumas condições de funcionamento projetadas.
- Numa simulação é possível manter o controle sobre as condições experimentais, condição diferente do que geralmente ocorre quando se realiza experimentações no próprio sistema.
- Sistemas alternativos ao que foi proposto podem ser comparados através de simulação, verificando qual opção se adequa melhor a uma especificação exigida.
- Identificar as variáveis mais importantes de um sistema e como elas interagem através do estudo dos sinais de entrada e das saídas resultantes.

As desvantagens a serem consideradas são:

- Os modelos de simulação são frequentemente caros e demorados a desenvolver.
- Cada execução de um modelo de simulação estocástica produz apenas estimativas das verdadeiras características de um modelo. Assim, várias execuções do modelo serão necessárias para cada conjunto de parâmetros de entrada a ser estudado e por esse motivo não são tão bons na otimização como são na comparação de um número fixo de desenhos específicos de sistemas alternativos.
- Os resultados de uma Simulação podem ser difíceis de interpretar.
- Necessário ter pessoas com conhecimentos de metodologia de simulação.

2.3.5. Aplicação da simulação na área siderúrgica

O mercado vem passando por mudanças significativas nos últimos anos e para que as empresas possam se adaptar à maior concorrência e atender ao maior número de exigências dos clientes, faz-se necessário por parte das empresas buscar a melhor eficiência e a agilidade de seus processos, a melhoria na produtividade e qualidade de seus serviços/produtos, a redução de custos e oferecer preços competitivos.

Zumba, Braguini, Tallach (2019) abordam em seu estudo a aplicabilidade da simulação, por meio do software Arena®, encontrar a melhor performance da cadeia produtiva de uma trefilaria que produz aços longos trefilados, endireitados, laminados e usinados de alta precisão para o segmento da construção civil. O material específico para a análise do estudo é chamado de tela soldada Q138, vendida pela empresa com peso de 32,34 kg por peça e lotes contendo 80 peças. Foi realizada a parametrização de um mês

de produção com 25 dias, e 24 horas por dia. O cenário modelado foi validado pelo gestor do setor envolvido e a partir daí, proposto melhorias. Foram propostos dois cenários, no qual o primeiro foi descartado pois não seria possível implementar no cenário real da empresa e a segunda opção de melhoria foi a mais adequada, pois atingiu os objetivos planejados (disponibilizar um operador para outros processos da empresa).

Pinto e Pinto (2005) por meio de outro estudo de caso, utilizaram a simulação como ferramenta de tomada de decisões numa empresa do setor siderúrgico produtora de arames. Para tal, foi utilizado o software Arena® a fim de auxiliar na decisão da empresa de aumentar o número de máquinas de retrefilar para atingir a produção meta. Vale ressaltar que além do aumento no número de equipamentos, fez-se necessário analisar qual seria o quadro ideal de operadores para que nenhuma máquina ficasse parada por falta de mão de obra.

Foram testados sete cenários alternativos de produção, alterando parâmetros a fim de criar cenários alternativos e avaliar os possíveis impactos causados por algumas alterações no processo e/ou na organização do trabalho. O melhor cenário simulado resultou num ganho de aproximadamente 7% da produção e 5% de eficiência, além de aumentar a taxa de ocupação dos recursos em aproximadamente 1%. O modelo foi validado com os dados reais e as respostas às configurações propostas foram aproximadas àquelas obtidas com o uso de um método tradicional de planejamento da empresa.

Em sua obra, Werneck et al. (2021) utiliza-se da simulação computacional para desenvolvimento de dois cenários possíveis do processo de fabricação de um parafuso confeccionado em aço inox AISI 316 em uma empresa do setor metalúrgico, com o intuito de propor melhorias e otimizar as suas operações. O objeto de estudo foi escolhido por se tratar do lote que estava em linha de produção no dia da coleta de dados e para a fabricação do mesmo, faz-se necessário passar por 6 processos. A coleta de dados foi realizada in loco, durante o período de 3 dias, cronometrando a produção de todas as peças e para análise inicial dos dados utilizou-se o software Minitab® 19 e o software Arena® para fazer simulações dos processos, com o objetivo de descrever cada um deles. Ao final da análise dos resultados, concluiu-se que implementando o modelo proposto pelos autores, a empresa atingiria um percentual de 47,63% de economia de tempo para a produção das peças, investindo apenas 1,8% a mais no custo do processo.

Pode-se observar que a simulação é uma ferramenta versátil que oferece uma abordagem para testar e melhorar sistemas, processos e decisões em uma variedade de

campos. Ela desempenha um papel crítico na redução de riscos, no aprimoramento do desempenho e na promoção da inovação em diferentes setores.

3. Metodologia

Para construção de um modelo de simulação é necessário determinar os parâmetros de entrada e identificar quais dados melhor representam a realidade que está sendo simulada. Portanto, a modelagem proposta para operação foi dividida em extração e tratamento dos dados de entrada e modelagem utilizando software.

Existem vários softwares disponíveis para simulação de sistemas, mas as simulações apresentadas neste estudo foram realizadas no software ARENA®, utilizado para construção do modelo, visualização dos resultados através do *category overview* e determinação das distribuições de probabilidade através do *input analyser*.

O ARENA® se destaca por oferecer um ambiente gráfico que possibilita a integração dos recursos e processos, fornece métricas e indicadores, como tempo de ciclo, tempo de espera, utilização de recursos, filas e custos e permite a realização de análises estatísticas de resultados.

O tratamento estatístico refere-se ao processo de coleta, organização, análise e interpretação de dados por meio de métodos estatísticos. Ele desempenha um papel fundamental na pesquisa científica, na tomada de decisões e em muitos outros campos.

No presente trabalho, os dados foram obtidos via sistema, realizando um trato estatístico para atender aos requisitos da simulação. A primeira etapa foi de identificação e remoção dos *outliers*. Posteriormente verificou-se a distribuição mais adequada para representar os dados coletados e em casos que o modelo não era adequado para representar a distribuição da população, fez-se necessário aumentar o *range* dos dados coletados e repetir o processo de remoção de *outliers* e os testes de aderência de curvas.

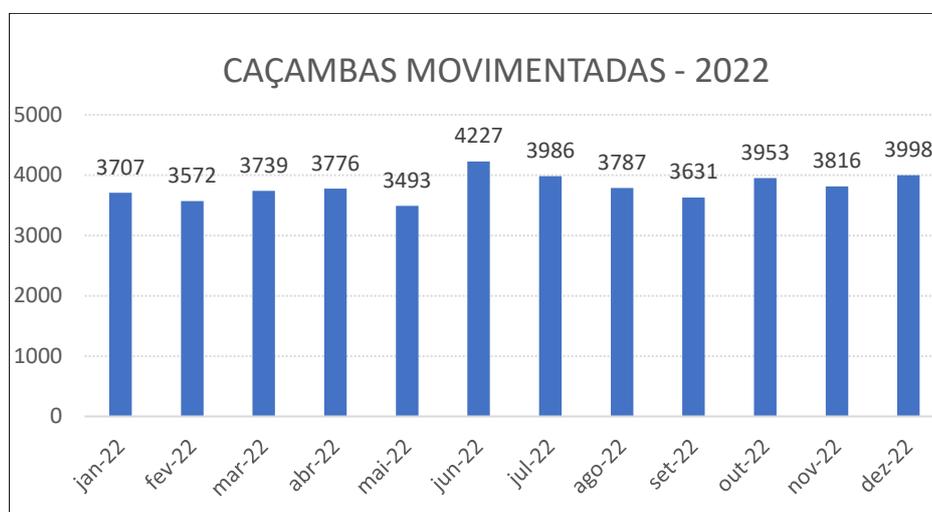
3.1. Descrição do cenário estudado

O ambiente analisado para o desenvolvimento desta monografia é uma usina siderúrgica localizada no estado de Minas Gerais. Dentro das várias gerências que compõem a diretoria da companhia, a gerência de logística é responsável pelo recebimento, armazenamento e expedição de materiais, além de toda movimentação dos

produtos por meio das linhas ferroviárias internas e pela movimentação dos equipamentos de grande porte que performam dentro da usina.

A célula do transporte pesado é responsável pelo gerenciamento, programação e distribuição de 203 equipamentos fixos. Dentre esses equipamentos destaca-se o caminhão poliguindaste (caminhão *brook*), veículo especificamente formatado para o transporte de caçambas estacionárias. O gráfico 1 contém informações acerca da quantidade de caçambas movimentadas na usina durante o ano de 2022, totalizando 45.685 caçambas, com média mensal de 3807 movimentações.

Gráfico 1 - Caçambas movimentadas no ano de 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A frota de caminhões poliguindastes opera em turnos ABCD (24h) e é composta por oito veículos, sendo seis com capacidade de remoção de cargas de até 15t., um com capacidade de até 10t. e outro com capacidade de remoção de cargas de até 8t. Metade da frota, devido a criticidade do processo, fica exclusiva para atendimento de determinadas áreas (região do alto forno, laminação de fio máquina, laminação de chapas grossas e gerência denominada águas e recirculação). O restante dos caminhões fica disponível para atendimento das programações diárias, conforme solicitações no sistema.

3.2. Processo de atendimento do caminhão poliguindaste

O processo de atendimento dos caminhões poliguindastes disponíveis para as programações diárias se inicia através da criação das solicitações de atendimento por partes dos clientes a serem atendidos.

As solicitações são feitas por meio do sistema integrado de telemetria, formando uma fila com todas as solicitações diárias da usina. Um técnico de controle fica responsável por monitorar as operações de todos os equipamentos e encaminhar as solicitações recebidas pelo sistema para os motoristas dos caminhões, informando-os qual a área a ser atendida, qual o tipo de material será recolhido e descartado, e também fazer a interface entre o motorista e solicitador, caso haja alguma eventualidade ou especificação no atendimento, como por exemplo, documentação específica, dificuldade de identificação de caçamba ou quaisquer outras situações.

Assim que retirada a caçamba do local, o motorista se desloca até o local correto para descarte do material e posteriormente retorna ao local de origem para devolução da caçamba, agora vazia.

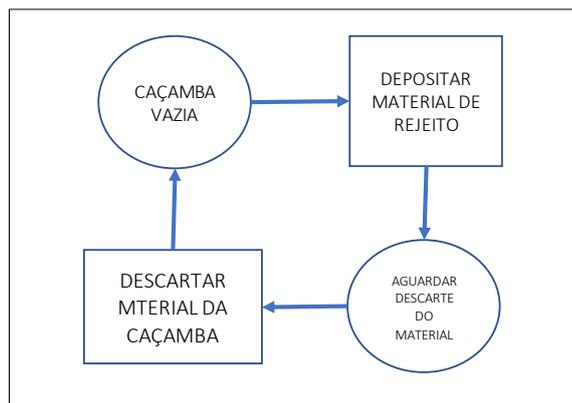
3.3. Modelo da simulação utilizando o Diagrama de Ciclo de Atividades (DCA)

A análise de um problema através de simulação envolve uma modelagem lógica do problema estudado. Dentre as diversas metodologias destaca-se o diagrama de ciclos de atividades (DCA), composto por três elementos (entidades, filas e atividades), capaz de descrever um problema através dos estados das entidades em cada momento.

Os DCA's são construídos a partir de elementos simples e representam problemas de diversas naturezas, facilitando a criação de programas de simulação, pois é uma ferramenta útil para visualização do fluxo de trabalho de um processo, identificação de gargalos e sequenciamento lógico das atividades.

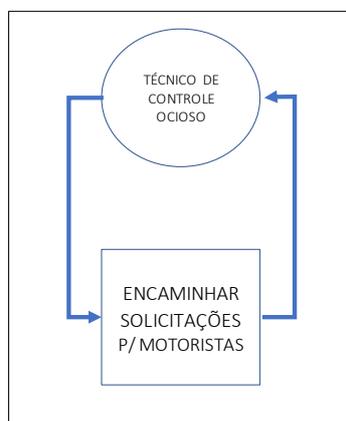
O DCA é composto por vários ciclos de atividades interligadas, que representam o comportamento e relação entre os elementos que compõem o sistema descrito. O ciclo de vida de entidades em uma simulação refere-se ao processo pelo qual são criadas, se movem, interagem e eventualmente são removidas da simulação. As figuras 3, 4 e 5 representam o ciclo de vida das entidades do processo de operação do caminhão poliguindaste.

Figura 3 - Ciclo de vida da operação das caçambas



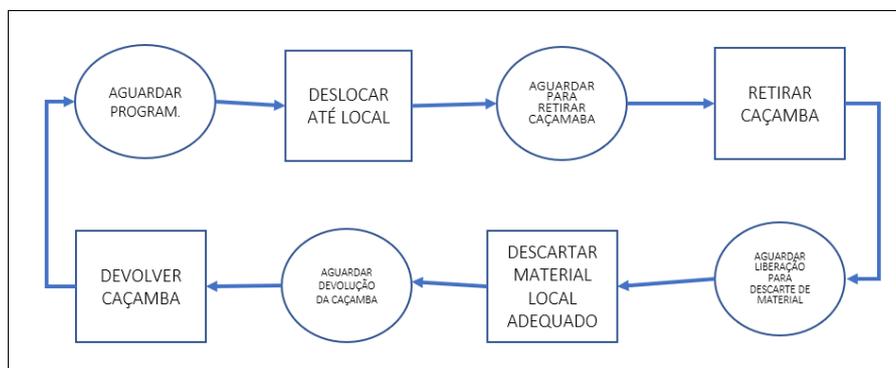
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 4 - Ciclo de vida da operação do técnico de controle



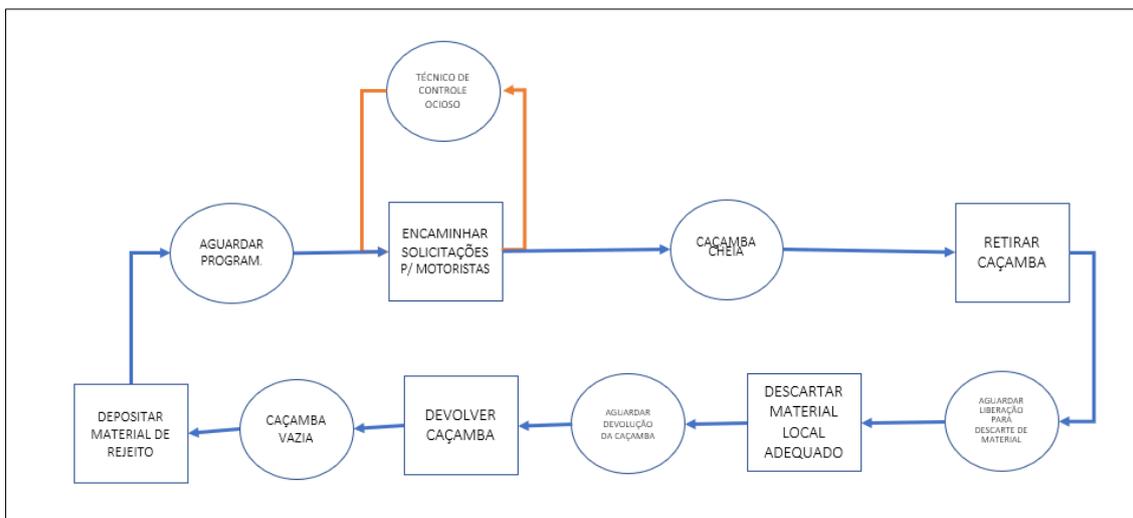
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 5 – Ciclo de vida da operação do caminhão poliguindaste



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 6 - Diagrama de ciclo de atividade DCA



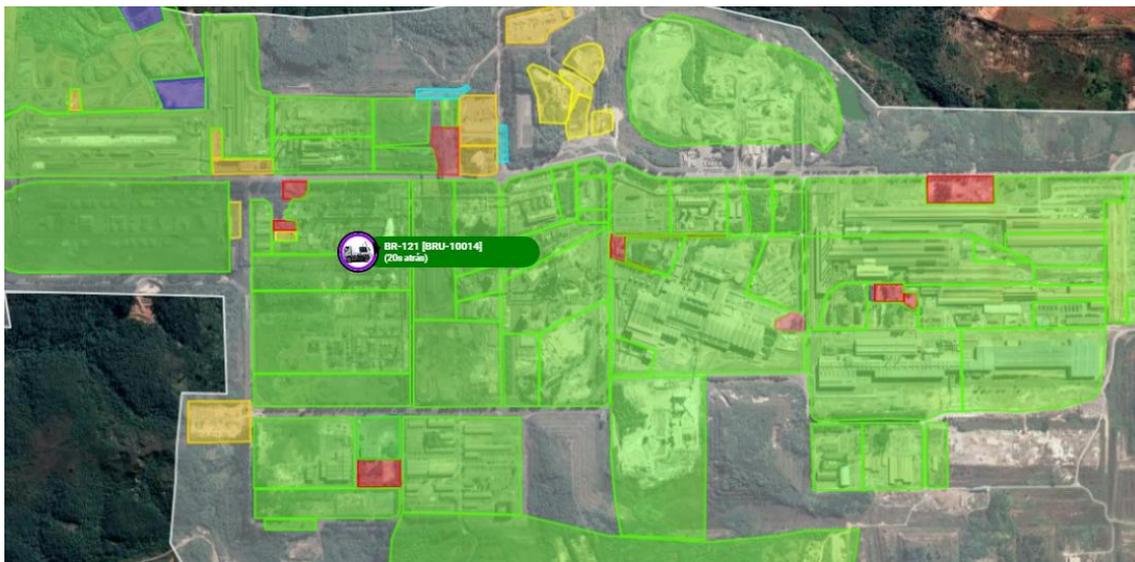
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.4. Extração dos dados

A coleta de dados foi realizada com auxílio do sistema de telemetria utilizado na frota dos equipamentos, possibilitando retirar os dados acerca da operação dos caminhões. Por meio deste sistema, é possível controlar todo o processo de solicitação, programação, execução, monitoramento online, medição de contratos e fazer qualquer tipo de análise, seja com relação a redução de custos, seja em controle de faturamento ou operações de forma centralizada.

Dentro do sistema de telemetria toda a planta da usina é dividida em geo áreas (figura 7) e subdivididas em geo áreas virtuais (figura 8). São essas as identificações utilizadas para determinar qual local deve ser feito o atendimento dos equipamentos quando solicitados. Em relação aos equipamentos, o sistema de telemetria faz a identificação e denominação através de vagas contratuais.

Figura 7 - Divisão da planta da usina por geo áreas



Fonte: Sistema de telemetria

Figura 8 - Divisão da planta da usina por geo áreas virtuais



Fonte: Sistema de telemetria

No sistema de telemetria fica registrado e disponível as informações acerca do comportamento e operação dos equipamentos dentro da usina, como por exemplo, o momento de entrada e saída dos equipamentos em determinada geo área, taxa de disponibilidade e utilização (%), tempo total de motor ligado, tempo total em movimento, quilometragem rodada, velocidade média, consumo médio de combustível (km/l), quantidade de acelerações e frenagens bruscas e curvas perigosas. Tais informações também são utilizadas para processamento da medição de pagamento e aplicação de penalidades

Os dados operacionais utilizados nesse estudo referem-se aos quatro caminhões poliguindastes que ficam à disposição para o atendimento das programações diárias (vaga BR-121, BR-152, BR-154, BR-157). A amostra de dados utilizados para representar a população no estudo foi extraída do sistema no período de 01/01/2023 a 31/01/2023.

A partir do processamento dos dados foi possível identificar que os caminhões estudados completaram 601 solicitações em 21 geo áreas diferentes, com 13 diferentes tipos de resíduos retirados. Mais detalhes acerca dos dados processados sobre o atendimento são apresentados na tabela 1, 2, 3 e 4:

Tabela 1 - Distribuição das solicitações realizada por geo área virtual e geo área

| GEO ÁREA VIRTUAL | QTDE. | GEO ÁREA | GEO ÁREA VIRTUAL | QTDE. | GEO ÁREA |
|---|-------|------------------|---|-------|------------------|
| A-01 - AEA/Coperauto | 1 | PÁTIO DE MINÉRIO | F-36 - Restaurante Alto Forno | 3 | MIST. DEGRADADO |
| A-02 - Subestação Principal | 2 | CTE | F-38 - Rampa do Alto Forno II | 27 | ALTO FORNO 2 |
| A-04 - Galpão Magnesita | 1 | ACIARIA | F39 | 1 | ALTO FORNO 1 |
| A-09 - Aciaria | 1 | ACIARIA | F-40 - Carregamento do Alto Forno 02 | 14 | GASOMETRO AF |
| A-10 - Lingotamento de Placa | 26 | ACIARIA | L-01 - Subestação do Perfil | 1 | PERFIL |
| A-11 - Calcinação | 6 | CALCINAÇÃO | L-03 - Portão da Ala Norte | 6 | PBT |
| A-15 - Desp. Forno de Painel Aciaria | 2 | ACIARIA | L-04 - Carepa Seca | 3 | PBT |
| A-18 - Lingotamento Convencional | 1 | ACIARIA | L-08 - Ala Norte | 3 | PBT |
| A-19 - Oficina da Aciaria | 11 | ACIARIA | L-09 - Oficina de Cilindros | 5 | PBT |
| A-21 - Área de Painéis | 31 | ACIARIA | L-15 - Restaurante Perfil | 6 | PBT |
| A-24 - Forno Painel 02 | 16 | ACIARIA | L-21 - Acabamento | 2 | PBT |
| A-25 - Patio de Sucata | 6 | PÁTIO DE SUCATAS | L-25 - Carregamento (Acabamento) | 1 | PBT |
| ACIARIA | 1 | ACIARIA | L-31 - Perfil (Proximo ao Restaurante) | 4 | PERFIL |
| ALTO FORNO 2 | 2 | ALTO FORNO 2 | L-35 - Perfil (Ala Norte) | 2 | PERFIL |
| C-01 - Virador de Vagos | 3 | PÁTIO DE MINÉRIO | L-37 - Laboratorio de Amostras | 4 | FIO MÁQUINA |
| C-13 - Sala Elétrica Pátio de Carvão | 19 | PÁTIO DE CARVÃO | L-43 - Forno de Reaquecimento de Fio Máquina | 2 | FIO MÁQUINA |
| C-14 - Oficina Reparo Coqueria / Sinter | 3 | COQUERIA 1 | L-52 Laminacao Perfis Acabamento (ala sul) | 7 | LQ |
| C-16 - Baterias de Coque 1 e 2 | 2 | COQUERIA 1 | L-55 - Área de Amostras de LCG | 4 | LCG |
| C-17 - Tratamento de Gás | 18 | COQUERIA 1 | L-56 - Escritorio de Estocagem LCG | 4 | LCG |
| C-22 - Coqueria | 4 | COQUERIA 2 | L-59 - Area de Tesoura | 6 | LCG |
| C-24 - Inspeção Mecânica da Coqueria | 1 | COQUERIA 1 | L-61 - Mulpic LCG | 1 | LQ |
| C-25 - Coqueria 02 | 33 | COQUERIA 2 | L-63 - Acabamento LCG | 54 | LCG |
| C-29 - Coqueria Nova | 1 | COQUERIA 1 | L-65 - Portão de Retífica de Cilindros Planos | 4 | LQ |
| F-05 - Central Térmica - CTE | 1 | RECIRCULAÇÃO AF | M-01 - Galpão 05 | 1 | ALMOXARIFADO |
| F-07 Recirculação da CTE | 5 | ALTO FORNO 2 | M-03 - Galpão 01 | 1 | ALMOXARIFADO |
| F-09 - Injeção de Finos - P.C.I. | 9 | ALTO FORNO 1 | O-01 - Oficina Central | 9 | OFICINA CENTRAL |
| F-10 - Elevador do Alto Forno | 37 | ALTO FORNO 1 | O-02 - Portão Oficina Central | 2 | OFICINA CENTRAL |
| F-11 - Pó Coletor | 10 | ALTO FORNO 1 | O-03 - Oficina Manutenção Locomotivas | 3 | OFICINA CENTRAL |
| F11 - Rampa do Alto Forno | 26 | ALTO FORNO 1 | O-07 - Fundição | 3 | OFICINA CENTRAL |
| F-11A - Despoiramento da Área de Corrida AF | 21 | ALTO FORNO 1 | S-02 - Centro de Controle do CC1 | 4 | PÁTIO DE MINÉRIO |
| F-12 - Dessulfuração | 8 | ALTO FORNO 1 | S-03 - Centro de Controle CC2 | 3 | PÁTIO DE MINÉRIO |
| F-15 - Oficina de Manutenção | 1 | ALTO FORNO 1 | S-12 - Tremonhas / P-06 | 3 | PÁTIO DE MINÉRIO |
| F-25 - Desmineralização de Água | 2 | RECIRCULAÇÃO AF | S-14 - DTMB - 106 | 4 | PÁTIO DE MINÉRIO |
| F-27 - Oficina de Apoio | 4 | GRI | A-17 - Acabamento de placas | 89 | ACIARIA |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 2 - Tabela sintética das solicitações realizada por geo área

| GEO ÁREA | QTDE | % |
|------------------|------------|-------------|
| ACIARIA | 179 | 29,78% |
| ALMOXARIFADO | 2 | 0,33% |
| ALTO FORNO 1 | 113 | 18,80% |
| ALTO FORNO 2 | 34 | 5,66% |
| CALCINAÇÃO | 6 | 1,00% |
| COQUERIA 1 | 25 | 4,16% |
| COQUERIA 2 | 37 | 6,16% |
| CTE | 2 | 0,33% |
| FIO MÁQUINA | 6 | 1,00% |
| GASOMETRO AF | 14 | 2,33% |
| GRI | 4 | 0,67% |
| LCG | 68 | 11,31% |
| LTQ | 12 | 2,00% |
| MIST. DEGRADADO | 3 | 0,50% |
| OFICINA CENTRAL | 17 | 2,83% |
| PÁTIO DE CARVÃO | 19 | 3,16% |
| PÁTIO DE MINÉRIO | 18 | 3,00% |
| PÁTIO DE SUCATAS | 6 | 1,00% |
| PBT | 26 | 4,33% |
| PERFIL | 7 | 1,16% |
| RECIRCULAÇÃO AF | 3 | 0,50% |
| TOTAL | 601 | 100% |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 3 - Tipos de materiais solicitados para retirada

| MATERIAL | LOCAL DE DESCARTE |
|------------------------|---------------------------|
| Bag | GRI |
| Borra de Alcatrão | PÁTIO DE CARVÃO |
| Carepa | PÁTIO DA HARSCO |
| Carvão | PÁTIO DE CARVÃO |
| Entulho | DRI |
| Inox | GRI |
| Lama | DRI |
| Madeira | DRI |
| Refratário | DRI |
| Respingo de Coque | COQUERIA 1 |
| Sucata | PÁTIO DE SUCATAS |
| MATERIAL | LOCAL DE DESCARTE |
| Pó | NÃO ESPECIFICADO MATERIAL |
| Solicitação programada | NÃO ESPECIFICADO MATERIAL |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 4 - Relação de resíduos retirados por área

| RESÍDUO | ACIARIA | ALTO FORNO 1 | ALTO FORNO 2 | COQUERIA 1 | COQUERIA 2 | GASOMETRO AF |
|------------------|---------|--------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------|
| GRI | - | - | - | - | - | - |
| PÁTIO DE CARVÃO | - | 5,41% | - | 28,57% | - | 100,00% |
| PÁTIO DA HARSCO | 2,08% | - | - | - | - | - |
| DRI | 47,92% | 89,19% | 90,91% | 42,86% | - | - |
| COQUERIA 1 | - | - | - | - | 100,00% | - |
| PÁTIO DE SUCATAS | 50,00% | 5,41% | 9,09% | 28,57% | - | - |
| RESÍDUO | LCG | LTQ | OFICINA CENTRAL | PÁTIO DE CARVÃO | PÁTIO DE MINÉRIO | PBT |
| GRI | - | - | - | 100,00% | 33,33% | - |
| PÁTIO DE CARVÃO | - | - | - | - | - | - |
| PÁTIO DA HARSCO | - | 14,29% | - | - | - | 50,00% |
| DRI | - | 42,86% | 22,22% | - | - | 20,00% |
| COQUERIA 1 | - | - | - | - | - | - |
| PÁTIO DE SUCATAS | 100,00% | 42,86% | 77,78% | - | 66,67% | 30,00% |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para modelagem do sistema é necessário realizar o tratamento dos dados sobre os intervalos entre a chegada das solicitações, tempos de retirada das caçambas em cada área e tempo gasto para descarte de cada material.

3.5. Tratamento de dados

Nesta fase de tratamento de dados, são utilizadas ferramentas da estatística descritiva para explorar o conjunto de dados de modo a compreender melhor o processo. Existem diversos softwares e ferramentas de estatística e de análise que podem ser utilizados para examinar dados atuais e passados para descobrir tendências e prever padrões. Neste estudo, utilizou-se o *Minitab Statistical Software* para realizar os testes estatísticos necessários e identificar as possíveis falhas nos valores amostrados.

Durante a coleta de dados pode haver a ocorrência de valores não usuais, denominados de *outliers*. Esses dados distorcem as estimativas e são provenientes de um erro na coleta de dados ou ocorrência de um evento raro. Para melhor representação e verificação da existência de *outliers* nos dados coletados, foram construídos gráficos do tipo *boxplot* (apêndice A) e obteve-se as estatísticas descritivas apresentadas na tabela 7.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas sem retirada dos valores outliers

| ÁREA | MÉDIA | DESV. PADRÃO | VARIÂNCIA | MÍNIMO | MEDIANA | MÁXIMO | AMPLITUDE |
|---|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| ACIARIA | 21,36 | 16,41 | 269,21 | 6,00 | 18,00 | 134,00 | 128,00 |
| ALTO FORNO 1 | 17,41 | 13,33 | 152,07 | 6,00 | 14,00 | 96,00 | 90,00 |
| ALTO FORNO 2 | 17,23 | 12,04 | 144,98 | 6,00 | 13,00 | 61,00 | 55,00 |
| COQUERIA 1 | 19,04 | 13,41 | 179,96 | 6,00 | 13,00 | 62,00 | 56,00 |
| COQUERIA 2 | 16,83 | 11,31 | 127,83 | 6,00 | 15,00 | 114,00 | 108,00 |
| DRI | 22,45 | 6,37 | 40,51 | 9,00 | 23,00 | 38,00 | 29,00 |
| GASÔMETRO AF | 18,69 | 14,64 | 214,37 | 6,00 | 13,00 | 63,00 | 57,00 |
| GRI | 13,25 | 6,02 | 36,20 | 6,00 | 13,50 | 26,00 | 20,00 |
| HARSCO | 21,40 | 6,15 | 37,78 | 8,00 | 21,00 | 37,00 | 29,00 |
| LCG | 17,68 | 8,62 | 74,26 | 6,00 | 16,00 | 68,00 | 62,00 |
| LTQ | 23,72 | 19,26 | 370,98 | 6,00 | 17,50 | 92,00 | 86,00 |
| OFICINA CENTRAL | 24,38 | 19,35 | 374,45 | 6,00 | 19,00 | 64,00 | 58,00 |
| PÁTIO DE CARVÃO | 13,68 | 5,66 | 32,04 | 6,00 | 13,00 | 29,00 | 23,00 |
| PÁTIO DE MINÉRIOS | 12,58 | 5,15 | 26,49 | 6,00 | 11,00 | 22,00 | 16,00 |
| PÁTIO DE SUCATAS | 12,69 | 9,95 | 98,95 | 6,00 | 10,00 | 92,00 | 86,00 |
| PBT | 10,80 | 4,96 | 24,57 | 6,00 | 9,00 | 23,00 | 17,00 |
| INTERVALO ENTRE CHEGADA DE ATENDIMENTOS | 78,18 | 105,68 | 11169,25 | 1,00 | 41,00 | 893,00 | 892,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após a construção de todos os gráficos, apenas as amostras de dados do DRI, Harsco, oficina central, pátio de minérios e PBT não apresentaram *outliers*. Após a remoção desses valores, novas estatísticas foram obtidas (Tabela 8) e novos gráficos do tipo *bloxpote* foram gerados (Apêndice A).

Tabela 6 - Estatísticas descritivas sem valores outliers

| ÁREA | MÉDIA | DESV. PADRÃO | VARIÂNCIA | MÍNIMO | MEDIANA | MÁXIMO | AMPLITUDE |
|---|-------|--------------|-----------|--------|---------|--------|-----------|
| ACIARIA | 18,30 | 9,72 | 94,46 | 6,00 | 17,00 | 45,00 | 39,00 |
| ALTO FORNO 1 | 14,44 | 6,03 | 36,34 | 6,00 | 14,00 | 30,00 | 24,00 |
| ALTO FORNO 2 | 11,72 | 3,70 | 13,66 | 6,00 | 11,00 | 21,00 | 15,00 |
| COQUERIA 1 | 12,09 | 4,03 | 16,23 | 6,00 | 12,50 | 21,00 | 15,00 |
| COQUERIA 2 | 14,56 | 4,52 | 20,46 | 6,00 | 15,00 | 26,00 | 20,00 |
| DRI | 22,45 | 6,37 | 40,51 | 9,00 | 23,00 | 38,00 | 29,00 |
| GASÔMETRO AF | 11,32 | 5,03 | 25,31 | 6,00 | 10,00 | 24,00 | 18,00 |
| GRI | 11,43 | 3,63 | 13,19 | 6,00 | 12,00 | 15,00 | 9,00 |
| HARSCO | 21,40 | 6,15 | 37,78 | 8,00 | 21,00 | 37,00 | 29,00 |
| LCG | 16,00 | 5,23 | 27,37 | 6,00 | 16,00 | 28,00 | 22,00 |
| LTQ | 23,72 | 19,26 | 370,98 | 6,00 | 17,50 | 92,00 | 86,00 |
| OFICINA CENTRAL | 24,38 | 19,35 | 374,45 | 6,00 | 19,00 | 64,00 | 58,00 |
| PÁTIO DE CARVÃO | 13,51 | 5,45 | 29,67 | 6,00 | 13,00 | 26,00 | 20,00 |
| PÁTIO DE MINÉRIOS | 12,58 | 5,15 | 26,49 | 6,00 | 11,00 | 22,00 | 16,00 |
| PÁTIO DE SUCATAS | 10,11 | 3,11 | 9,66 | 6,00 | 10,00 | 18,00 | 12,00 |
| PBT | 10,80 | 4,96 | 24,57 | 6,00 | 9,00 | 23,00 | 17,00 |
| INTERVALO ENTRE CHEGADA DE ATENDIMENTOS | 43,76 | 44,48 | 1978,61 | 1,00 | 29,00 | 164,00 | 163,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A identificação de inúmeros *outliers* na grande parte dos processos é um reflexo do dinamismo e aos diversos elementos envolvidos na rotina de operação em uma usina siderúrgica, havendo n variáveis que podem alterar os respectivos processos.

3.6. Identificação da distribuição dos dados

Após a retirada dos *outliers* é necessário qualificar a aderência do modelo. Segundo Chwif e Medina (2014, p. 113) isso significa verificar se a distribuição exponencial é estatisticamente adequada para representar os dados coletados.

Nos testes estatísticos de aderência, uma hipótese nula determina que a distribuição candidata é suficientemente boa para representar os dados, enquanto a hipótese alternativa determina que não é (ALMEIDA, 2015 p.13).

Existem diversos testes disponíveis para verificação da hipótese de independência, porém os mais utilizados são testes de aderência, que verificam se a distribuição é adequada para representar os dados coletados. Os testes mais usados são Chi-quadrado e Kolmogorov-Smirnov. Por meio desses testes é possível testar a validade ou não dessa hipótese de aderência (ou hipótese nula):

- H_0 : o modelo é adequado para representar a distribuição da população.

Em confronto com a hipótese alternativa:

- H_a : o modelo não é adequado para representar a distribuição da população.

O *Input Analyzer* do Arena possui a funcionalidade de ajustar distribuições aos dados amostrais e elaborar testes de aderência de curvas. O software fornece um certo valor, denominado *p-value*, a partir do qual são tomadas as decisões de rejeição ou não da hipótese de aderência. Segundo Chwif e Medina (2014, p. 130), o *p-value*, ou nível descritivo, representa o menor nível de significância que pode ser assumido para se rejeitar a hipótese de aderência, ou seja:

- Se $p\text{-value} \leq \alpha$, então, H_0 é rejeitada ao nível de significância α ;
- Se $p\text{-value} > \alpha$, então, H_0 não é rejeitada ao nível de significância α .

Portanto, quanto menor o *p-value*, mais razões temos para rejeitar a hipótese de aderência. Com base no sumário de distribuição (tabela 7) e nos gráficos de distribuição estatísticas (apêndice B) obtidos a partir da utilização da ferramenta *Input Analyzer* aos dados amostrais de cada área, foi possível avaliar se o modelo é adequado para representar a distribuição da população para as respectivas áreas.

Para aquelas áreas em que se rejeitou a hipótese de aderência, fez-se necessário aumentar o tamanho da amostra de dados e refazer o processo de verificação da presença de *outliers* e qualificar a aderência do modelo. Novos gráficos de distribuição foram gerados (apêndice C), assim como um novo sumário de distribuição (tabela 8).

Tabela 7 - Sumário de distribuição com amostragem de dados de janeiro/23

| ÁREA | DISTRIBUIÇÃO | EXRESSÃO | ERRO QUADRÁTICO | TEST DO CHI-QUADRADO | | | | |
|---|--------------|---------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-------------------|---------|---|
| | | | | Número de intervalos | Graus de liberdade | Teste estatístico | P-value | correspondente |
| ACIARIA | Beta | 5.5 + 40 * BETA(0.859, 1.83) | 0.004595 | 30,00 | 27,00 | 82.6 | < 0.005 | H0 é rejeitada ao nível de significância α |
| ALTO FORNO 1 | Beta | 5.5 + 40 * BETA(0.977, 2.36) | 0.002465 | 32,00 | 29,00 | 87,00 | < 0.005 | H0 é rejeitada ao nível de significância α |
| ALTO FORNO 2 | Poisson | POIS(11.7) | 0.004701 | 8,00 | 6,00 | 3.43 | > 0.75 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (> 0.75 > 0,05) |
| COQUERIA 1 | Beta | 5.5 + 16 * BETA(1.16, 1.66) | 0.027647 | 7,00 | 4,00 | 11.1 | 0.025 | H0 é rejeitada ao nível de significância α |
| COQUERIA 2 | Weibull | 5.5 + WEIB(10.2, 2.09) | 0.012093 | 14,00 | 11,00 | 35.3 | < 0.005 | H0 é rejeitada ao nível de significância α |
| DRI | Normal | NORM(22.4, 6.34) | 0.012056 | 9,00 | 6,00 | 4.11 | 0.664 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.664 > 0,05) |
| GASÔMETRO AF | Lognormal | 5.5 + LOGN(6.27, 8.16) | 0.016882 | 6,00 | 3,00 | 7.06 | 0.0741 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0741 > 0,05) |
| GRI | Weibull | 0.999 + WEIB(18.3, 0.553) | 0.005058 | 1,00 | -2 | 0.00588 | < 0.005 | H0 é rejeitada ao nível de significância α |
| HARSCO | Normal | NORM(20.7, 6.36) | 0.004277 | 19,00 | 16,00 | 24.6 | 0.0816 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0816 > 0,05) |
| LCG | Normal | NORM(16, 5.22) | 0.005350 | 15,00 | 12,00 | 18.8 | 0.0948 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0948 > 0,05) |
| LTQ | Weibull | 5.5 + WEIB(12.7, 1.7) | 0.024771 | 8,00 | 5,00 | 7.05 | 0.226 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.226 > 0,05) |
| OFICINA CENTRAL | Beta | 5.5 + 59 * BETA(0.467, 0.688) | 0.071429 | 4,00 | 1,00 | 2.91 | 0.0908 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0908 > 0,05) |
| PÁTIO DE CARVÃO | Beta | 5.5 + 21 * BETA(0.956, 1.55) | 0.011116 | 13,00 | 10,00 | 20.7 | 0.024 | H0 é rejeitada ao nível de significância α |
| PÁTIO DE MINÉRIOS | Beta | 5.5 + 17 * BETA(0.687, 0.963) | 0.078508 | 4,00 | 1,00 | 2.67 | 0.104 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.104 > 0,05) |
| PÁTIO DE SUCATAS | Erlang | 4.5 + ERLA (3.05, 2) | 0.015506 | 7,00 | 4,00 | 8.7 | 0.0729 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0729 > 0,05) |
| PBT | Lognormal | 5.5 + LOGN(5.72, 8.12) | 0.012089 | 6,00 | 3,00 | 7.15 | 0.0712 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0712 > 0,05) |
| INTERVALO ENTRE CHEGADA DE ATENDIMENTOS | Beta | 0.999 + 163 * BETA(0.419, 1.18) | 0.003437 | 18,00 | 15,00 | 22.9 | 0.0888 | H0 não é rejeitada ao nível de significância (0.0888 > 0,05) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 8 - Sumário de distribuição com amostragem de dados de janeiro/23 e fevereiro/23

| ÁREA | DISTRIBUIÇÃO | EXRESSÃO | ERRO QUADRÁTICO | TEST DO CHI-QUADRADO | | | | |
|-----------------|--------------|------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-------------------|---------|---|
| | | | | Número de intervalos | Graus de liberdade | Teste estatístico | P-value | correspondente |
| ACIARIA | Beta | 5.5 + 41 * BETA(0.978, 1.84) | 0.002279 | 31 | 28 | 40.2 | 0,0662 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0662 > 0,05) |
| ALTO FORNO 1 | Weibull | 5.5 + WEIB(8.95, 1.41) | 0.002906 | 16 | 13 | 19.8 | 0.0996 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0996 > 0,05) |
| COQUERIA 1 | Beta | 5.5 + 15 * BETA(0.957, 1.48) | 0.014833 | 7 | 4 | 8.94 | 0.066 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.066 > 0,05) |
| COQUERIA 2 | Weibull | 5.5 + WEIB(9.4, 1.81) | 0.006731 | 14 | 11 | 14.4 | 0.22 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.22 > 0,05) |
| PÁTIO DE CARVÃO | Weibull | 5.5 + WEIB(7.35, 1.56) | 0.005584 | 11 | 8 | 12.7 | 0.13 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.13 > 0,05) |
| GRI | Gama | 5.5 + GAMM(5.67, 1.27) | 0.056610 | 4 | 1 | 2.91 | 0.0954 | H0 não é rejeitada ao nível de significância α (0.0954 > 0,05) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

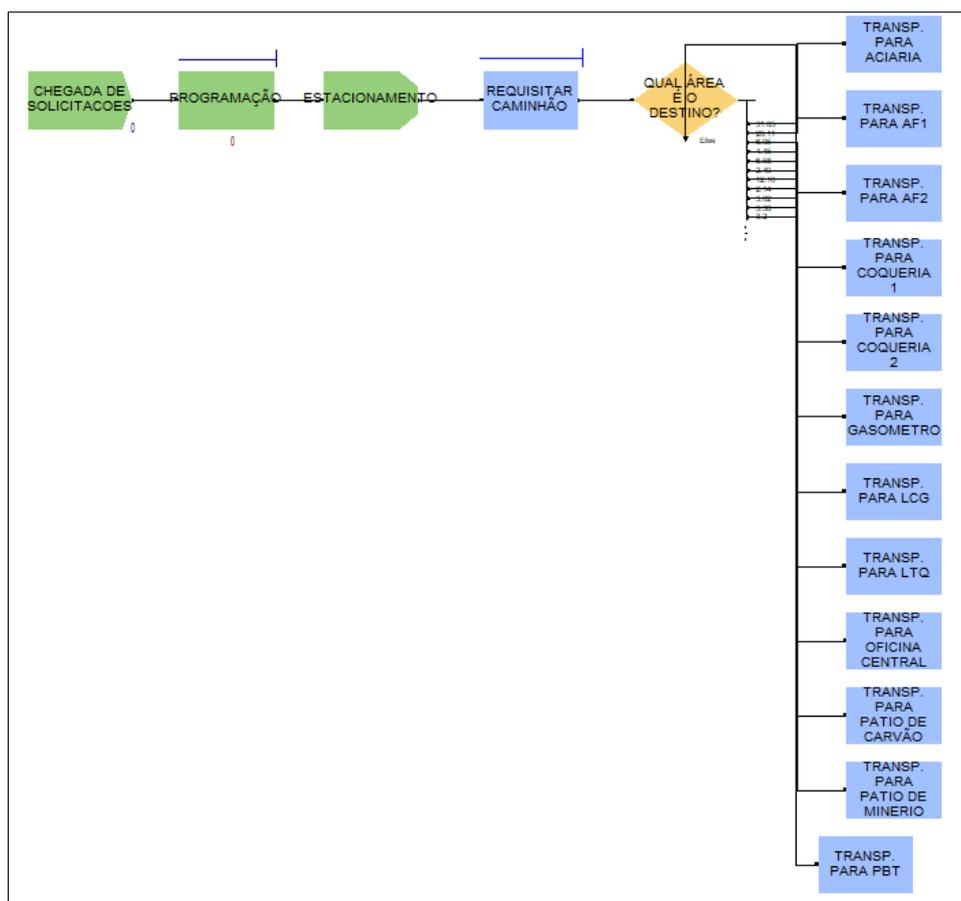
3.7. Modelo de simulação

A modelagem é desenvolvida a partir de uma visão dos processos do sistema e de suas interações. Pode ser simbolizado tudo que acontece em determinada situação do sistema observado, através de três processos: a criação ou chegada, o serviço ou processamento que é realizado ou recebido de um recurso e a partida (FREITAS FILHO, 2008).

O fluxograma realizado pelo software ARENA®, que descreve o cenário atual tem a sequência de acordo com cada etapa de produção e foi dividido em três etapas:

1 - Chegada de solicitações, requisição de caminhão para atendimento nas áreas (figura 9):

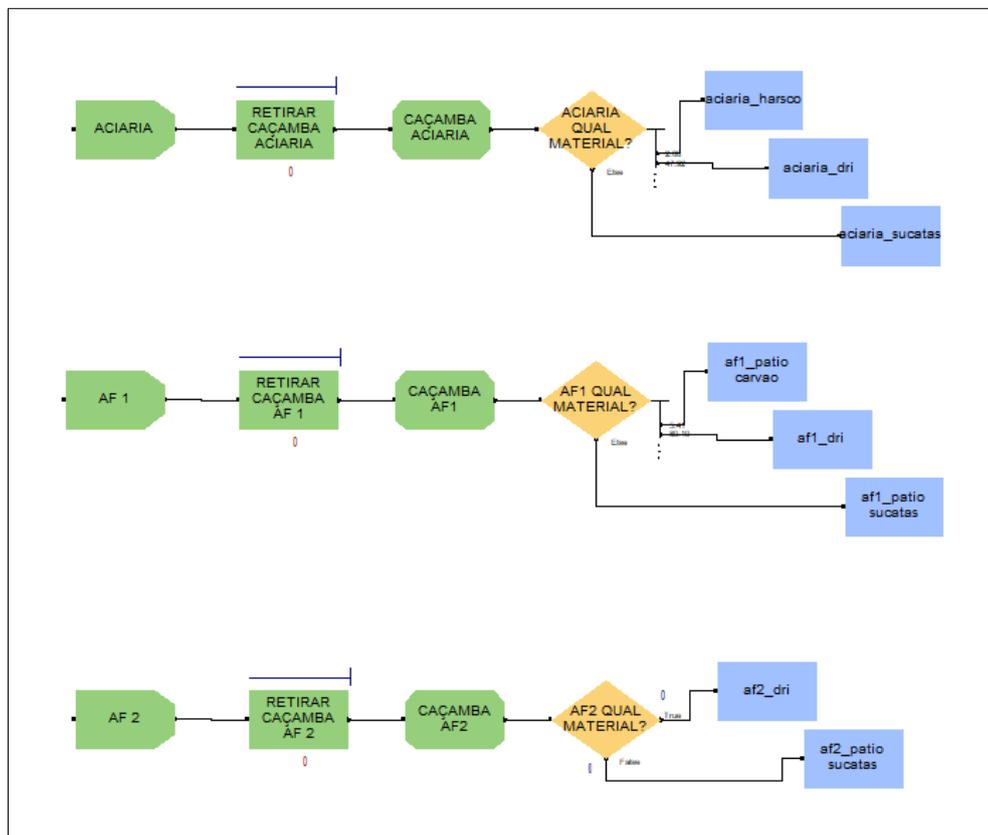
Figura 9 - Etapa 1 do modelo de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

2 – Processo de retirada das caçambas cheias das áreas e envio dos resíduos para o destino correto (figura 10):

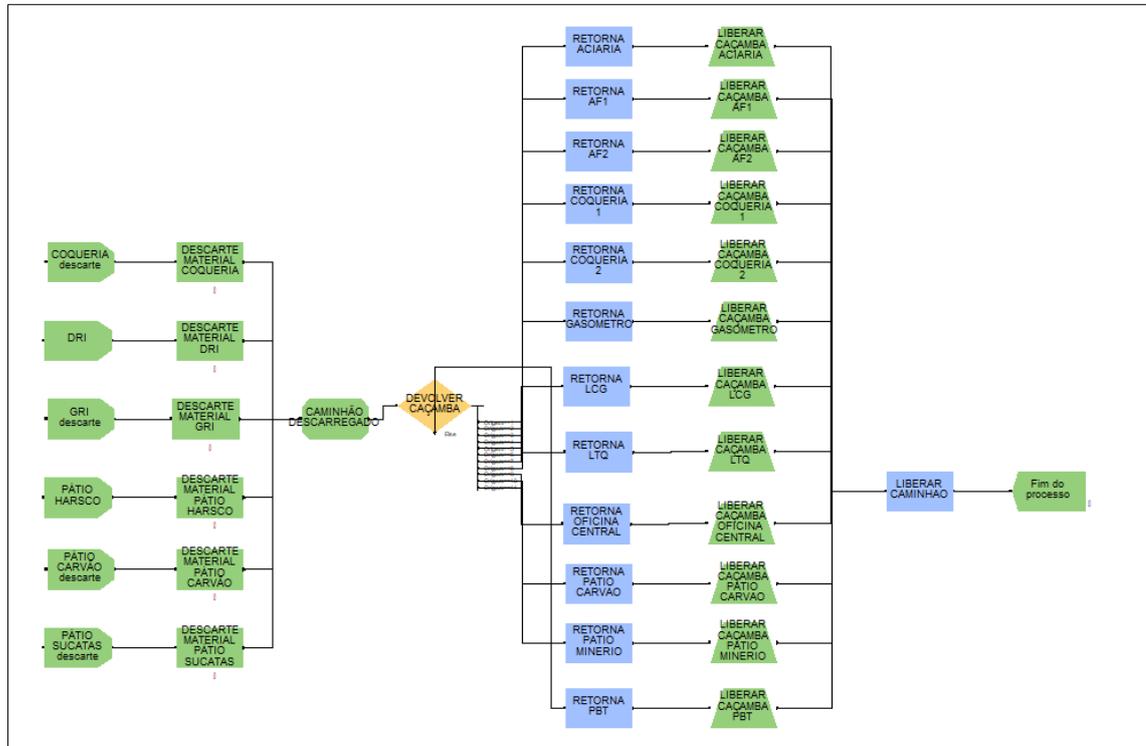
Figura 10 - Etapa 2 do modelo de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3 – Descarte dos resíduos, devolução das caçambas vazias e liberação do caminhão para recebimento de novas solicitações (figura 11):

Figura 11 - Etapa 3 do modelo de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4. Simulação e resultado

Para o ambiente de simulação, os dados e parâmetros utilizados como entrada para o modelo desenvolvido foram:

- **CRIAR** (*create*): componente utilizado para gerar entidades no início da simulação. No modelo, representa a chegada de solicitações. A expressão que representa a taxa de chegada das solicitações já foi abordada no item 3.6.
- **ENTIDADES** (*entity*): refere-se aos objetos que interagem pelo sistema que está sendo simulado, passando por diferentes tipos de componentes. No modelo, representam as solicitações de retirada de caçamba.
- **RECURSOS** (*resource*): refere-se aos recursos físicos necessários para realizar as atividades no sistema simulado. No modelo, representam o técnico de controle e as caçambas disponíveis em cada geo área. Fica disponível na sala de controle apenas 1 técnico por turno e foi utilizado um levantamento interno, realizado em 2021, para determinar a quantidade de caçambas disponíveis em cada geo área (tabela 9):

Tabela 9 - Distribuição de caçambas por geo área

| GEO ÁREA | QTDE |
|------------------|------------|
| ACIARIA | 33 |
| ALTO FORNO 1 | 13 |
| ALTO FORNO 2 | 7 |
| COQUERIA 1 | 7 |
| COQUERIA 2 | 2 |
| GASOMETRO AF | 1 |
| LCG | 10 |
| LTQ | 5 |
| OFICINA CENTRAL | 8 |
| PÁTIO DE CARVÃO | 1 |
| PÁTIO DE MINÉRIO | 9 |
| PBT | 12 |
| TOTAL | 108 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- **ATRIBUTOS** (*attribute*): componente utilizado para representar características ou propriedades associadas às entidades ou outro elemento da simulação. No modelo, foram criados dois atributos: “origem” e “descarregado”. O primeiro é uma sequência numérica de 1-12 e é utilizado para marcar o local onde a caçamba foi retirada. Já o segundo atributo, é utilizado para marcar que a caçamba está vazia e que o caminhão pode retornar para área de onde a caçamba foi retirada.

- **ESTAÇÕES** (*Station*): referem-se a um componente utilizado para representar os locais onde as entidades aguardam para serem processadas em um sistema simulado. No modelo, representam as geo áreas do sistema real.

A fim de não exceder o limite de número de módulos (200) e número de elementos (300) do modo treinamento/avaliação do Arena, desconsiderou-se as áreas que apresentaram menos de 10 solicitações no mês de janeiro de 2023 (almoxarifado, calcinação, CTE, fio máquina, GRI, mist. degradado, pátio de sucatas, perfil e recirculação AF), obtendo a seguinte distribuição de solicitações a ser modelada (tabela 10):

Tabela 10 - Tabela adaptada das solicitações realizada por geo área

| GEO ÁREA | QTDE | % |
|------------------|------------|-------------|
| ACIARIA | 179 | 31,85% |
| ALTO FORNO 1 | 113 | 20,11% |
| ALTO FORNO 2 | 34 | 6,05% |
| COQUERIA 1 | 25 | 4,45% |
| COQUERIA 2 | 37 | 6,58% |
| GASOMETRO AF | 14 | 2,49% |
| LCG | 68 | 12,10% |
| LTQ | 12 | 2,14% |
| OFICINA CENTRAL | 17 | 3,02% |
| PÁTIO DE CARVÃO | 19 | 3,38% |
| PÁTIO DE MINÉRIO | 18 | 3,20% |
| PBT | 26 | 4,63% |
| TOTAL | 562 | 100% |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para o registro das distâncias entre as estações, utilizou-se o recurso disponível “medir distância” no Google Maps. Devido a quantidade de rotas possíveis, a medição de distância foi feita dessa forma, gerando distâncias estimadas. A unidade de medida utilizada foi o metro (m).

- **PROCESSO** (*Process*): referem-se as atividades que ocorrem dentro do sistema. No modelo, representam o processo de programação das solicitações, retirada da caçamba e descarte dos resíduos. As respectivas taxas de processamento, que determina a velocidade com que as entidades são processadas, foram abordadas no item 3.6.

No processo “programação”, foi utilizado o comando *seize delay release*”, onde o recurso “técnico de controle” foi utilizado e em seguida liberado para que outras

entidades possam utilizá-lo. Já nos processos de “retirar caçamba”, o comando utilizado foi de “*seize delay*”, no qual o recurso caçamba só será liberado após atendimento de uma condição específica, ou seja, ser descarregada. Nos processos de “descarte material” o comando utilizado foi de “*delay*”, utilizado para introduzir o tempo de descarte dos resíduos das caçambas.

- **LIBERAR** (*release*): refere-se a componente utilizado para liberar um recurso utilizado por uma entidade. No modelo, o comando é necessário para liberar o recurso “caçamba” que está sendo ocupado a partir do processo “retirar caçamba”.
- **TRANSPORTE** (*Transport*): refere-se ao elemento utilizado para simular o fluxo físico das entidades dentro do sistema. No modelo, representam as rotas a serem realizadas pelos caminhões poliguindastes.
- **TRANSPORTADORES** (*Transporter*): refere-se ao componente utilizado para modelar a movimentação de entidades de um local para outro dentro do sistema. No modelo, representa a frota de caminhão poliguindastes. A quantidade de transportadores utilizadas na simulação é de 4 caminhões e a velocidade dos mesmos, com base na média dos caminhões (tabela 11) será de aproximadamente 4,6 m/s (15,07 km/h).

Tabela 11 - Velocidade média dos caminhões por vaga

| VAGA | QTDE ATEND. | Velocidade Média (km/h) |
|--------------|-------------|-------------------------|
| BR-121 | 178 | 14,67 |
| BR-152 | 171 | 15,68 |
| BR-154 | 205 | 10,22 |
| BR-157 | 47 | 19,70 |
| TOTAL | 601 | 15,07 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- **MOVER** (*move*): refere-se ao componente utilizado para movimentação de entidades dentro do sistema. No modelo, é responsável por retornar com os caminhões para as áreas de onde foram retiradas as caçambas.
- **REQUISITAR** (*request*): refere-se ao componente utilizado para realizar a solicitação de uma atividade por parte de uma entidade dentro do sistema. No modelo, esse recurso é utilizado para requisitar o caminhão poliguindaste após a chegada de uma solicitação de atendimento. A regra para solicitação é para aqueles com menor distância.

- DECIDIR (*decide*): refere-se a um componente usado para definir condições e lógicas que direcionam as entidades para diferentes caminhos a partir de resultados e avaliações lógicas. No modelo, há um “*decide*” para encaminhar as solicitações para as áreas, que segue a distribuição percentual abordada na tabela 11; um outro elemento “*decide*” é usado para determinar qual resíduo a ser retirado e conseqüente qual área o caminhão deve se deslocar, que segue a distribuição percentual abordada na tabela 4, do item 3.4; e por último, o elemento “*decide*” que direciona qual estação o caminhão deve retornar, a partir do atributo que lhe foi previamente atribuído.

4.1. Cenários Simulados

Os indicadores de desempenho utilizados para análise são: número de solicitações atendidas, tempo médio para requisitar o transportador, taxa de utilização do transportador, tempo dos processos e tempo médio na fila para programação.

A taxa de utilização do técnico de controle não será utilizada como um indicador devido ao fato deste profissional ser responsável pelo gerenciamento de outros equipamentos e possuir outras atividades durante o regime de trabalho, por isso não é possível medir seu desempenho por meio do resultado obtido na simulação.

Para realização da análise do sistema estudado e observar os resultados a partir de alterações no sistema, são propostos os seguintes cenários:

- Cenário 1: frota de quatro caminhões disponíveis no *pool* (cenário atual);
- Cenário 2: acréscimo de um equipamento na frota de caminhões disponíveis no *pool*;

A aciaria, local com maior número de solicitações diárias, será retirada do sistema, simulando que esta área será contemplada com um equipamento fixo para atendimento. Após essa alteração, simulou-se outros dois cenários:

- Cenário 3: frota de quatro caminhões disponíveis no *pool* e não atendimento à aciaria; e
- Cenário 4: acréscimo de um equipamento na frota de caminhões disponíveis do *pool* e não atendimento à aciaria.

Uma possibilidade para elaboração de novos cenários seria a alteração da velocidade média dos caminhões. Contudo, devido as regras internas de circulação, não foi proposto essa mudança.

Foram realizadas 10 replicações com duração de 30 dias para os quatro cenários mencionados.

4.2. Resultados

Observa-se através dos resultados, apresentados na tabela 12, que no cenário 1 (cenário atual) os caminhões poliguidastes estão sendo sobrecarregados devido as demandas operacionais. As taxas de utilização ideal variam de acordo o contexto operacional, entretanto um valor comumente adotado de 65% é considerado um bom indicador, por proporcionar uma margem para realização de manutenções, intervalos de descanso para os operadores, imprevistos e outras variações que podem ocorrer na demanda operacional. Um outro indicador crítico no atual sistema é o longo tempo gasto para requisição de um caminhão, que é em média de 80 minutos.

No cenário 2 e 4, o acréscimo de um transportador gerou um importante impacto na taxa ocupação do equipamento, havendo um impacto positivo e gerando valores inferiores a 65%. Além dessa melhoria, houve também uma grande diminuição no tempo médio de espera para a requisição de um caminhão, gerando uma redução de 56,29% (cenário 2) e 51,66 % (cenário 4). Uma outra melhoria observada no cenário 4 foi no aumento de solicitações realizadas, havendo um acréscimo de 2,80% no número de atendimentos.

Contudo, vale ressaltar que o acréscimo de um caminhão além dos impactos operacionais, gera também uma mudança financeira. Nos custos fixos e variáveis, o acréscimo de mais um caminhão acarreta o aumento de 12,5% no valor total planejado.

Os resultados obtidos no cenário 3, caracterizado pela retirada da aciaria na rota de atendimento dos caminhões do *pool*, quando comparado aos resultados no cenário atual não gerou resultados melhores no processo. Houve a redução no tamanho da fila para programação e na taxa de ocupação dos caminhões, mas o valor obtido desse indicador ainda continuou acima do valor considerado como ideal (65%). E, quando comparado os valores do tempo médio de espera na fila para requisição de um caminhão e número de solicitações atendidas, ocorreu uma piora dos resultados. O número de

atendimento realizados caiu 2,53% e o houve um aumento em 27,82% minutos de espera na fila.

Portanto, analisando apenas os resultados operacionais, conclui-se que o cenário 4 é o melhor cenário simulado neste estudo.

Tabela 12 - Resultados de simulação dos cenários (1, 2, 3 e 4) propostos pelo trabalho

| SIMULAÇÃO | SOLICITAÇÕES ATENDIDAS | TEMPO MÉDIO FILA REQUISITAR CAMINHÃO (min.) | TEMPO MÉDIO FILA PROGRAMAÇÃO (min.) | TAMANHO MÉDIO FILA PROGRAMAÇÃO (un.) | TAMANHO MÉDIO FILA PROGRAMAÇÃO (un.) | IU (%) CAMINHÃO |
|-------------------|------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| CENÁRIO 1 (atual) | 1860 | 82,61 | 1,55 | 5,78 | 0,0600 | 86,60% |
| CENÁRIO 2 | 1806 | 36,11 | 1,55 | 1,50 | 0,0649 | 58,85% |
| CENÁRIO 3 | 1813 | 105,59 | 1,60 | 4,45 | 0,0670 | 73,24% |
| CENÁRIO 4 | 1912 | 39,93 | 1,57 | 1,75 | 0,0700 | 62,08% |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5. Conclusão

Uma usina siderúrgica é um ambiente dinâmico caracterizado por uma série de processos, operações e fluxos de materiais e pessoas que ocorre simultaneamente por 24h por dia, sete dias por semana.

O problema estudado neste trabalho está relacionado a avaliação da capacidade de atendimento dos caminhões poliguindastes em uma condição específica, uma vez que no sistema real a capacidade de performance dos equipamentos dependerá de vários fatores, como por exemplo, quantidade de recursos disponíveis, restrições operacionais, tempos de ciclos das atividades envolvidas, dinamismo no clima, comportamento, dentre outras variáveis.

Ao se avaliar os dados gerados no presente estudo foi possível compreender o comportamento das filas e processos de atendimento de caminhões uma vez que os intervalos de chegada de solicitações de atendimento são variados ao longo do tempo, o tempo para atendimento pode variar dependendo do tipo de serviço ou operação a ser executada.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, uma das dificuldades encontradas foi a presença de muitos dados *outliers*, oriundos das variações nas condições operacionais já mencionadas, sendo assim necessário identificar e tratar estes dados para garantir a geração de resultados e análise mais precisa.

Como sugestão de melhoria para a empresa, esta poderia verificar a possibilidade de realocar as solicitações oriundas da aciaria para atendimento fixo de apenas uma vaga contratual (caminhão) e para reduzir a taxa de ocupação dos demais recursos, realizar um estudo acerca do impacto econômico no planejamento financeiro da empresa ao acrescentar mais um caminhão para atendimento às solicitações diárias.

Apesar do sistema de telemetria utilizado nos equipamentos que estão em operação na usina fornecer várias informações de forma precisa e detalhada, vale ressaltar que existem muitas oportunidades de aprofundamento no estudo das operações dos caminhões poliguindastes, uma vez que as distâncias entre as áreas operacionais não foram obtidas *in loco* e não foram consideradas as falhas e quebras dos equipamentos dentro do modelo simulado. Uma outra oportunidade de melhoria no estudo está no fato de a versão *Arena Student* do software *Arena®* possui limitações específicas na quantidade de entidades, recursos, filas que podem ser utilizadas no modelo, restringindo a duração máxima da simulação ou o número de eventos que podem ser executados.

Referência bibliográfica

ALMEIDA, J. F. F.. **Simulação por Eventos Discretos - Teoria e Prática**. 2015. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Apostila). Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/engenhariadeproducao/files/2016/08/apostila-sim-simulacao-por-eventos-discretos.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2023

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. Porto Alegre, RS: Grupo A, 2006. E-book. ISBN 9788560031467. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788560031467/>. Acesso em: 06 dez. 2022.

BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J.; COOPER, M B.; et al. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. Porto Alegre, RS: Grupo A, 2014. E-book. ISBN 9788580553185. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580553185/>. Acesso em: 15 dez. 2022.

CHAVES, Viviane Hengler Corrêa. **Perspectivas históricas da pesquisa operacional**. 2011. 117 f. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/91049>>.

CHWIF, Leonardo e MEDINA, Afonso C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações, volume 4**. Ed. São Paulo: Editora dos Autores. Disponível em: <https://livrosimulacao.eng.br/downloads/>. Acesso em: 19 dez. 2022.

FÁVERO, Luiz P. **Pesquisa Operacional - Para Cursos de Engenharia**. Barueri, SP: Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 9788595155626. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155626/>. Acesso em: 18 jan. 2023.

FIGUEIRA, G. **Simulação-otimização: porque e como combiná-las?**. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 1–5, 2019. DOI: 10.4322/PODes.2019.001. Disponível em: <https://www.podesenvolvimento.org.br/podesenvolvimento/article/view/623>. Acesso em: 18 jan. 2023.

FILHO, Paulo Jose de Freitas. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Florianópolis, SC. Editora Visual Books, 2008.

GARCIA, S.; LUSTOSA, P. R. B.; BARROS, N. R. **Aplicabilidade do método de simulação de Monte Carlo na previsão dos custos de produção de companhias industriais: o caso da Companhia Vale do Rio Doce**. Revista de Contabilidade e Organizações, [S. l.], v. 4, n. 10, p. 152-173, 2010. DOI: 10.11606/rco.v4i10.34781. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rco/article/view/34781>. Acesso em: 19 dez. 2022.

GIACOMELLI, Giancarlo; PIRES, Marcelo Ribas S. **Logística e Distribuição**. Porto Alegre, RS: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788569726937. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788569726937/>. Acesso em: 06 dez. 2022.

GRANT, David B. **Gestão de Logística e Cadeia de Suprimentos**. São Paulo, SP: Editora Saraiva, 2013. E-book. ISBN 9788502213685. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788502213685/>. Acesso em: 06 dez. 2022.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788580551198. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551198/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

LAW, A. M.. **Simulation Modeling and Analysis**. 5. ed. New York: Mcgraw-hill, 2015. Disponível em: <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/108-Simulation-Modeling-and-Analysis-Averill-M.-Law-Edisi-5-2014.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023.

NOGUEIRA, Amarildo de S. **Logística Empresarial, 2ª edição**. São Paulo, SP: Grupo GEN, 2018. E-book. ISBN 9788597015553. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597015553/>. Acesso em: 06 dez. 2022.

PAOLESCHI, Bruno. **Logística Industrial Integrada - Do Planejamento, Produção, Custo e Qualidade à Satisfação do Cliente**. São Paulo, SP: Editora Saraiva, 2011. E-book. ISBN 9788536505091. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536505091/>. Acesso em: 06 dez. 2022.

PINTO, E.; PINTO, L. R. **O uso da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisões em uma indústria siderúrgica: estudo de caso**. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO, Gramado/RS, 27 set. 2005. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2005/pdf/arq0011.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2023.

SABBADINI, Francisco Santos; **Simulação. Volume único**. Rio de Janeiro, RJ: Fundação Cecierj, 2020.

SANTOS, Mauricio Pereira dos. **Introdução à Simulação Discreta**. Rio de Janeiro: O Autor, 1999. 165 p. Disponível em: <http://mpsantos.com.br/simul.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SELLITTO, Miguel Afonso et al. **Análise de uma operação logística de carregamento e expedição de cimento por simulação computacional**. Revista Gestão Industrial, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 130-151, 23 dez. 2009. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). <http://dx.doi.org/10.3895/s1808-04482009000400008>. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/491>. Acesso em: 19 jan. 23.

SILVA, Leandro Fernandes da; LEAL JUNIOR, Ilton Curty; GARCIA, Pauli Adriano de Almada; TEODORO, Pitias. **Avaliação da Localização de Base de Atendimento para Equipamentos de Movimentação de uma Empresa Siderúrgica**. In: SIMPÓSIO DE EXCELENCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 9., 2012, Rio de Janeiro. Anais [...].

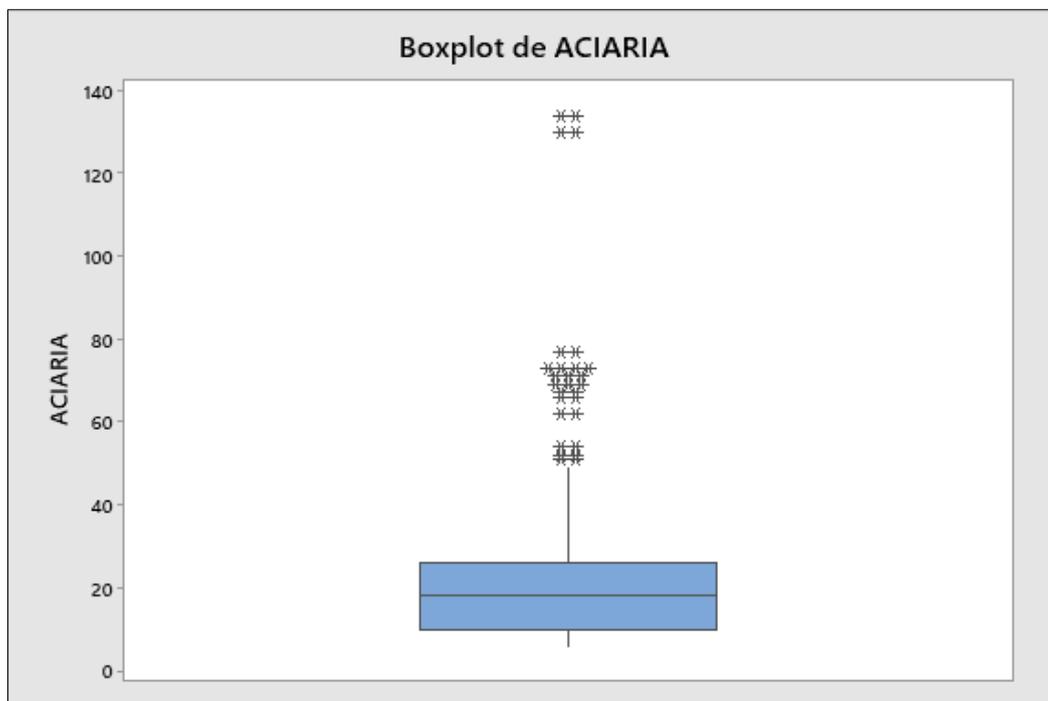
[S.L.]: Seget, 2017. p. 1-10. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos12/16169.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2022.

WERNECK, R. E.; MACHADO, R. L.; DINALVA, T. L.; TAVARES, L. C.; BITTENCOURT, N. T. **Simulação de dois cenários do processo de fabricação de um parafuso em aço inox AISI 316 utilizando o software arena®**. Revista Mythos, v. 13, n. 1, p. 46-55, 10 jun. 2021. Acesso em: 13 mar. 2023.

ZUMBA, L. A.; BRAGUINI, R.; TALLACH, V. **O software ARENA® aplicado na otimização dos processos produtivos de telas soldadas em uma indústria siderúrgica paulista**. X FATECLOG : LOGÍSTICA 4.0 & A SOCIEDADE DO CONHECIMENTO, GUARULHOS/SP, 31 maio 2019. ISSN 2357-9684. Disponível em: <https://fateclog.com.br/anais/2019/O%20SOFTWARE%20ARENA%20APLICADO%20NA%20OTIMIZA%20O%20DOS%20PROCESSOS%20PRODUTIVOS%20DE%20TELAS%20SOLDADAS%20EM%20UMA%20IND%20USTRIA%20SIDER%20URGICA%20PAULISTA.pdf>. Acesso em: 13. mar. 2023.

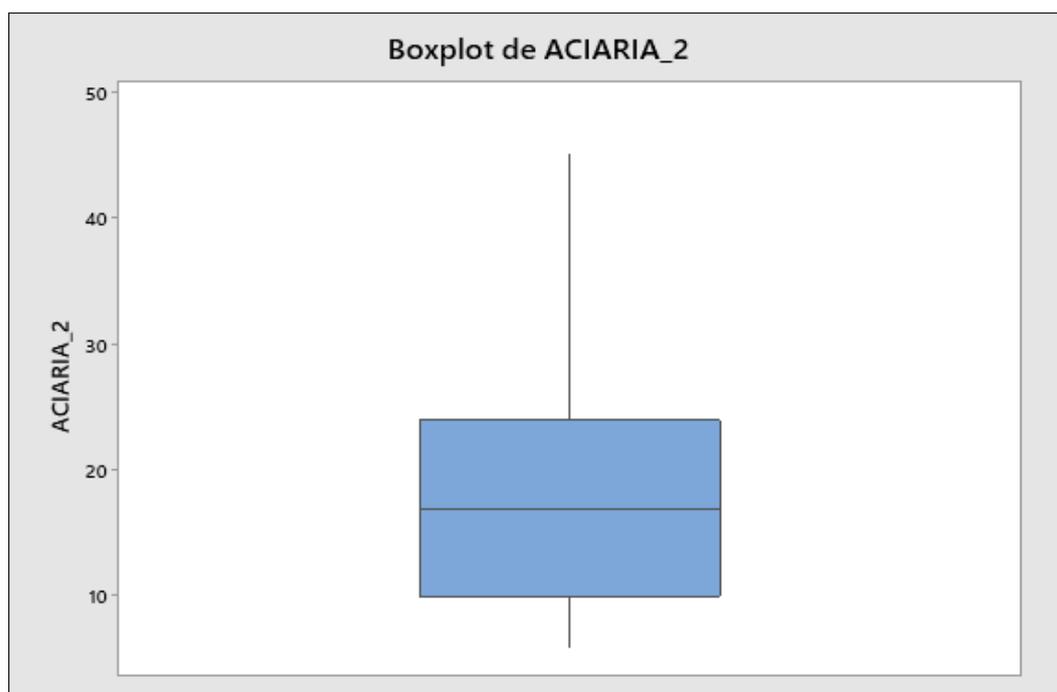
APÊNDICE A – GRÁFICOS DO TIPO BOXPLOT DOS DADOS DE OPERAÇÃO DAS GEO ÁREAS ESTUDADAS

Gráfico 2 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação da aciaria



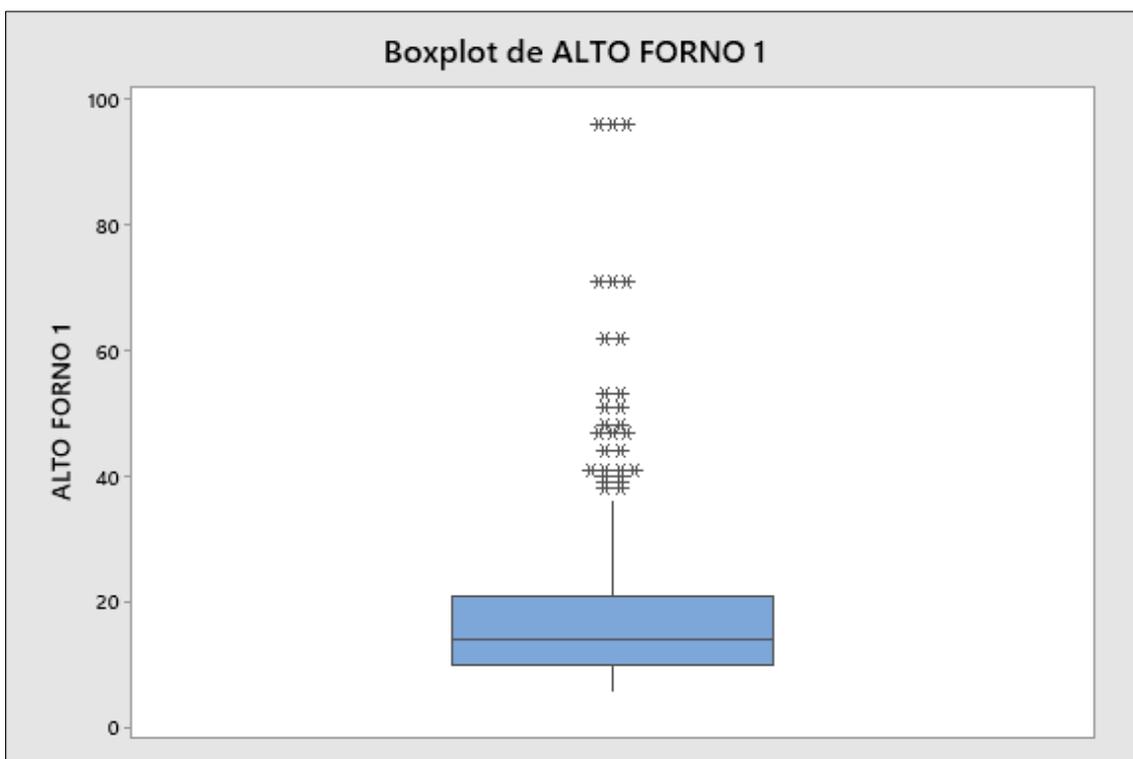
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 3 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação da aciaria sem outliers



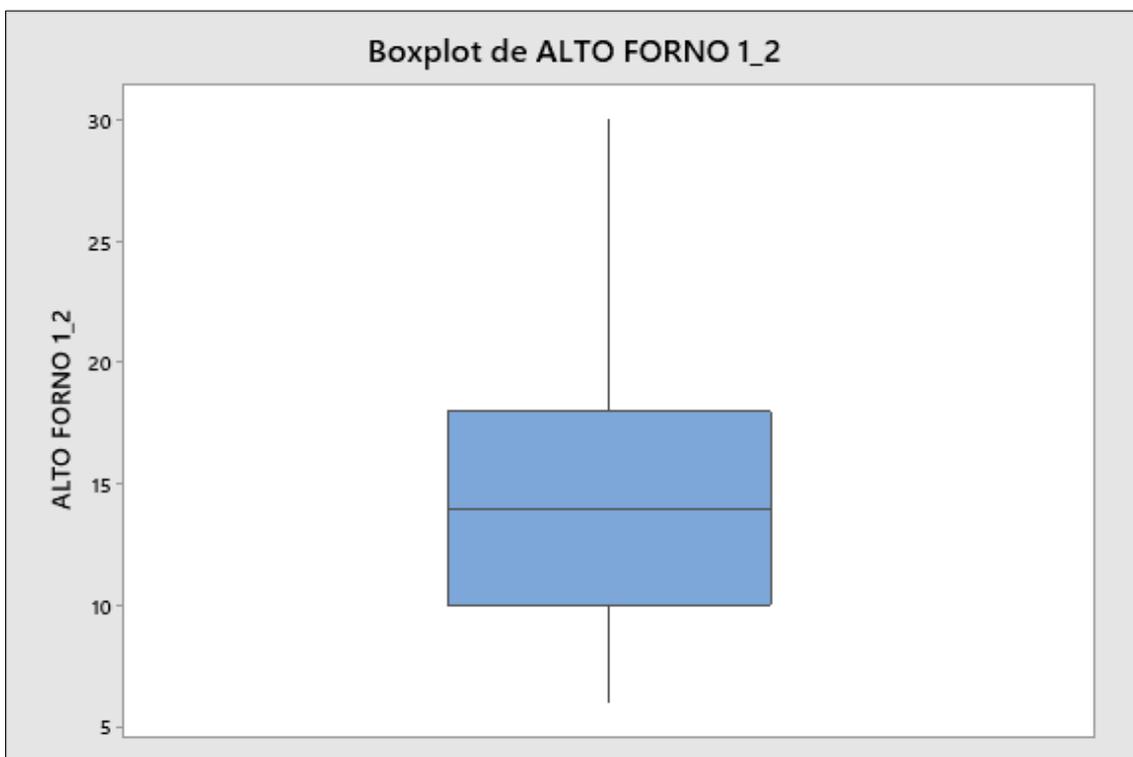
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 4 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 1



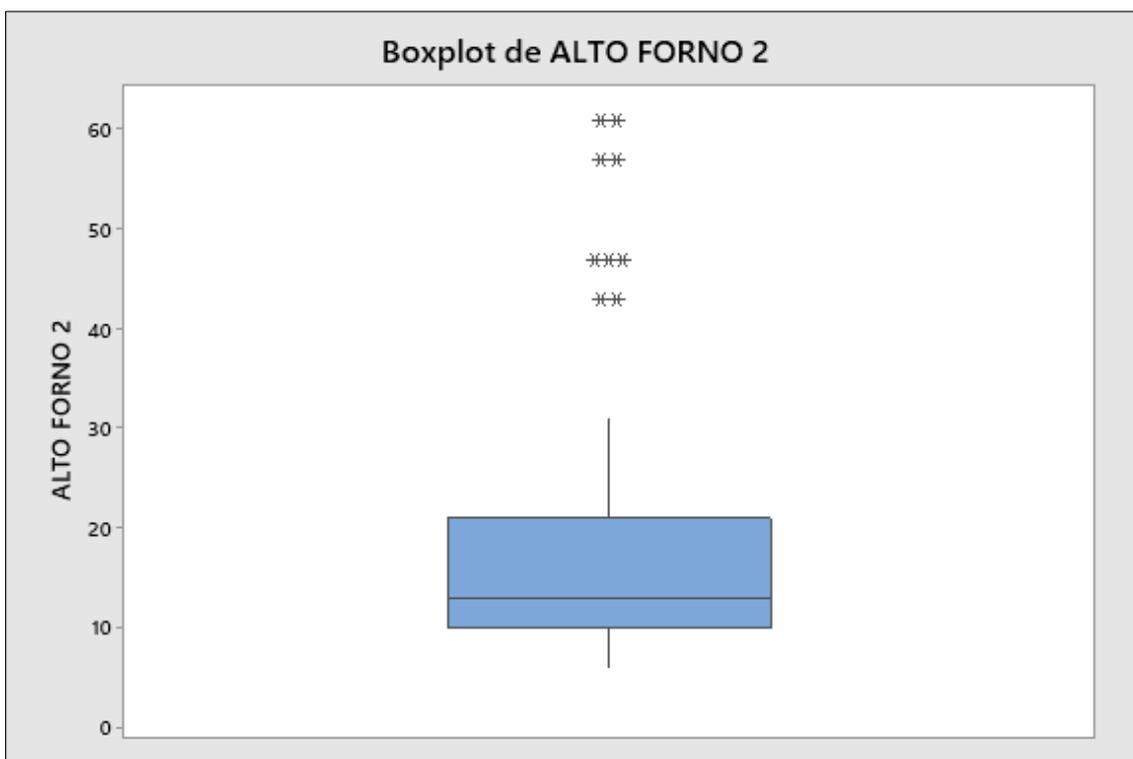
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 5 - Gráfico 4 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 1 sem outliers



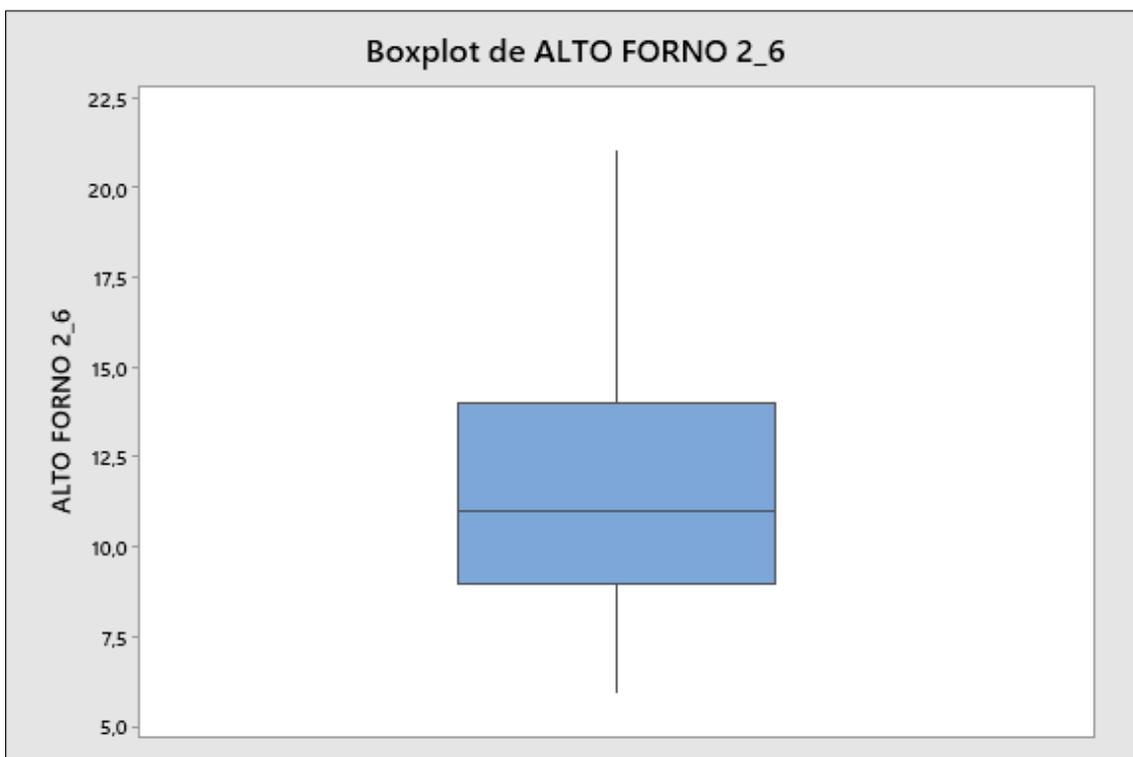
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 6 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 2



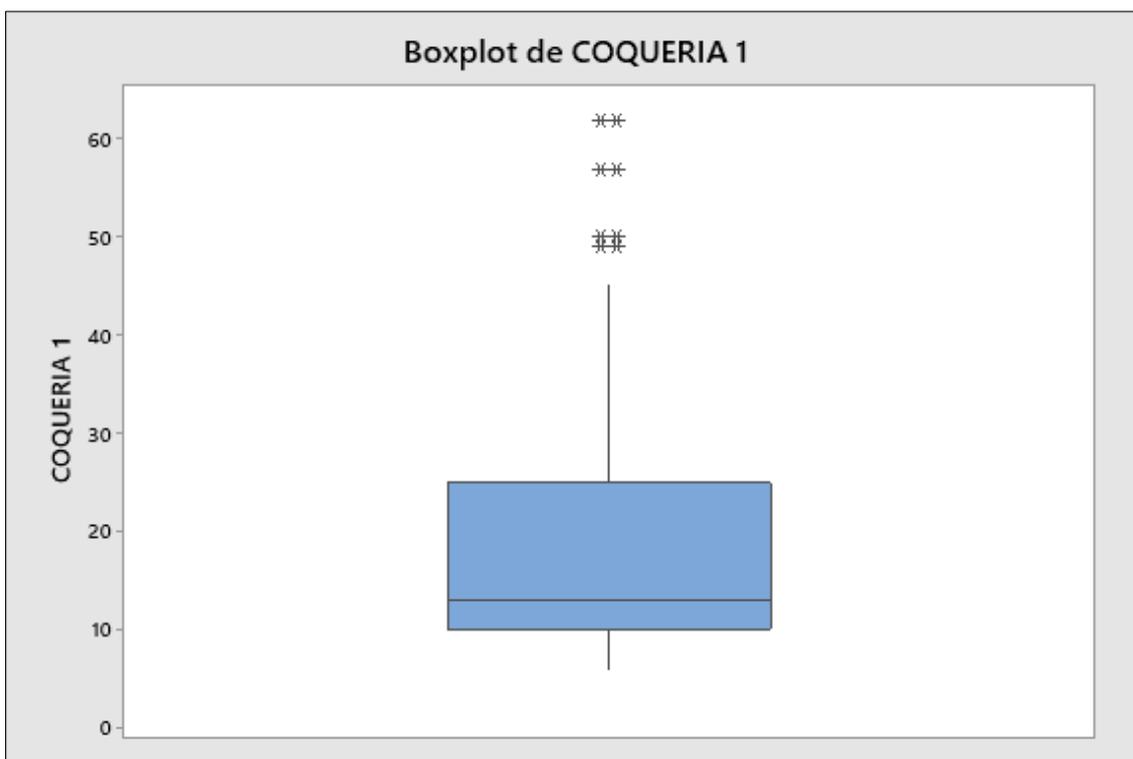
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 7 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do alto forno 2 sem outliers



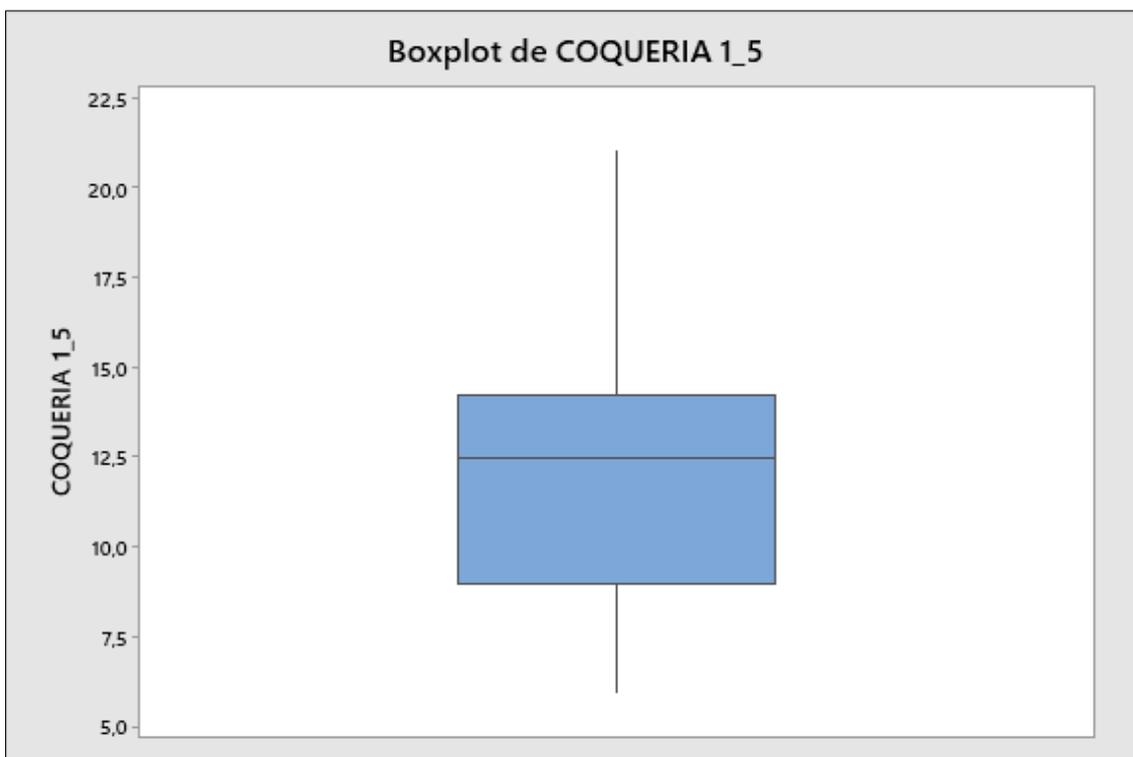
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 8 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 1



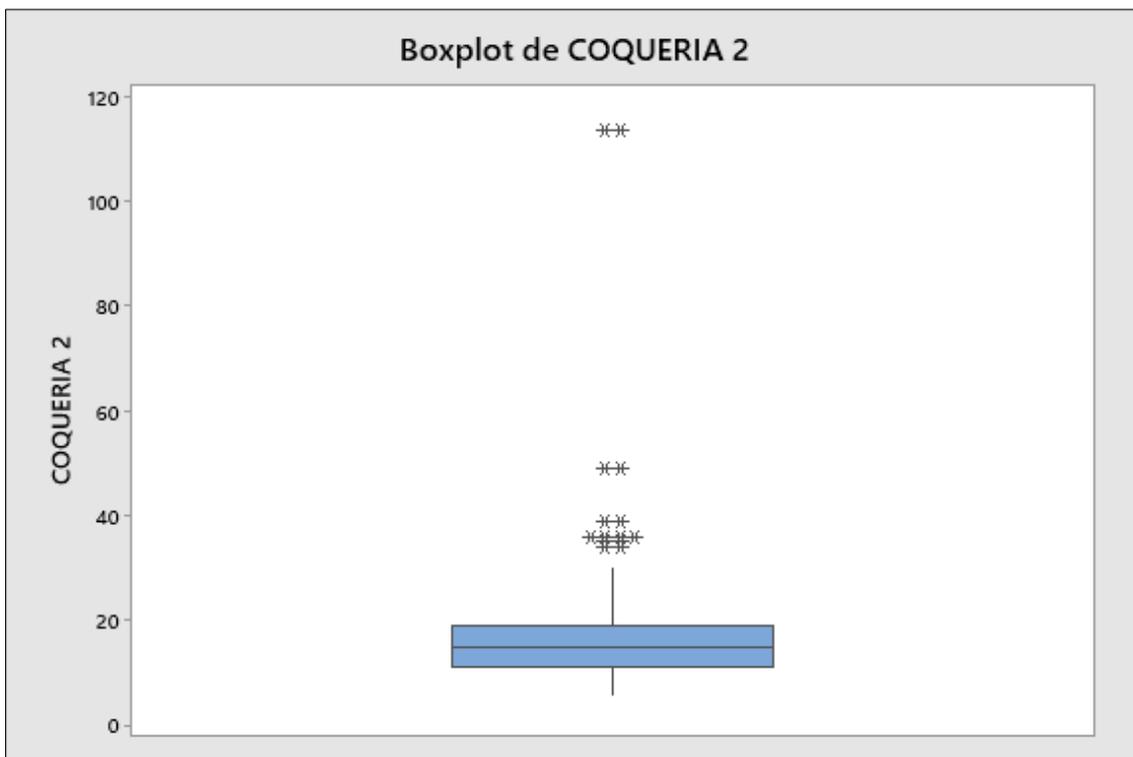
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 9 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 1 sem outliers



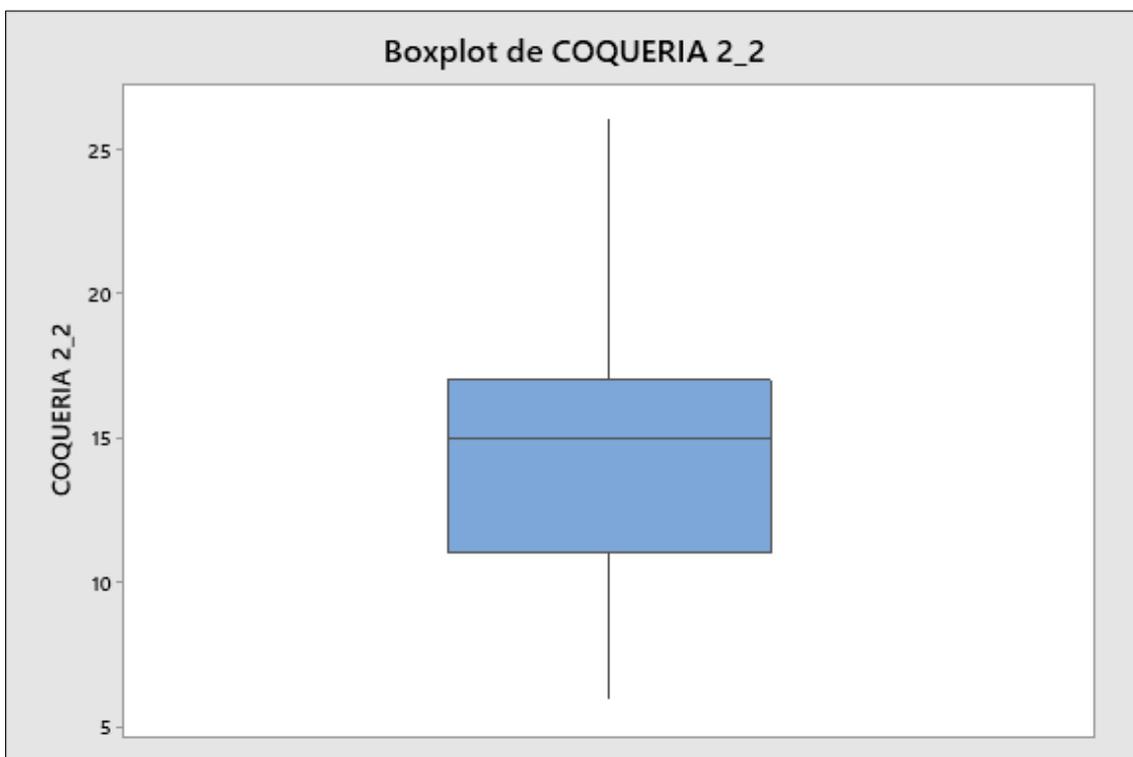
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 10 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 2



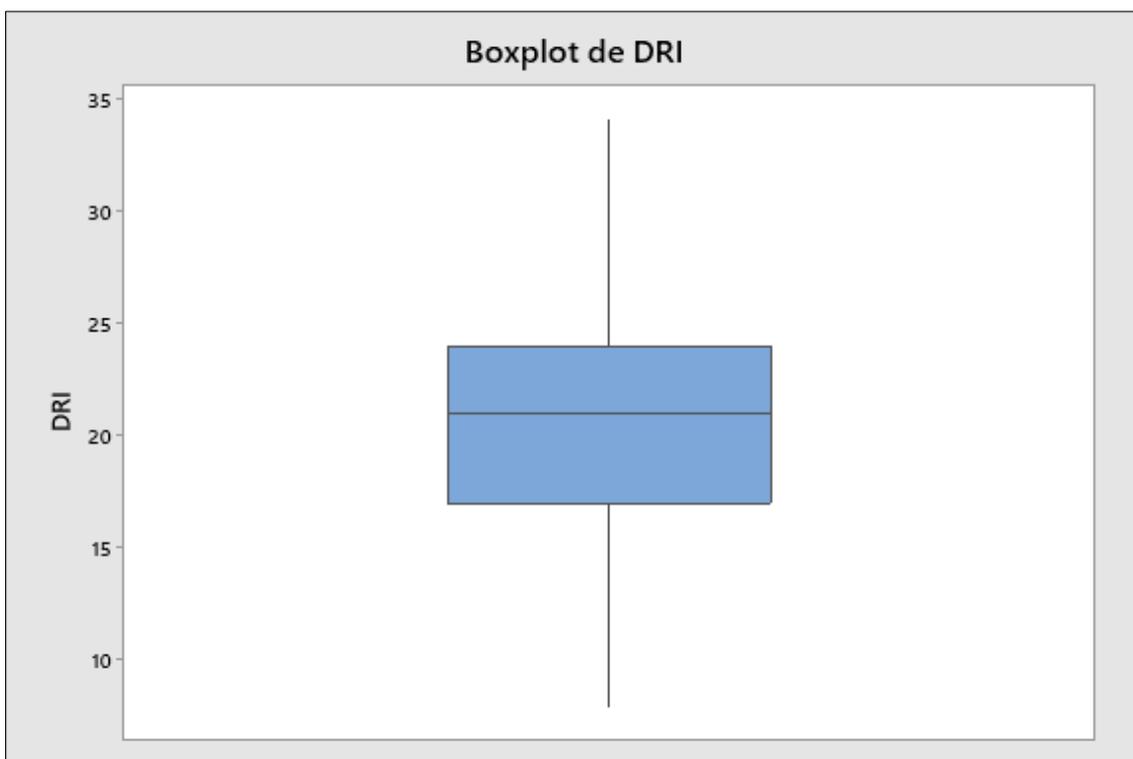
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 11 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do coqueria 2 sem outliers



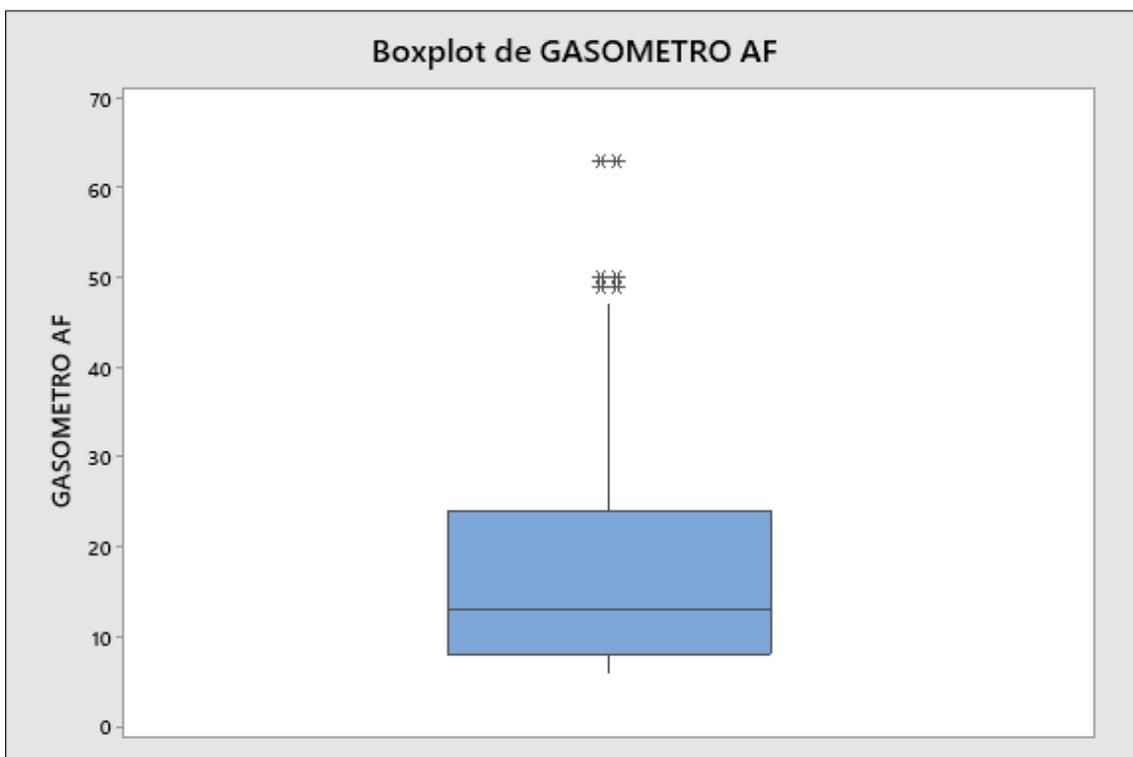
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 12 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do DRI sem outliers



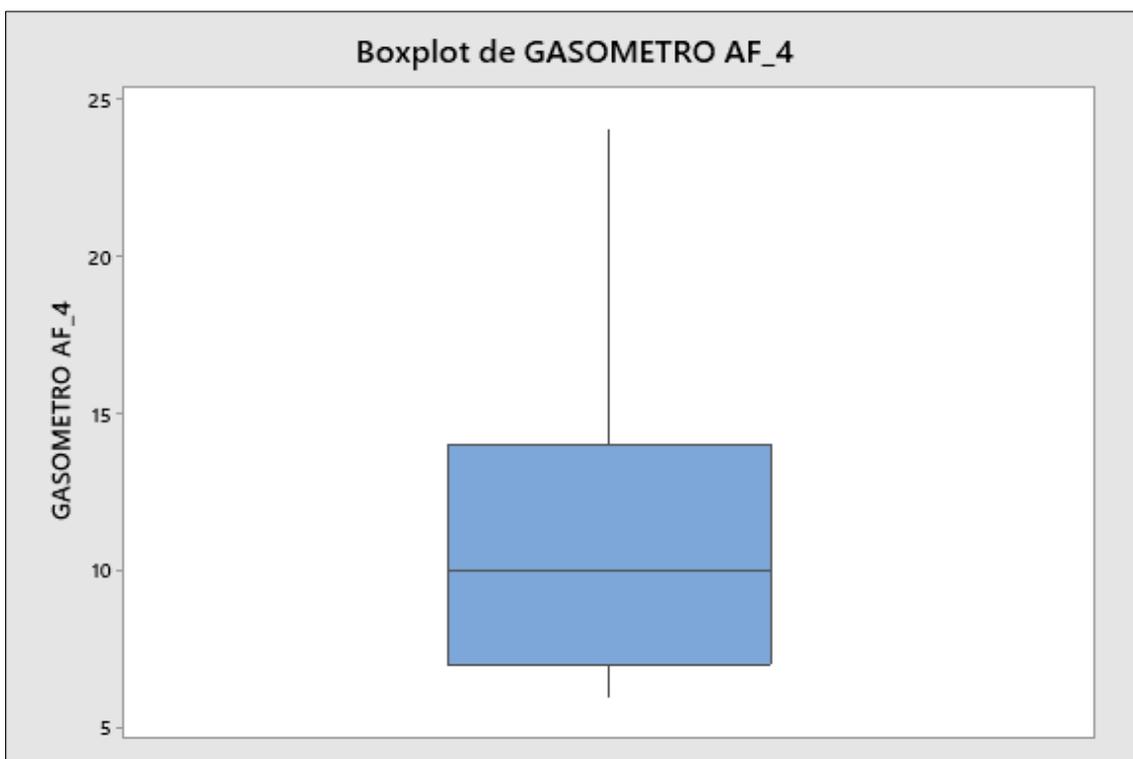
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 13 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do gasômetro



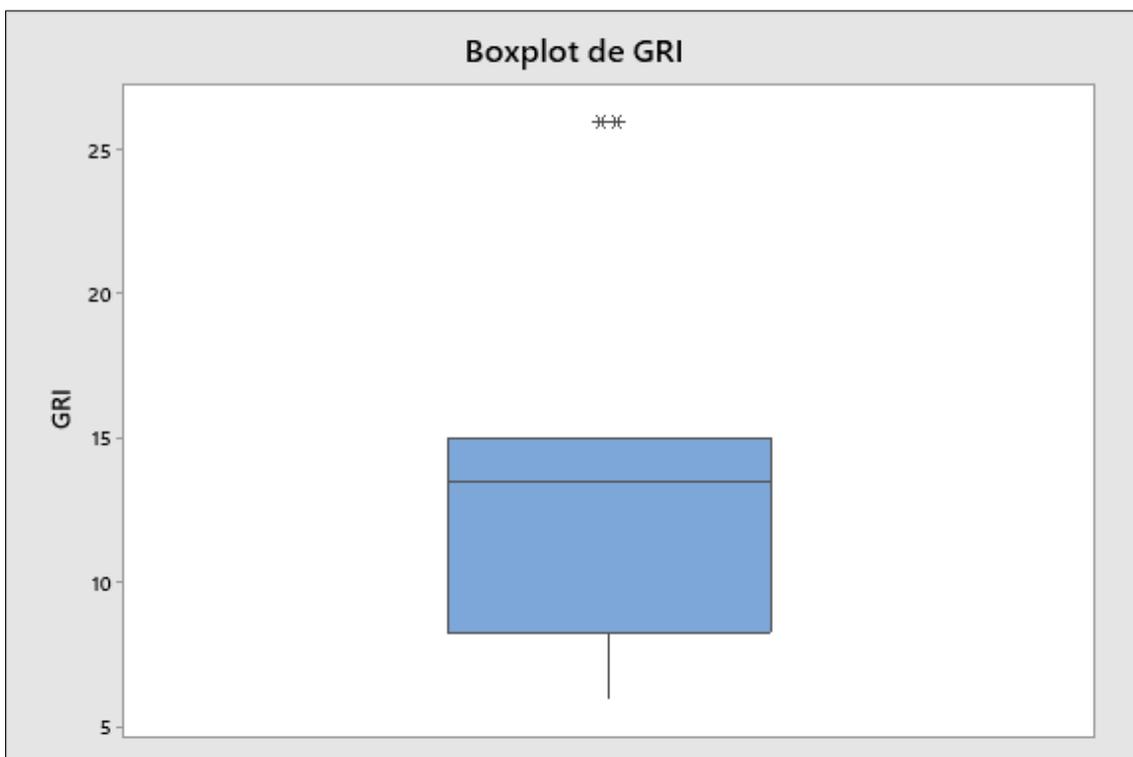
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 14 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do gasômetro sem outliers



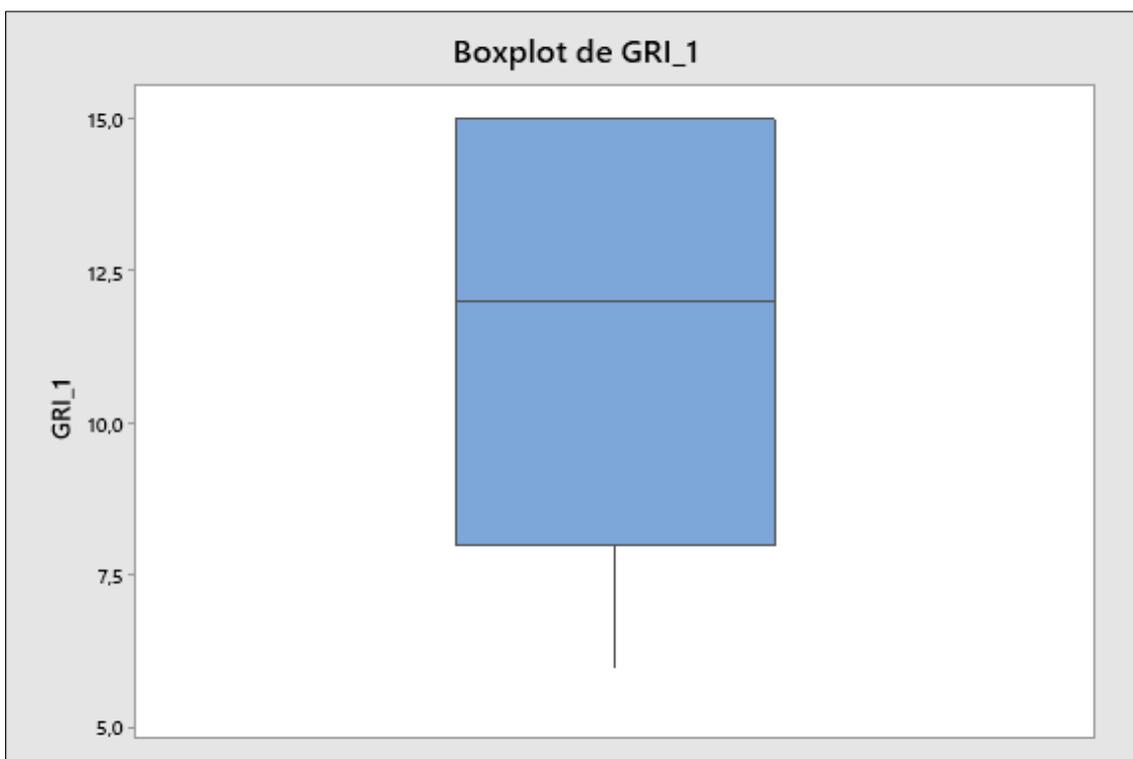
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 15 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do GRI



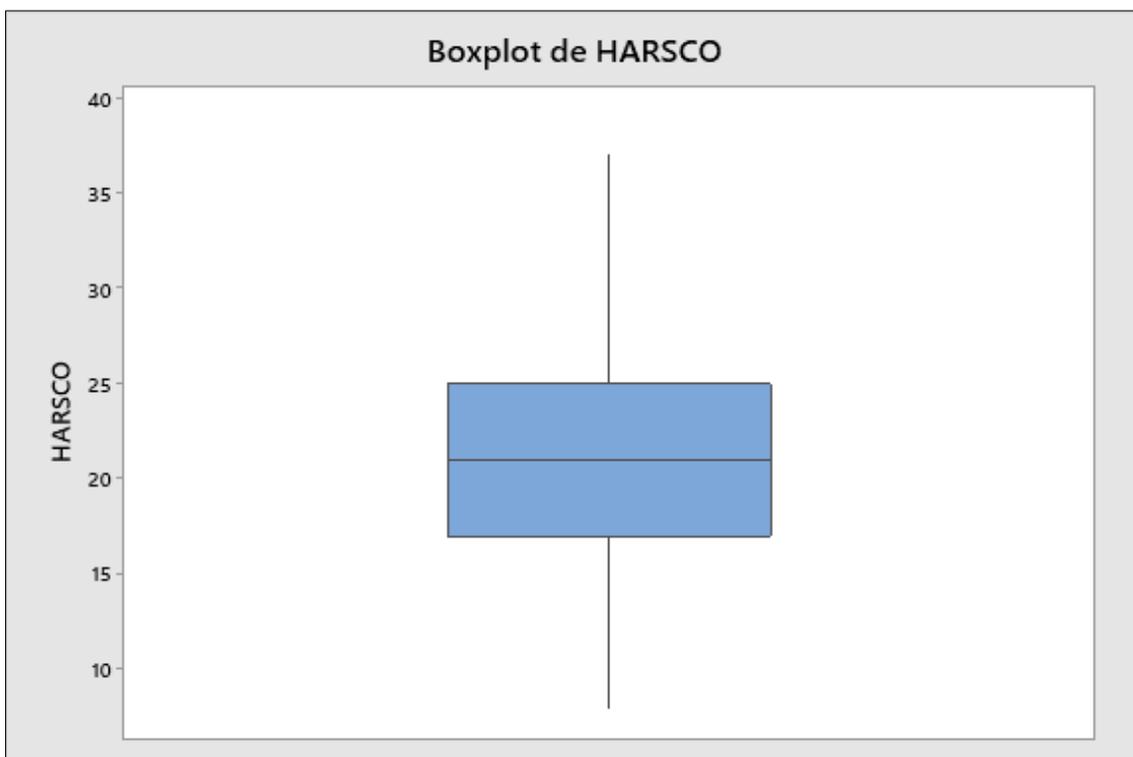
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 16 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do GRI sem outliers



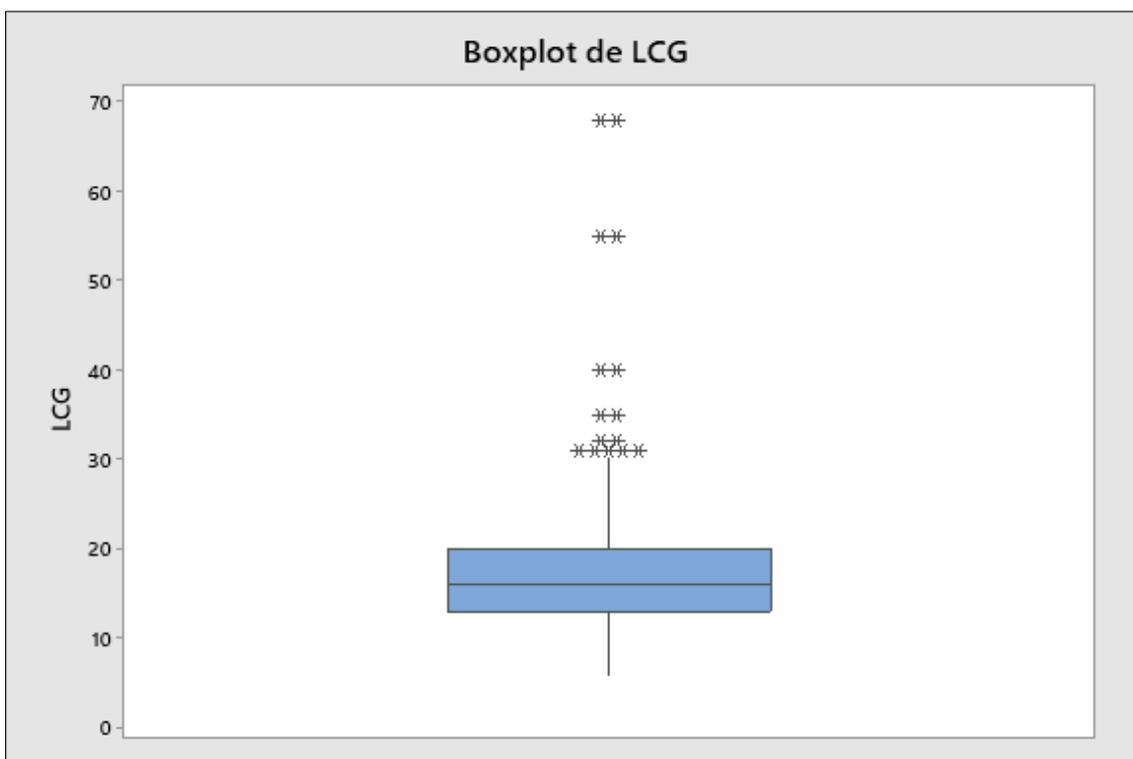
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 17 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do Harsco



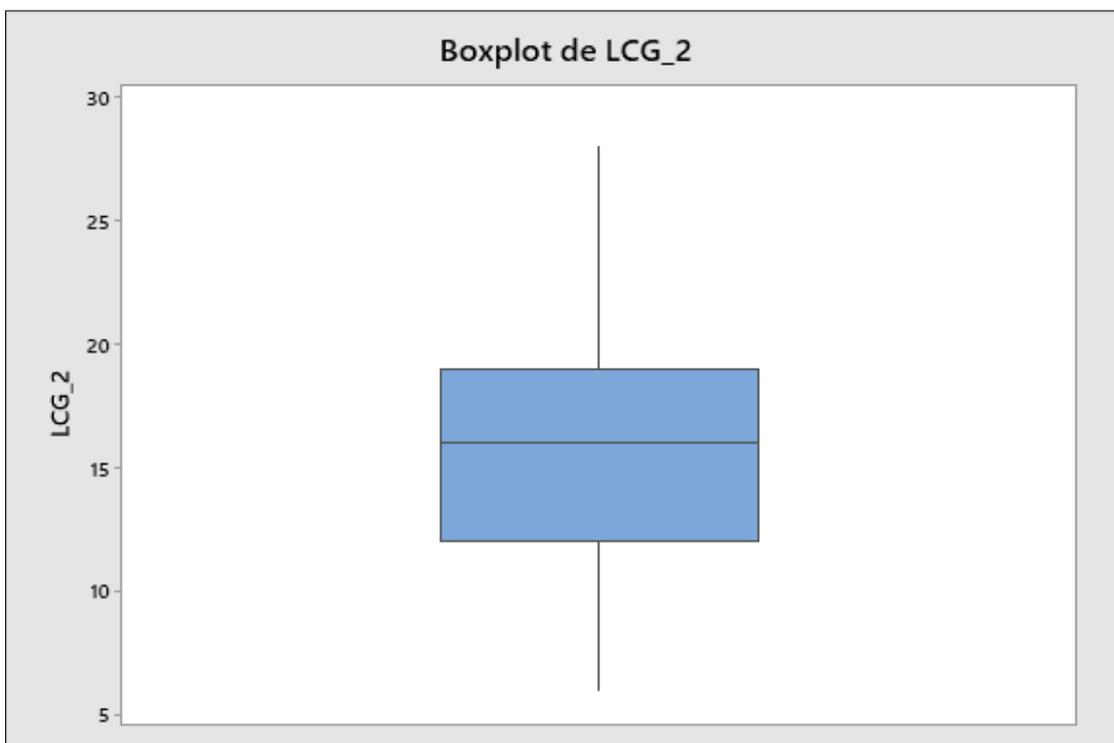
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 18 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LCG



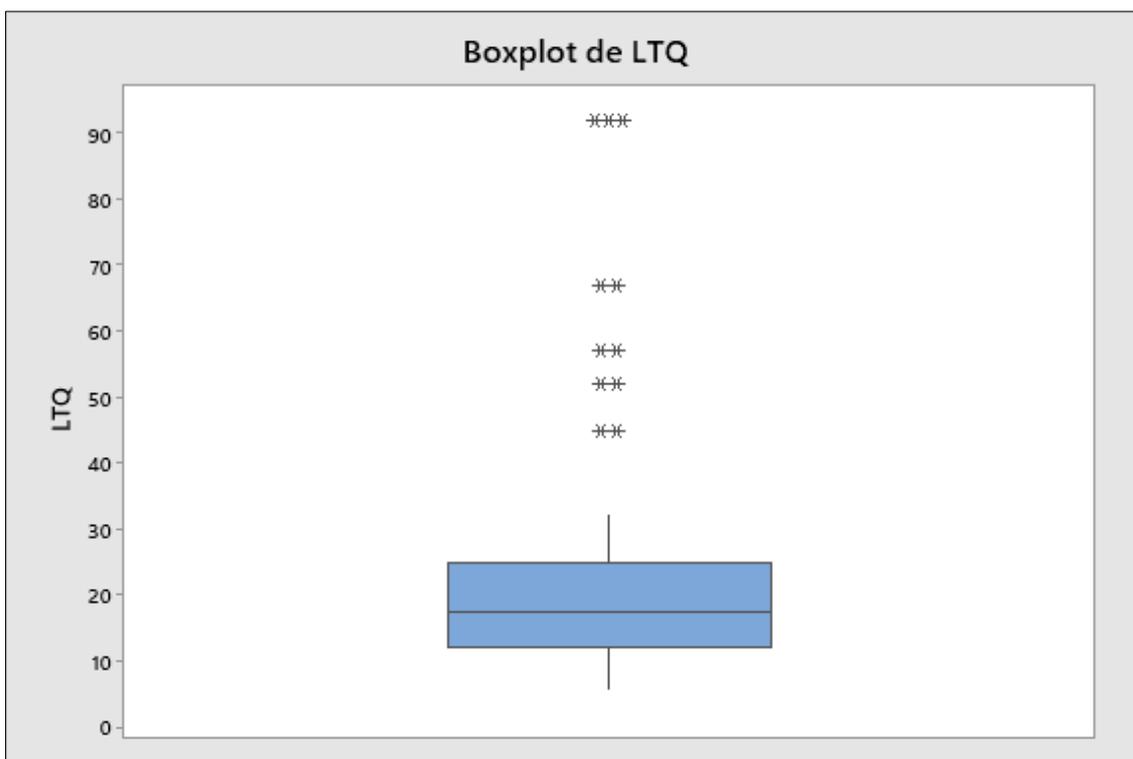
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 19 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LCG sem outliers



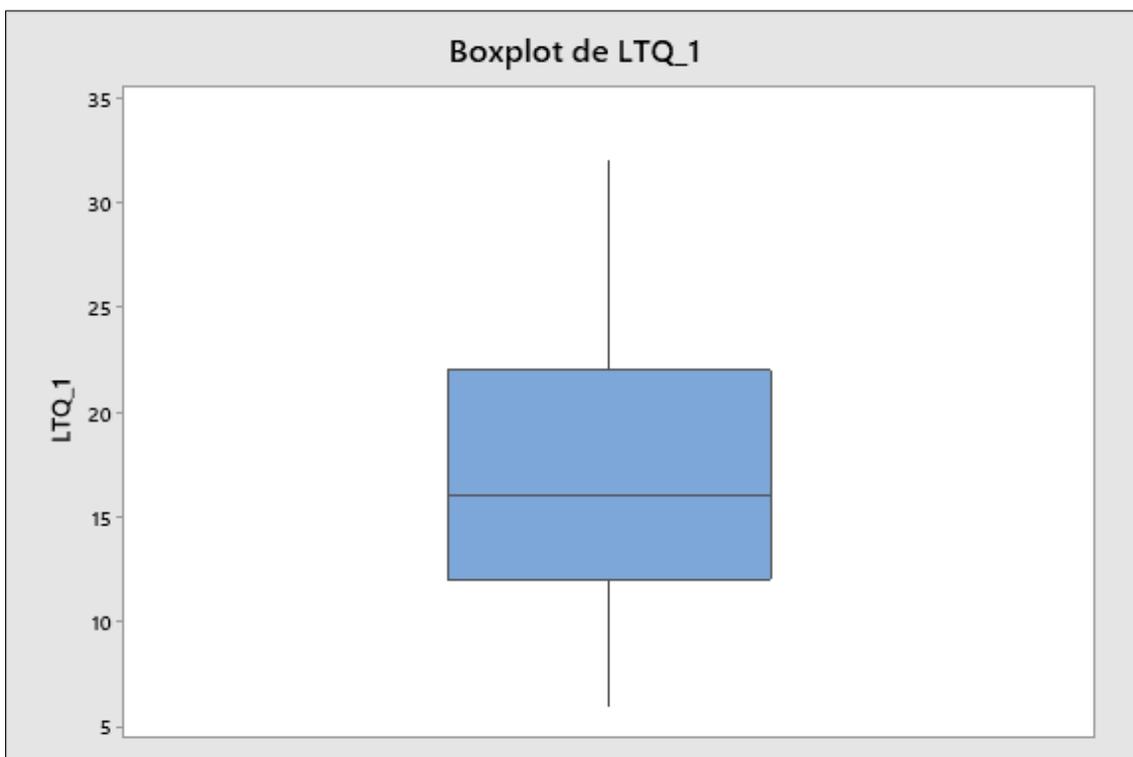
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 20 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LTQ



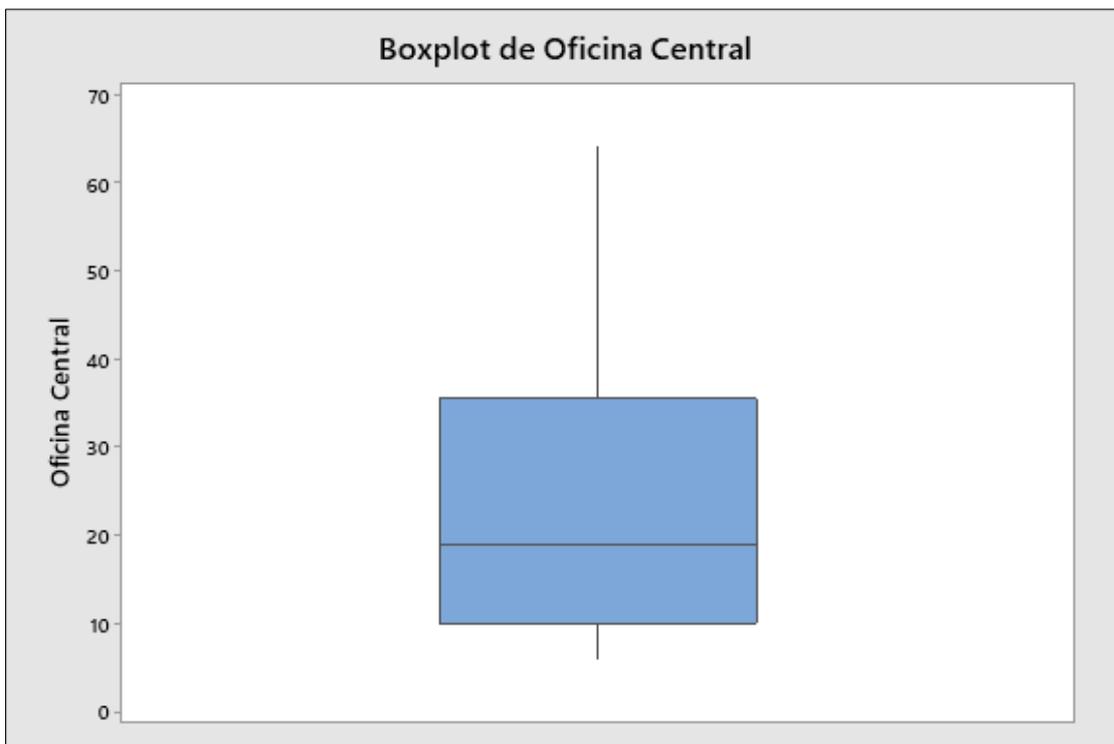
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 21 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do LTQ sem outliers



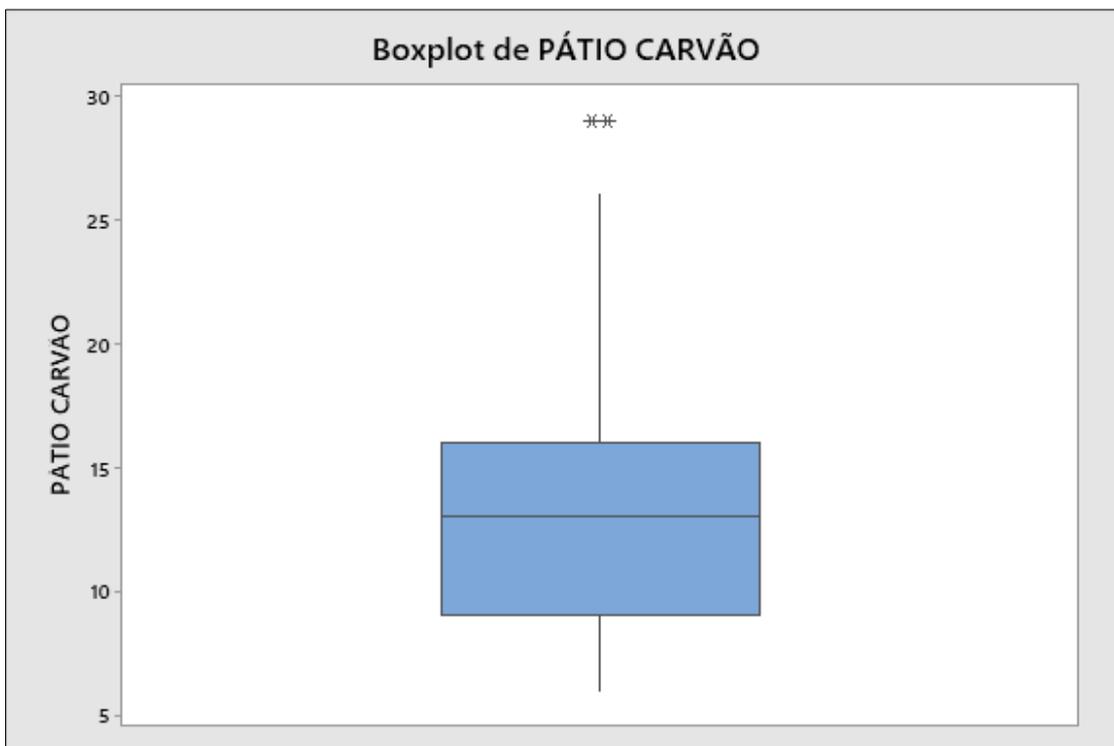
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 22 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação da oficina central



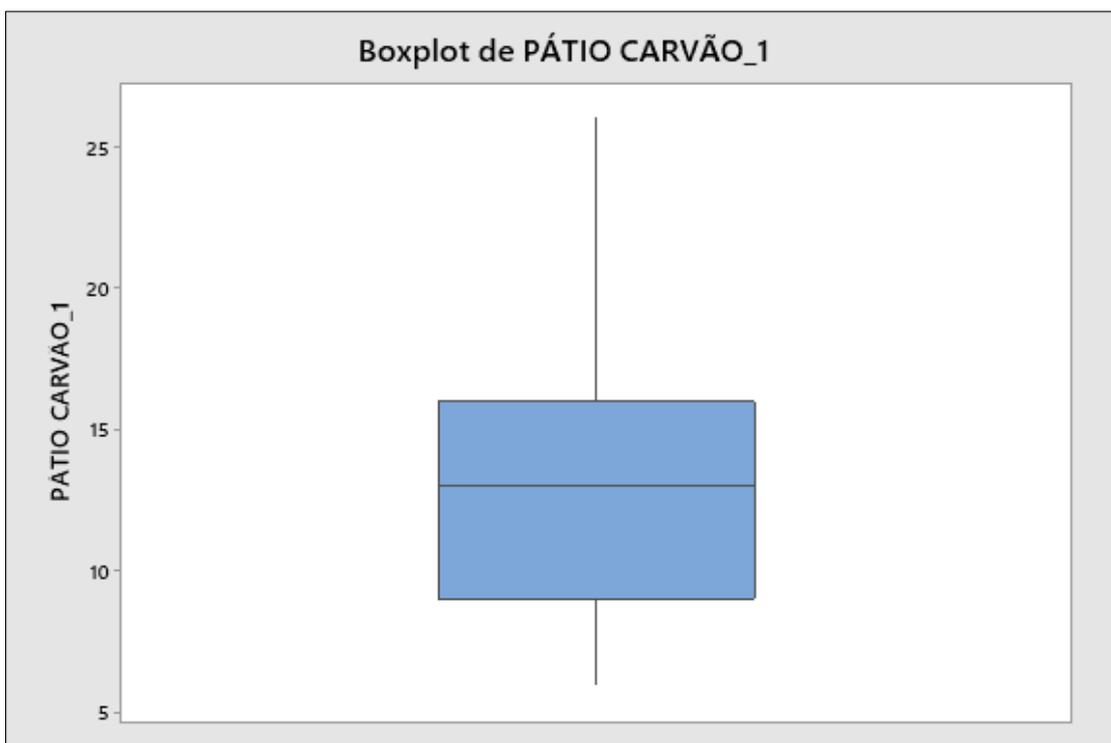
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 23 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de carvão



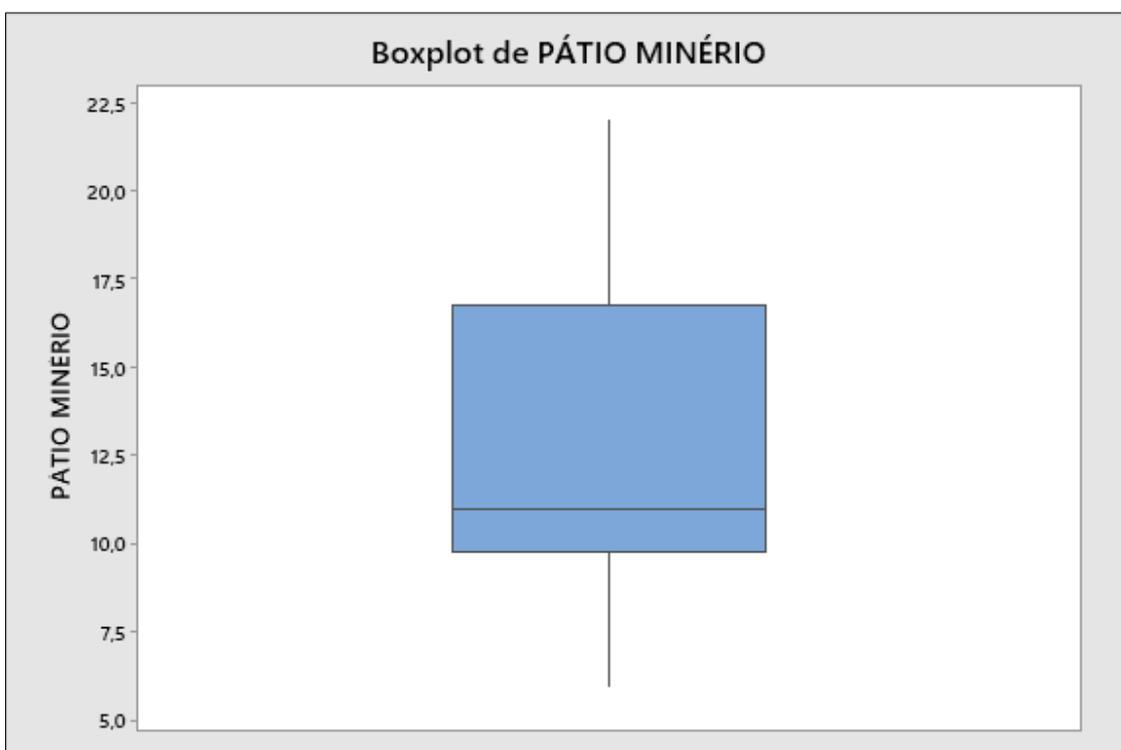
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 24 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de carvão sem outliers



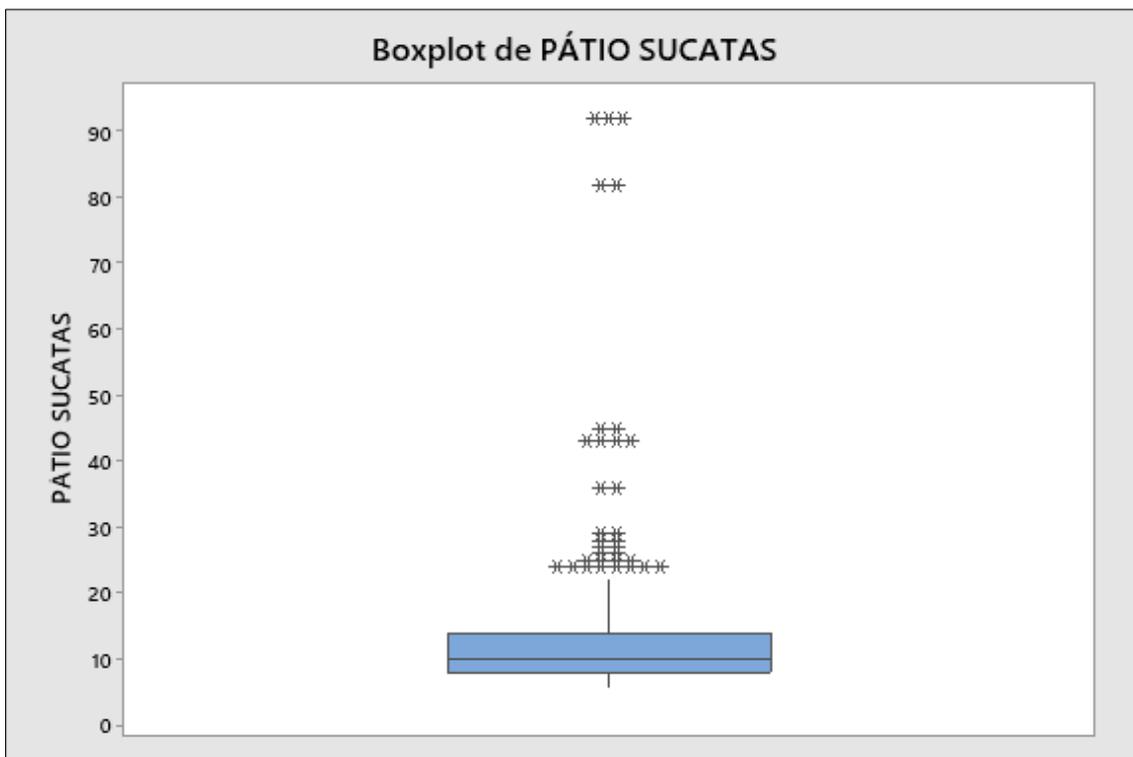
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 25 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de minério



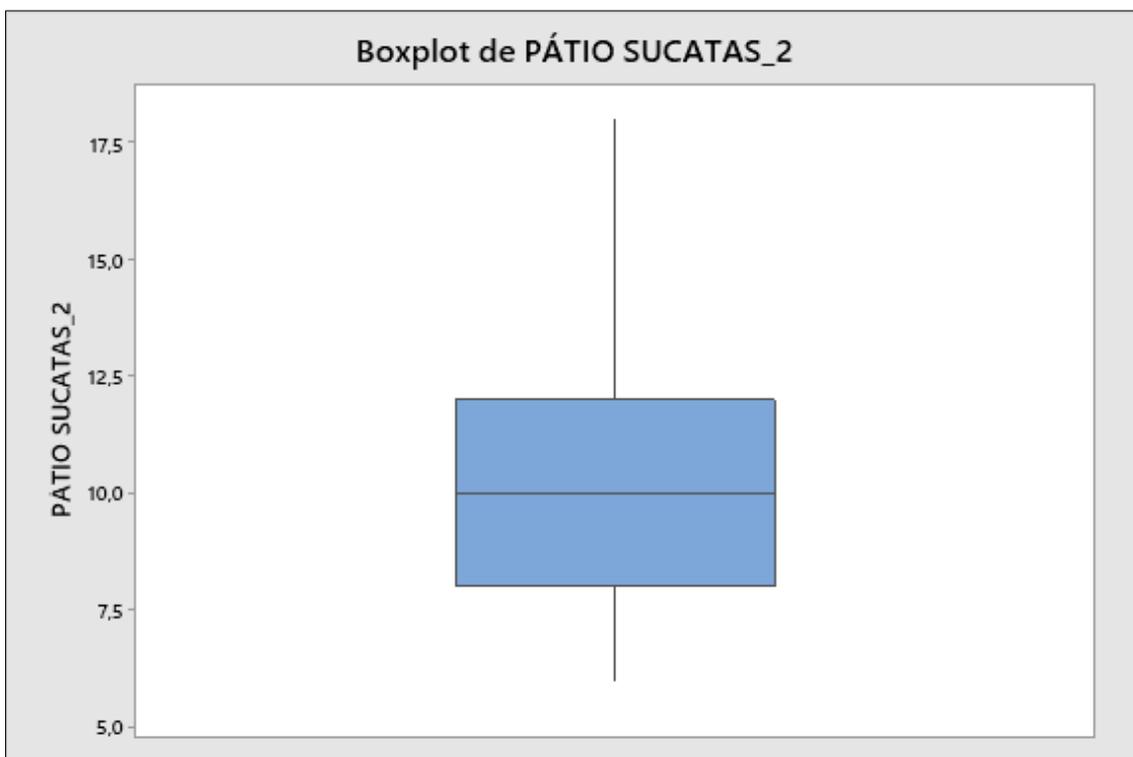
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 26 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de sucatas



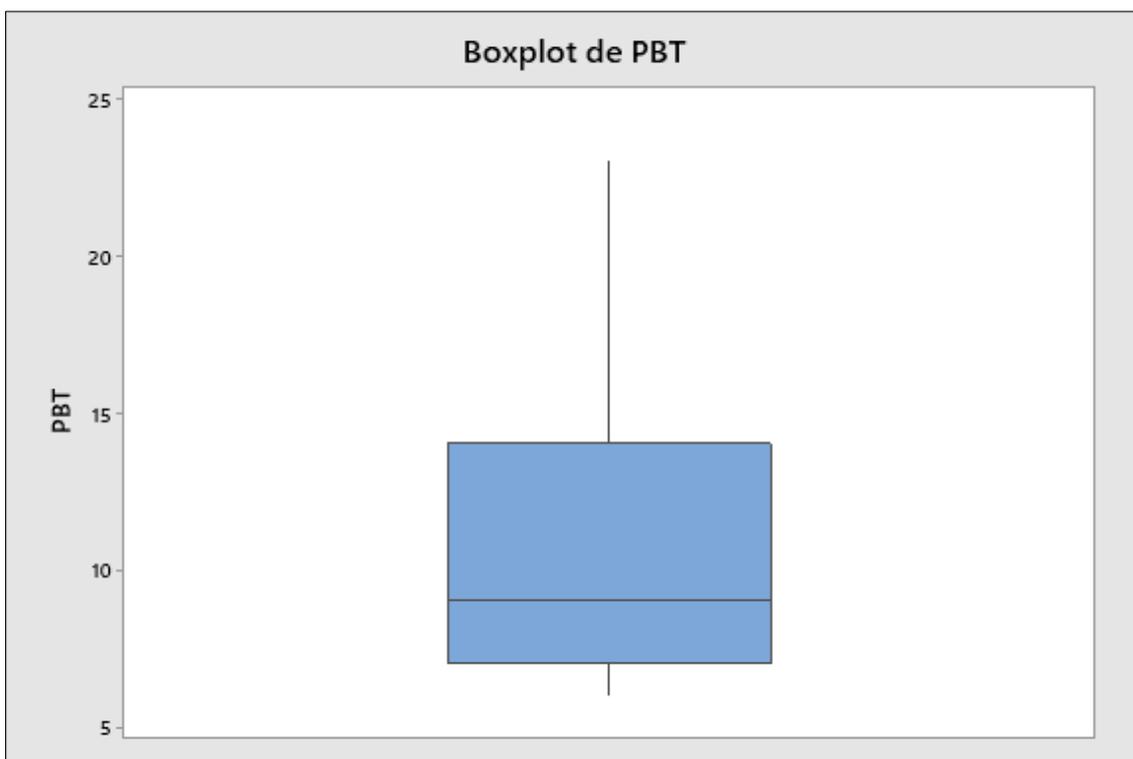
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 27 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do pátio de sucatas sem outliers



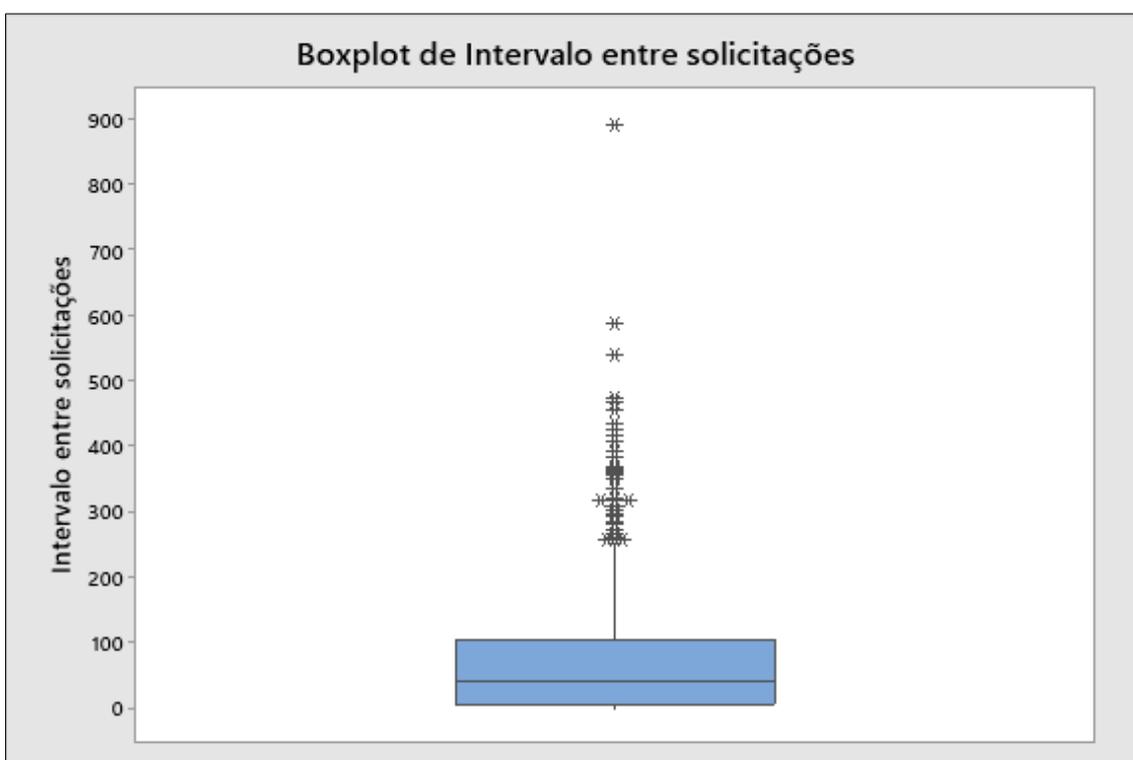
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 28 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do PBT sem outliers



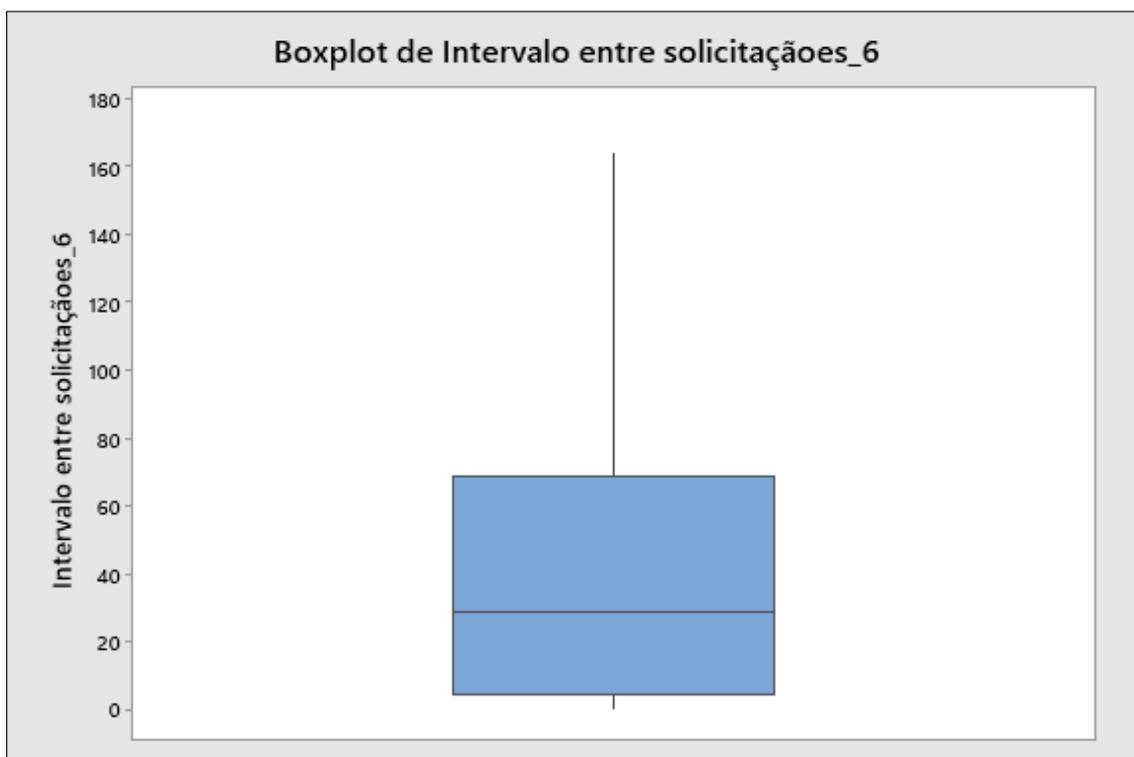
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 29 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do intervalo entre solicitações



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

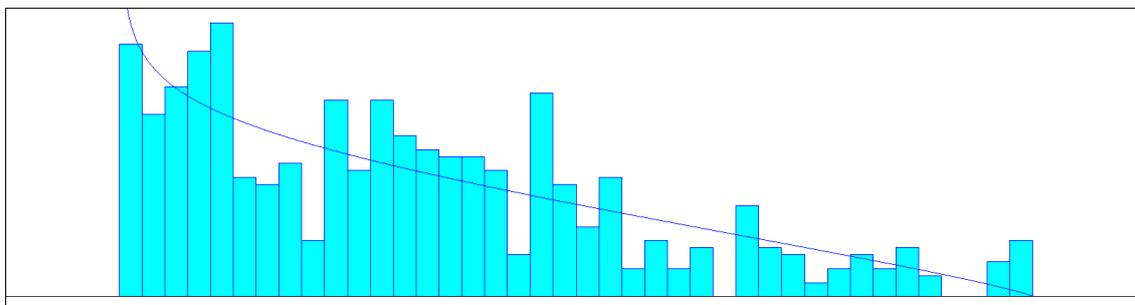
Gráfico 30 - Gráfico boxplot com os intervalos de operação do intervalo entre solicitações sem outliers



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

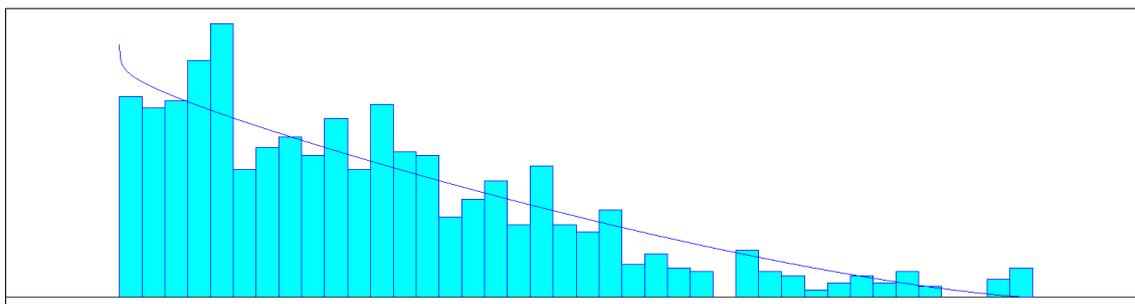
APÊNDICE B – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE OPERAÇÕES DAS ÁREAS ESTUDADAS (JANEIRO/2023)

Gráfico 31 - Distribuição estatística dos tempos de operação aciaria



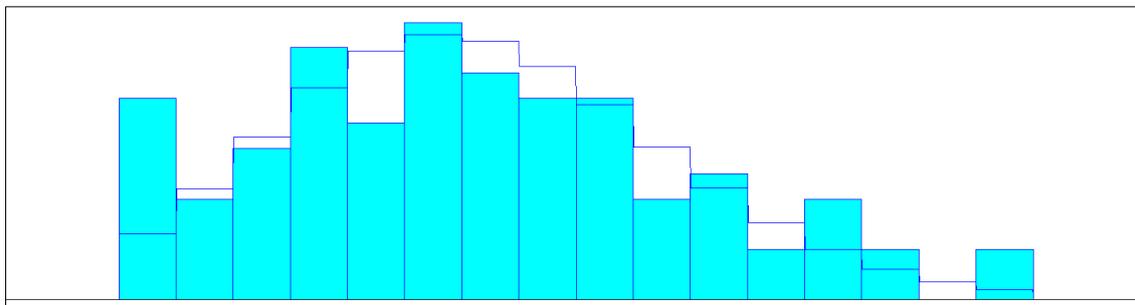
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 32 - Distribuição estatística dos tempos de operação alto forno 1



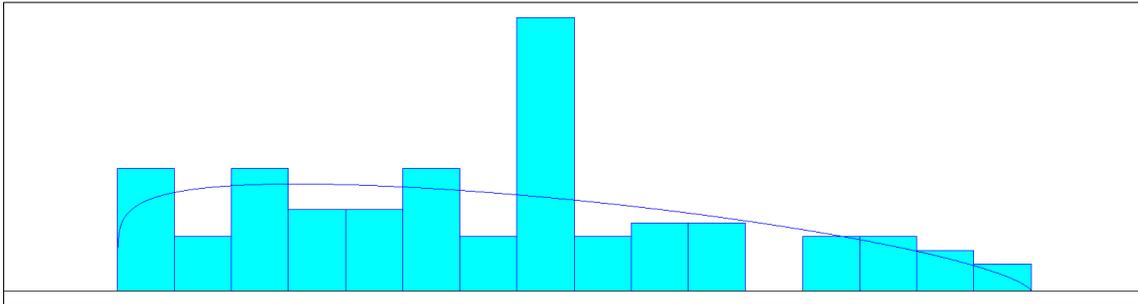
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 33 - Distribuição estatística dos tempos de operação alto forno 2



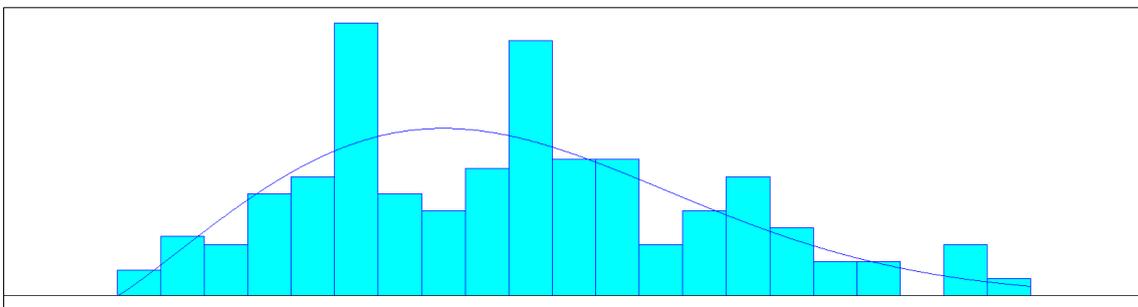
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 34 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 1



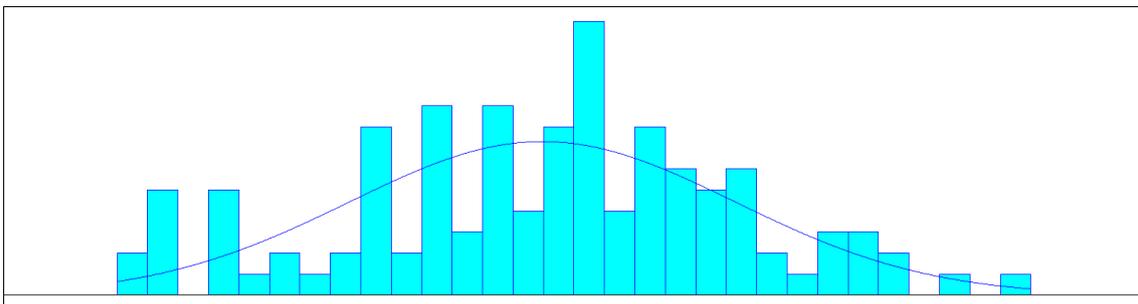
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 35 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 2



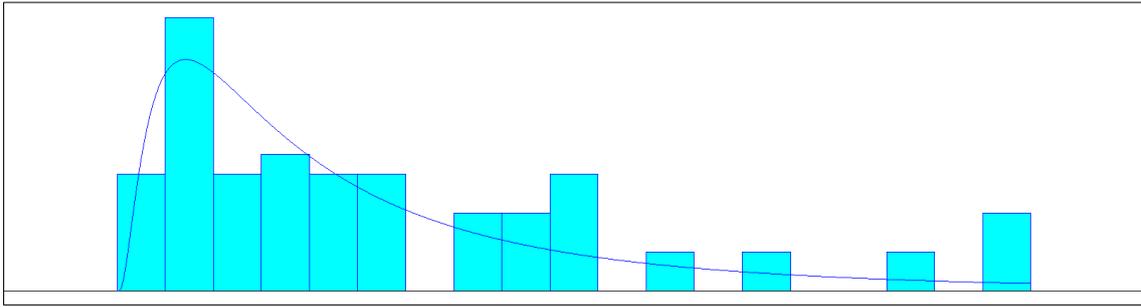
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 36 - Distribuição estatística dos tempos de operação DRI



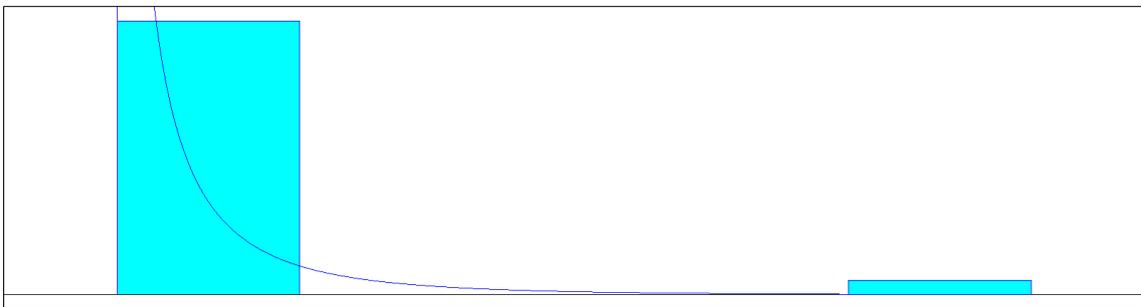
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 37 - Distribuição estatística dos tempos de operação gasômetro



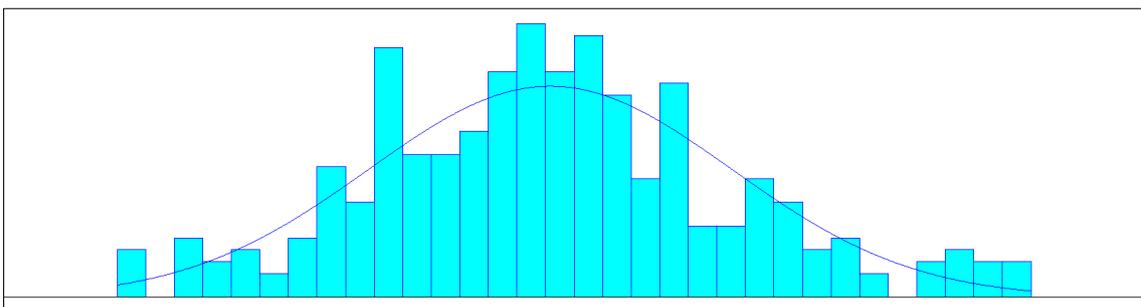
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 38 - Distribuição estatística dos tempos de operação GRI



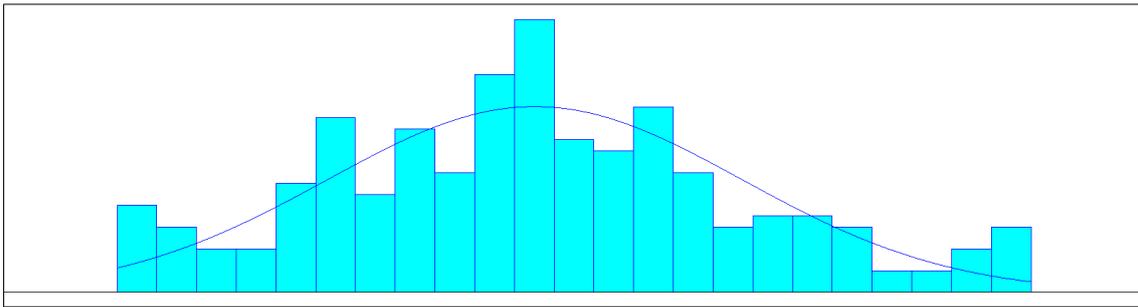
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 39 - Distribuição estatística dos tempos de operação Harsco



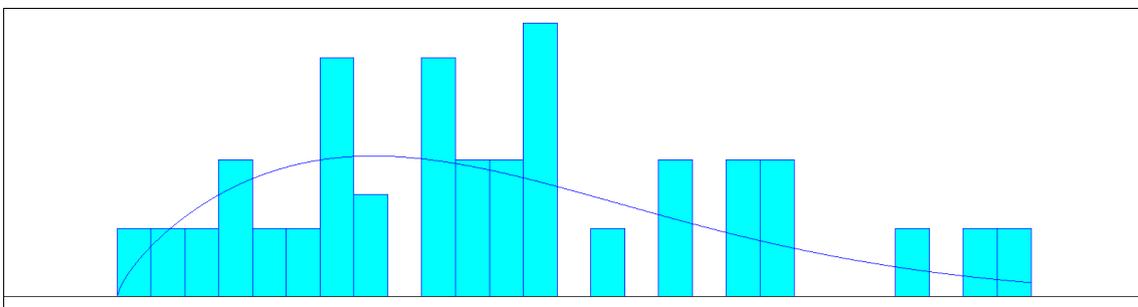
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 40 - Distribuição estatística dos tempos de operação LCG



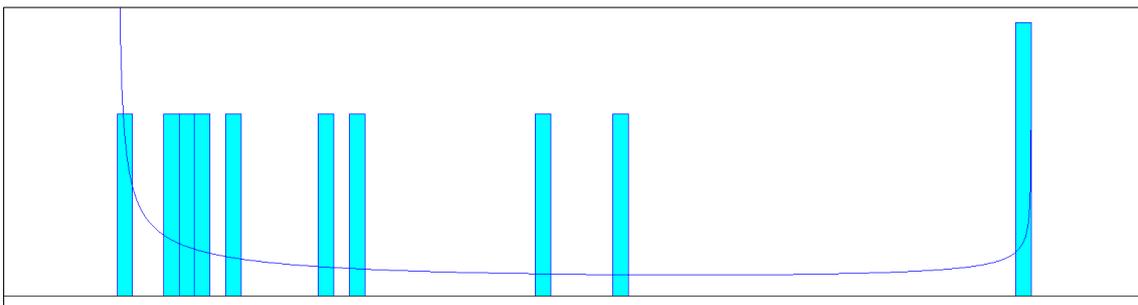
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 41 - Distribuição estatística dos tempos de operação LTQ



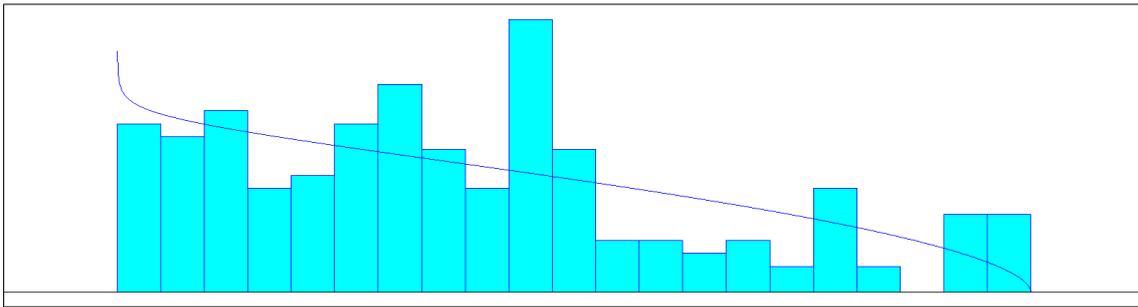
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 42 - Distribuição estatística dos tempos de operação oficina central



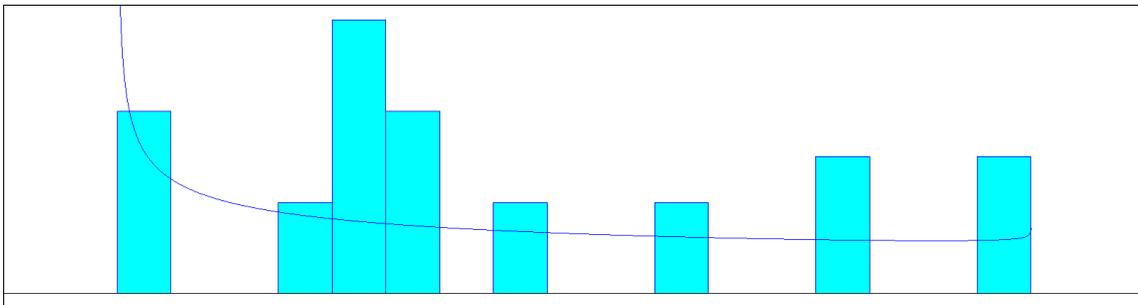
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 43 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de carvão



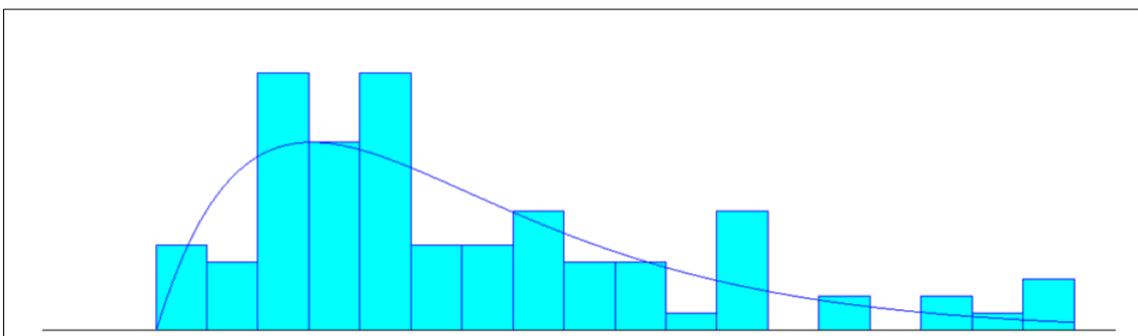
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 44 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de minério



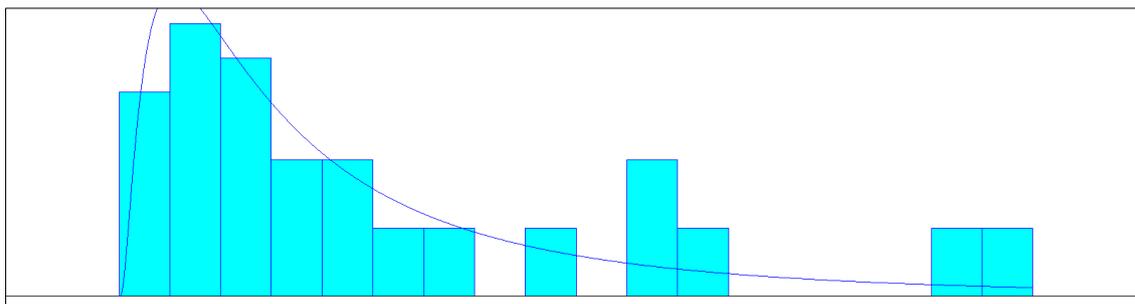
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 45 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de sucatas



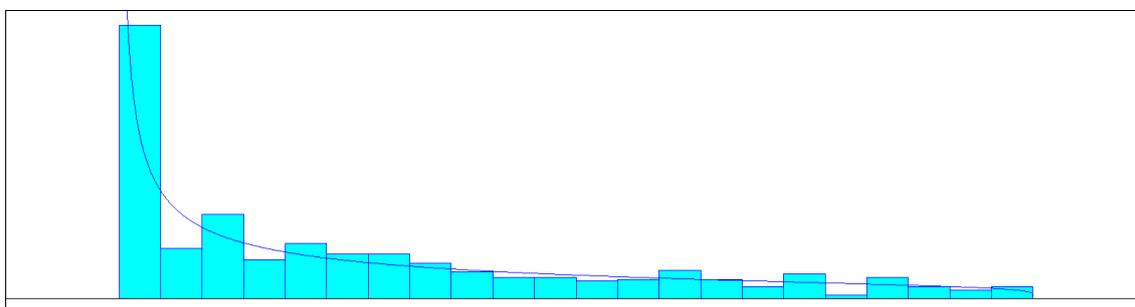
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 46 - Distribuição estatística dos tempos de operação PBT



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

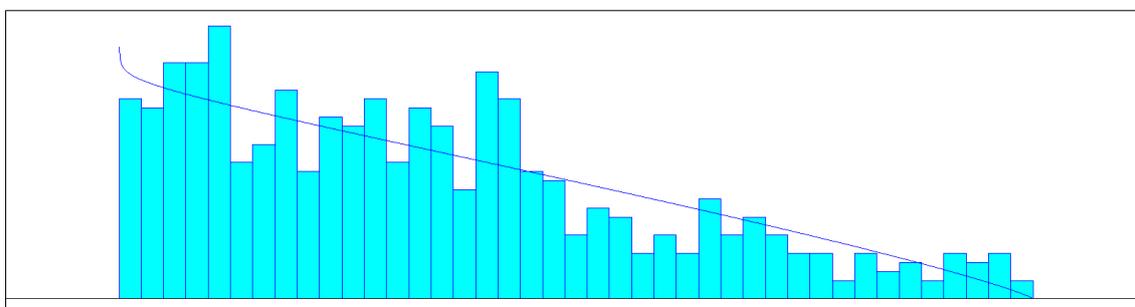
Gráfico 47 - Distribuição estatística dos tempos de operação intervalo de atendimentos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

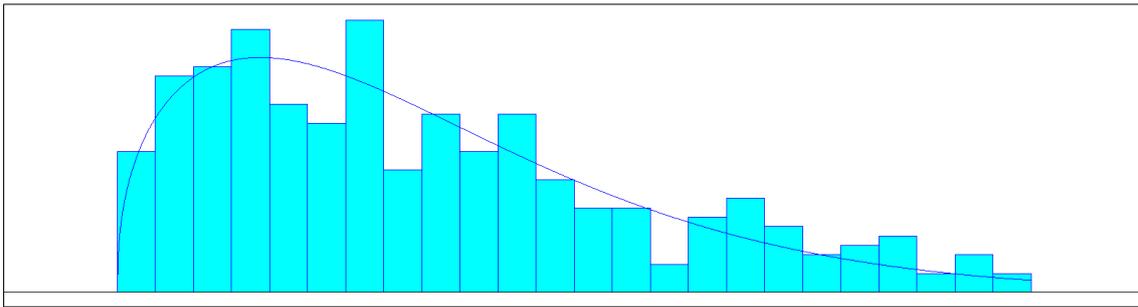
APÊNDICE C – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE OPERAÇÕES DAS ÁREAS ESTUDADAS (JANEIRO E FEVEREIRO/2023)

Gráfico 48 - Distribuição estatística dos tempos de operação aciaria (Jan e Fev/23)



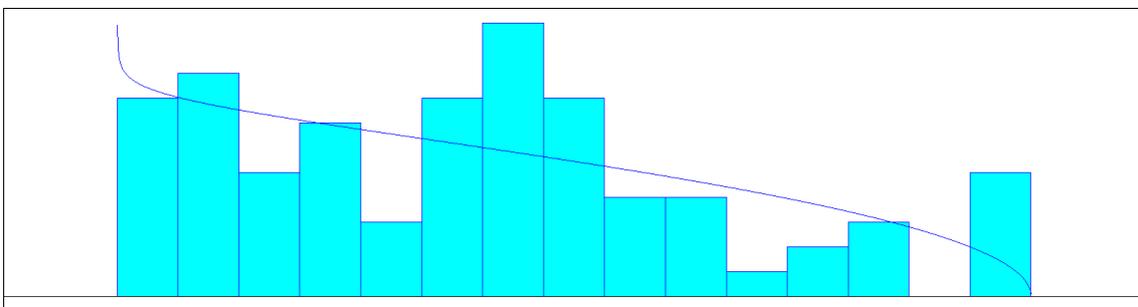
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 49 - Distribuição estatística dos tempos de operação alto forno 1 (Jan - Fev/23)



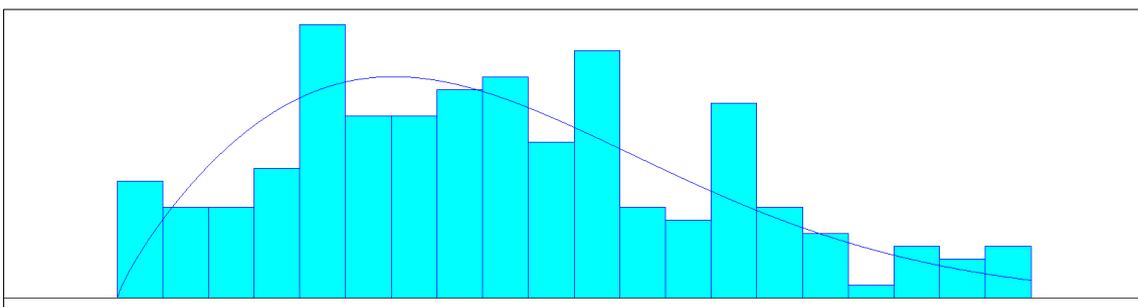
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 50 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 1 (Jan-Fev/23)



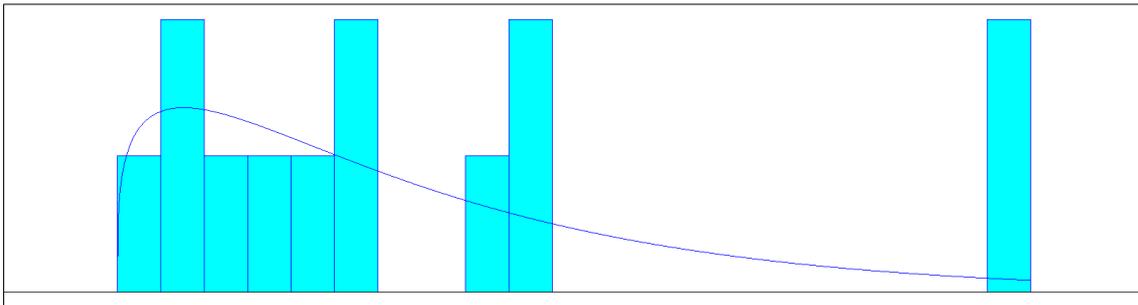
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 51 - Distribuição estatística dos tempos de operação coqueria 2 (Jan-Fev/23)



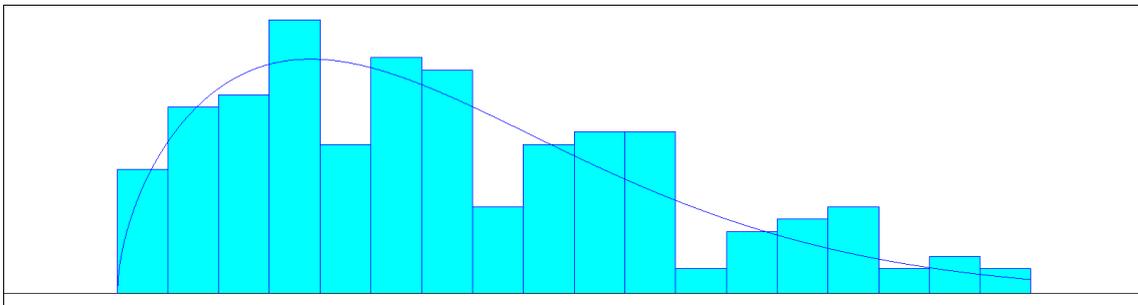
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 52 - Distribuição estatística dos tempos de operação GRI (Jan-Fev/23)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 53 - Distribuição estatística dos tempos de operação pátio de carvão (Jan_Fev)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)