

**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

DISSERTAÇÃO

**MEDIÇÃO DA MASSA DE MINÉRIOS SOBRE TRANSPORTADORES DE
CORREIAS UTILIZANDO SENSORES LIDAR**

ANDERSON SILVA MACEDO

**Ouro Preto
Outubro de 2023**

ANDERSON SILVA MACEDO

**MEDIÇÃO DA MASSA DE MINÉRIOS SOBRE TRANSPORTADORES DE
CORREIAS UTILIZANDO SENSORES LIDAR**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Área de concentração: Engenharia de controle e automação de processos minerais.

Orientador: Prof. Adrielle de Carvalho Santana, D.Sc.

Ouro Preto
Outubro de 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M141m Macedo, Anderson Silva.

Medição da massa de minérios sobre transportadores de correias utilizando sensores lidar. [manuscrito] / Anderson Silva Macedo. - 2023. 76 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Adrielle Santana.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Minérios. 2. Light Detection and Ranging (LiDAR). 3. Pesos e medidas - Balanças (Instrumentos de medição). I. Santana, Adrielle. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Anderson Silva Macedo

Medição da Massa de Minérios Sobre Transportadores de Correias Utilizando Sensores LiDAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração

Aprovada em 21 de agosto de 2023

Membros da banca

Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Examinador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dra. Sílvia Grasiella Moreira Almeida - Examinadora (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais)

Adrielle de Carvalho Santana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 11/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Adrielle de Carvalho Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/10/2023, às 15:33, 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 **0599105** e o código CRC **070B7F0A**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013357/2023-40

SEI nº 0599105

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163

Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

RESUMO

O minério produzido pelas usinas de beneficiamento é depositado nos pátios de produtos em pilhas organizadas de acordo com sua especificação de qualidade, e posteriormente são enviados através de um circuito formado por máquinas de pátio, esteiras transportadoras e silo de carregamento. Após enchimento dos vagões o minério é transportado via linha férrea. O estoque é contabilizado pelo volume de produção presentes nas pilhas, que podem ser calculadas por levantamento topográfico dos estoques ou pela totalização da massa feita pelas balanças nas correias transportadoras presentes no circuito na etapa anterior ao empilhamento do minério. Depois de preencher o silo, os vagões são carregados e então a massa de cada vagão é medida usando balanças ferroviárias. Nesse processo de contabilidade, podem ocorrer discrepâncias entre as medidas das balanças de correia e das balanças ferroviárias, fazendo com que se tenha uma quebra contábil. Além disso, balanças de correia e ferroviárias não podem ser instaladas em qualquer lugar ao longo do caminho devido a restrições físicas. Ter uma opção de medição sem contato, que apresenta flexibilidade quanto ao ponto de instalação e sem desgastes mecânicos de peças que precisam de constantes ajustes e recalibrações, causando paradas de processo, pode ser uma opção para melhorar a precisão de medições no circuito de carga. Assim, este trabalho propõe a utilização de um sensor LiDAR, que, por meio de um laser pulsado, permite medir e obter a distância real que objetos estão uns dos outros e, assim, realizar cálculos de área. Com a instalação destes sensores nos transportadores de correia que alimentam a entrada dos silos de carga, é possível integrar, no tempo, a área do minério que está passando e obter seu volume. Com base nessas informações e na densidade do minério, foi possível calcular a massa de minério na correia e comparar com as medições feitas pelas balanças integradoras de massa atualmente nas correias. Testes estatísticos realizados com medições de campo demonstraram a semelhança entre as medições do sistema com o sensor LiDAR e as balanças existentes, com nível de significância de 5%. Assim, a totalização em tempo real da massa de minério em correias transportadoras via LiDAR provou ser uma alternativa e complemento viável para uso em plantas de processamento de minério e tem potencial para ser expandido para outros setores industriais, desde que a densidade do produto seja conhecida.

Palavras-chave: LiDAR; volume de minério; medição com balanças.

Macrotema: Usina.

Linha de Pesquisa: Instrumentação no Processamento de Minérios.

Tema: Redução de variabilidade e melhoria de controle.

Área Relacionada da Vale: Carregamento de minérios.

ABSTRACT

The ore produced by the processing plants is deposited in the product yards in piles organized according to their quality specification, which are later taken back and shipped through a circuit made up of yard machines, conveyor belts and a loading silo. Inventory is accounted for by the production volume present in the piles, which can be calculated by topographical survey of the stockpiles or by the total production accounted for by the scales of the conveyor belts present in the plant circuit in the stage prior to the ore stacking. After filling the silo, wagons are loaded and then the loaded mass of each wagon is measured using the railway scale. In this accounting process, discrepancies between the measurements of the belt scales and the railway scales may occur, causing the inventory breakdown. Furthermore, belt and rail scales cannot be installed anywhere along the way due to physical constraints. Having a non-contact ore mass measurement option, which presents flexibility regarding the installation point and without mechanical parts that need constant adjustments and recalibrations, which cause process stops, can be an option to improve the accuracy of measurements in the loading circuit. Thus, this work proposes the use of a LiDAR sensor, which, by means of a pulsed laser, makes it possible to measure and obtain the real distance that objects are from each other and to perform area calculations. With the installation of these sensors on the belt conveyors that feed the loading silos entrance, it is possible to integrate, in time, the area of the ore that is passing through and obtain its volume. Based on this information and the ore density, it was possible to calculate the mass of ore on the belt and compare it with the measurements made by the mass integrator scales on the belts. Statistical tests performed with field measurements demonstrated the similarity between LiDAR measurements and existing scales, with a significance level of 5%. Thus, the real-time totalization of the mass of ore on conveyor belts via LiDAR proved to be a viable alternative/complement for use in ore processing plants which has the potential to be expanded to other industrial sectors if the density of the product is known.

Keywords: LiDAR; ore volume; measurement by scales.

Macrotheme: *Mine.*

Research Line: *Instrumentation in Mineral Processing.*

Theme: *Variability reduction and control improvement.*

Related Area of Vale: *Loading of ores*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de carregamento, composto por empilhadeiras, pilhas de minérios, retomadoras e correias transportadoras.....	14
Figura 2 - Vagão debaixo do silo, durante carregamento com minério.	15
Figura 3 - Trilhos com células de carga. Componentes da balança ferroviária.....	15
Figura 4 – Fluxograma do processo de carregamento de minérios.	16
Figura 5 - Transportador de correias sob máquina de pátio.	20
Figura 6 – Estrutura de pesagem.	21
Figura 7 – Integrador.	22
Figura 8 - Célula de carga.....	22
Figura 9 - Balança por medição radiométrica. a) Suporte de fixação, b) Fonte radioativa c) Receptor e unidade eletrônica.....	24
Figura 10 – Perfil medido da vazão mássica (azul) em t/hora e do percentual de corrente elétrica de um transportador (vermelho).....	25
Figura 11 – Perfil medido da vazão mássica (azul) e da pressão hidráulica de uma roda de caçambas (vermelho).	26
Figura 12 - Reflexão do feixe de luz na superfície do objeto.....	28
Figura 13 - Sensores de varredura 2D LiDAR R2000.....	29
Figura 14 - Princípio de funcionamento PRT.....	30
Figura 15 – Relação entre o envio do pulso e a recepção do pulso.	30
Figura 16 - Vista aérea do pátio de produtos Conceição. Vale, Itabira, MG.	33
Figura 17 - Tela do supervisor de operação do circuito de carregamentos.	34
Figura 18 - Tela do sistema PIMS com o monitoramento de variáveis de processos.	35
Figura 19 - Tela modelo de apresentação de variáveis de processo no PIMS.....	35
Figura 20 - Detalhes e dimensional para construção do suporte de fixação do sensor LiDAR.....	36
Figura 21 - Detalhes de fixação do suporte Sensor LiDAR.	36

Figura 22 – Montagem em campo. a) Suporte sobre o transportador, b) Compartimento de proteção.....	37
Figura 23 - Montagens e ajustes finais do sensor LiDAR sobre o transportador.....	38
Figura 24 - Sistema Gestão Produção Vale. Valor de densidade Pellet Feed CE1.	39
Figura 25 - Sistema Gestão Produção Vale. Valor de densidade Pellet Feed CE2.	40
Figura 26 – Setores de densidade, de acordo com a posição das máquinas.....	40
Figura 27 – Representação da área de interesse no plano cartesiano.	41
Figura 28 – Triângulo representado no plano cartesiano.	43
Figura 29 – Definição para cálculo da área do triângulo A, B, D.	44
Figura 30 - Influência do incremento de ângulo no cálculo da área.....	46
Figura 31 – Parte do código para cálculo do volume e massa.....	47
Figura 32 – Sensor LiDAR posicionado para leitura da superfície da bancada.	48
Figura 33 – Caixa maior posicionada para cálculo da tara do sistema.....	48
Figura 34 - Perfil delimitado da leitura da caixa maior.....	49
Figura 35 – Perfil calculado (vermelho) da tara com base no perfil medido da caixa maior (em verde).....	49
Figura 36 – Posicionamento para leitura do perfil da caixa menor.	50
Figura 37 - Perfil medido após o posicionamento da caixa menor (verde).....	50
Figura 38 - Representação do efeito sombra na medição de e superfície.....	51
Figura 39 – Relatório do resultado de calibração das balanças.	52
Figura 40 – Resultado gráfico do cálculo da tara.	53
Figura 41 – Perfis de medição: Tara em vermelho e do volume em verde.	53
Figura 42 - Medição de massa, balança integradora em azul e medição de massa calculada, sensor LiDAR em vermelho.	54
Figura 43 - Sinais com defasagem de acordo com a instalação. Medição de massa, balança integradora em azul e medição de massa calculada, sensor LiDAR em vermelho.....	55

Figura 44 – Similaridade entre os sinais de vazão real e calculada.....	55
Figura 45 – Parte do código e resultados.....	59
Figura 46 - Distribuição dos resíduos em linha contínua preta e em azul a distribuição normal esperada.	59
Figura 47 - Existência de outliers no <i>quantile-quantile</i>	59
Figura 48 – Presença de <i>boxplots</i>	60
Figura 49 – Resultado do Shapiro test.....	61
Figura 50 – Distribuição do teste de Shapiro.	61
Figura 51 – Distribuição dos resíduos em linha contínua preta e a distribuição normal desejada em linha contínua azul.	62
Figura 52 – Parte código R e resultado do teste.	63
Figura 53 – Resultados do teste R	63
Figura 54 – Gráfico de semelhança entre as variâncias dos resíduos.....	64
Figura 55 – Resultado do teste t-bilateral.....	65
Figura 56 – Resultado da potência do teste para as 26 amostras.....	66
Figura 57 – Resultado do teste das 42 amostras.....	66
Figura 58 - Tela de monitoramento lente Suja, via <i>FieldCare</i>	67
Figura 59 - Teste em bancada do sensor de velocidade.	68
Figura 60 - Montagens do suporte e sensor de velocidade ao transportador.....	68
Figura 61 – Sistema de medição danificado após instalação.....	69

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Ajuste de estoque de produção – Mina Conceição 1:.....	18
Tabela 2 – Cálculo de totalização de massa:	56

Lista de Siglas e Abreviaturas

CLP	Controlador Lógico Programável.
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear.
DS	Desenvolvimento Sustentável.
ITV	Instituto Tecnológico Vale.
KPI	key Performance Indicator, Indicador-chave de desempenho.
LiDAR	Light Detection and Ranging.
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção.
PF	Pellet Feed.
PIMS	Plant Information Management System.
SF	Sinter Feed.
VI	Virtual Instrumentation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Geral.....	17
1.1.2	Específicos	17
1.2	Justificativas.....	17
1.3	Metodologia.....	19
1.4	Organização do texto	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA.....	20
2.1	TRANSPORTE DE MINÉRIOS EM UMA USINA DE BENEFICIAMENTO	20
2.2	MÉTODOS EM PROCESSOS DE MEDIÇÃO DA PRODUÇÃO A GRANEL	20
2.2.1	Balanças de correias.....	21
2.2.2	Medição radiométrica	23
2.2.3	Medições indiretas sem balança física	25
2.2.3.1	Massa inferida por variação da corrente elétrica.....	25
2.2.3.2	Massa inferida por variação da pressão.....	26
2.2.4	Medição a laser	27
2.2.4.1	Sensores de medição de superfícies (2D).....	28
2.2.4.2	Princípio de Funcionamento, <i>Pulse Ranging Technology</i> (PRT)	30
2.2.5	Medição por soft-sensor	31
2.2.6	Outras aplicações do LIDAR para medição de volume	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
3.2	Dados	34
3.3	METODOLOGIA	36
3.4	CÁLCULO MATEMÁTICO	41
3.5	Estruturação do código no <i>Labview</i>	46

4	RESULTADOS	48
4.1	RESULTADOS PRELIMINARES	48
4.2	RESULTADOS PRÁTICOS APÓS INSTALAÇÃO EM CAMPO	51
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	55
4.3.1	Dados.....	56
4.3.2	Definição dos parâmetros do teste	57
4.3.3	Verificação das premissas do teste.....	58
4.3.4	Teste de normalidade dos resíduos.....	58
4.3.5	Teste de independência das amostras	62
4.3.6	Teste de igualdade de variâncias dos resíduos.....	63
4.3.7	Teste de hipótese.....	65
4.3.7.1	Teste-t bilateral.....	65
4.3.7.2	Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney.....	66
4.4	Monitoramento e diagnóstico do sistema	67
4.4.1	Implementação de Lente Suja	67
4.4.2	Monitoramento real da velocidade do transportador	68
5	CONCLUSÕES.....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

O circuito de carregamento de uma mineradora geralmente é composto pelo pátio de produtos, onde são formadas as pilhas de produção de minérios de ferro, máquinas de pátio e transportadores de correia. A produção da usina é depositada no pátio de produtos. Após o fechamento das pilhas, que consiste no seu enchimento longitudinal e transversal, por meio das máquinas de pátio de roda de caçambas, o minério é retomado e movimentado via transportadores até os silos de carregamentos para enchimento de vagões. A Figura 1 ilustra parte do trecho desse circuito.

Figura 1 – Processo de carregamento, composto por empilhadeiras, pilhas de minérios, retomadoras e correias transportadoras.



Fonte: AUTOR, 2021.

A parte inferior dos silos de carregamentos possui comportas que permitem o enchimento dos vagões de forma sequencial. Após o enchimento total e pesagem de cada vagão é emitida a nota fiscal da expedição do respectivo lote.

A locomotiva juntamente com a composição dos vagões segue via ferroviária até o porto, onde se inicia outro processo na cadeia logística. Na Figura 2, tem-se a imagem do enchimento dos vagões via silo de carregamento.

Figura 2 - Vagão debaixo do silo, durante carregamento com minério.



Fonte: AUTOR, 2021.

Após o enchimento do vagão, a massa carregada é medida por meio da balança ferroviária instalada nos trilhos a alguns metros à frente do local de enchimento dos vagões. Os trilhos instrumentados são os componentes responsáveis pela medição da massa carregada em cada vagão. As medições de massa de cada vagão são enviadas ao *software* de pesagem que faz a totalização do lote de vagões. Ao final de todo o processo de pesagem é emitida a nota fiscal de expedição desse lote. Na Figura 3, tem-se em destaque trilhos instrumentados com células de carga.

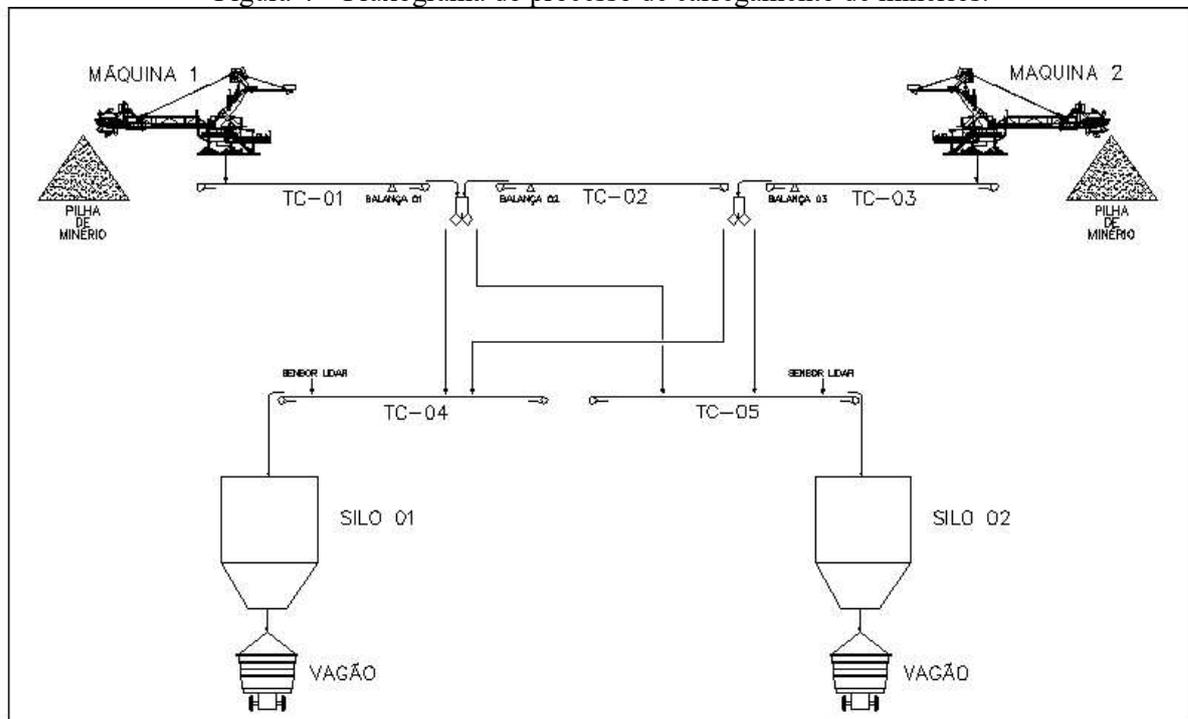
Figura 3 - Trilhos com células de carga. Componentes da balança ferroviária.



Fonte: STA, 2022.

A Figura 4, ilustra o fluxograma das principais etapas no processo de carregamento de minério.

Figura 4 – Fluxograma do processo de carregamento de minérios.



Fonte: Autor, 2023.

Os setores de qualidade e expedição são responsáveis pelo controle contábil do que foi produzido e o que foi expedido. O estoque é contabilizado pelo volume de produção presente nas pilhas. O volume pode ser calculado por levantamento topográfico das pilhas ou por totalização de produção contabilizada pelas balanças das correias transportadoras presentes no circuito da usina.

No processo de medição e contabilização da massa de minérios produzida, podem ocorrer alguns problemas, tais como: quebra contábil, elevado tempo morto em malhas de controle, falhas na medição da massa, dentre outros.

A quebra contábil pode ocorrer de duas formas, sendo (i) O valor de estoque presente é inferior ao valor de estoque produzido e expedido. Nesse caso há uma expedição de minérios a mais que o informado, gerando prejuízo para a empresa. (ii) O valor de estoque presente é maior que o valor de estoque produzido e expedido. Nesse caso há uma expedição de minérios inferior ao informado, podendo causar prejuízos aos clientes.

Problemas envolvendo elevado tempo morto, que consiste no atraso entre a medição da massa até o efetivo início da ação de controle, geralmente está relacionado à impossibilidade

de se instalar balanças em pontos ideais na estrutura do transportador, como próximo da saída de alimentadores, ou do elemento de controle. Essas restrições mecânicas podem resultar em ações de controle incorretas.

Problemas relacionados às montagens mecânicas do sistema de pesagem, como desgastes mecânicos de partes rotativas, falta de manutenção, podem ocasionar a medição incorreta da massa sobre as balanças.

Assim, a medição correta da massa de minério e a investigação de novos métodos para fazê-la é de grande importância para os processos dentro de uma usina de beneficiamento. O projeto apresentado propõe a utilização de sensor de medição laser do tipo LiDAR (*Light Detection And Ranging*) para medição de volume e massa sobre transportador de correias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Como opção de medição volumes e massa de minérios em transportadores de correias, implementar no circuito de carregamento, a solução de sensores de medição a laser LiDAR

1.1.2 Específicos

- Definir local de instalação do sensor LiDAR de forma que possa ter sua medição e funcionamento comparada com a performance das balanças de correias convencionais presentes no circuito de carregamentos;
- Calcular o valor da massa de minérios a partir do volume medido pelo sensor LIDAR, e de parâmetros de processo tais como densidade, velocidade da correia dentre outros;
- Criar mecanismos de inferências para identificação de discrepâncias e erros de medição por meio da comparação entre a solução de medição convencional por balança de correia e a medição de volume por LiDAR.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O correto funcionamento de uma balança de correia está diretamente relacionado à correta instalação dos seus elementos e do estado de conservação e manutenção do transportador. Como os transportadores funcionam em regime de 24 horas por dia, com o passar do tempo, podem apresentar problemas, como desalinhamento da correia, acúmulo de detritos nas polias e

excesso de tensão, que interferem diretamente no desempenho e funcionamento das balanças presentes nessas correias. A perda de desempenho das balanças, também está relacionada à problemas inerentes à falta de manutenção que resultam no desalinhamento da sessão de pesagem, rolos desbalanceados, presença de ressaltos ou descontinuidade na superfície do tapete de borracha. Outro ponto que se espera contornar com a solução de medição de volume sobre transportadores é que, devido às características construtivas, e em atendimento às premissas de montagens das balanças convencionais sobre transportadores, dentro de vários processos, essa instalação convencional não é possível muitas vezes por não se ter o espaço necessário para a fixação da parte mecânica da balança. Uma vez validada essa solução, espera-se utilizar esse arranjo em alimentadores, transportadores, máquinas de pátio, ou em transportadores de curta extensão. Com a instalação nesses pontos, problemas relacionados a medição de massa que têm como desafio um elevado tempo morto, podem ser também mitigados.

A seguir, a tabela 1, mostra no período de 2018 a 2020, os meses em que, além de ocorreram quebras contábeis, houve a extrapolação da margem de tolerância permitida de $\pm 2\%$.

Tabela 1 – Ajuste de estoque de produção – Mina Conceição 1:

Ajustes de Estoques (R\$)			
Ano \ Mês	2018	2019	2020
Jan.	1.141.099,44	-2.674.131,78	-642.813,23
Fev.	325.192,78	434.217,56	49.130,45
Mar.	776.587,33	-3.030.550,13	10.969.703,98
Abr.	3.549.550,67	-2.530.831,98	-1.543.615,52
Mai.	2.923.229,90	561.845,04	1.216.806,79
Jun.	596.996,88	877.689,55	-
Jul.	-1.811.871,21	1.313.056,93	-4.572.650,35
Ago.	-497.602,33	95.431,78	-
Set.	-1.141.861,68	-146.981,13	-
Out.	-1.373.227,09	-919.725,44	-
Nov.	-2.399.247,53	1.377.615,98	-
Dez.	-1.001.343,29	-1.275.275,70	-

Fonte: Autor, 2023.

 Ajuste de estoque acima do limite (+/- 2% da produção no período)

As células hachuradas com valores negativos significam que ocorreram perda de estoque que extrapolaram a faixa estabelecida negativamente de - 2%. Já as células hachuradas com valores positivos, significam saldo no estoque que extrapolaram a faixa estabelecida positivamente de + 2 %.

1.3 METODOLOGIA

Pretende-se medir e conhecer o volume de produção de minério sobre a correia utilizando-se um sensor LiDAR. Por meio da medição da superfície vazia da correia, momento que o transportador está sem carga, é definida a tara do sistema. Essa tara ou correia vazia, é calculada com base na nuvem de pontos das distâncias recebidas pela medição da superfície do transportador em relação a face do sensor LiDAR. Esses dados são tratados via lógica de programação em ambiente *Labview*.

A partir da definição da tara, qualquer perfil ou traço de medição percebido e calculado que descreva uma forma será considerado volume sobre a correia. Após o tratamento desse sinal e da inserção de parâmetros de densidade e velocidade do transportador, a massa sobre a correia é calculada.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A partir do capítulo 2, tem-se o referencial teórico, que abrange as soluções convencionais para medição de vazão mássica em correias transportadoras que consiste em balanças integradoras de correias por células de carga ou por medição radiométrica. Além disso, apresentam-se os princípios da medição laser e trabalhos relacionados. O capítulo 3 é composto pela descrição dos materiais e métodos, com a caracterização da área de estudo, coleta e análise dos dados por meio da ferramenta *PI (Plant Information)* e no tópico metodologia são abordados detalhes da instalação do sensor LiDAR, bem como se dará a tratativa de dados gerados e coletados. No capítulo 4 é feita a apresentação e análise dos resultados gerados pela leitura e tratamento dos sinais. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

2.1 TRANSPORTE DE MINÉRIOS EM UMA USINA DE BENEFICIAMENTO

Após ser transportado da frente de lavra por caminhões fora de estrada até os britadores primários, inicia-se o processo de beneficiamento mineral. Nos processos de beneficiamento a seco, sem a utilização de água, na maioria do tempo, o minério é transportado via correias transportadoras.

De acordo com FERREIRA (2014):

A norma NBR 6177 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1998), um transportador de correia (TC) é um conjunto de componentes mecânicos, elétricos e estruturas metálicas, consistindo em um dispositivo horizontal ou inclinado, destinado à movimentação ou transporte de materiais a granel, por meio de uma correia contínua com movimento reversível ou não. As correias transportadoras possuem excelente custo-benefício se comparado com outros modais de transporte.

Na Figura 5 tem-se a representação de um transportador de correias:



Figura 5 - Transportador de correias sob máquina de pátio.

Fonte: AUTOR, 2022.

Devido sua forma construtiva, as correias conseguem transportar elevada produção de forma ininterrupta, sem consumo de combustíveis. As correias são mais competitivas do que o transporte por caminhões.

2.2 MÉTODOS EM PROCESSOS DE MEDIÇÃO DA PRODUÇÃO A GRANEL

As empresas de produção a granel necessitam medir o volume de suas produções. Com o setor de mineração não é diferente. Nas fases estratégicas do processo de beneficiamento do

minério de ferro a produção é medida por instrumentos específicos como medidores de vazão de polpa, medidores de densidade de polpa e balanças instaladas sobre correias. Os tópicos a seguir tratam dessas principais soluções de medições da produção, bem como características construtivas, suas vantagens e desvantagens.

2.2.1 Balanças de correias

A balança integradora para correia transportadora é um equipamento que mede a vazão mássica do material que está sendo transportado. Além da medição da vazão, este equipamento calcula a massa total do material transportado em um determinado período. São equipamentos utilizados em processos que necessitam realizar uma pesagem contínua e de grande volume, como é o caso da produção de minério de ferro. Este sistema é composto das seguintes partes, como segue:

- Seção de pesagem, ou mesa de pesagem, é a parte mecânica propriamente dita, onde é montada toda a estrutura mecânica como cavaletes, rolos balanceados, células de carga e sensor de velocidade. A Figura 6 ilustra um modelo de estrutura de pesagem:

Figura 6 – Estrutura de pesagem.



Fonte: CONCEITOPESAGEM, 2022.

- Unidade eletrônica, conhecida também por integrador, é a parte eletrônica do sistema responsável por receber os sinais oriundos das células de carga, do sensor de inclinação e do sensor de velocidade e, por meio de processamento interno, convertê-los em unidade de engenharia como t/hora. A Figura 7 ilustra modelo de unidade eletrônica integradora de sinais:

Figura 7 – Integrador.



Fonte: SHENCK, 2022.

- Célula de carga, ou ponte de pesagem, recebe toda a força aplicada pela seção de pesagem e a converte em um sinal elétrico que é posteriormente transferido ao módulo Integrador. A Figura 8 ilustra um modelo de célula de carga:

Figura 8 - Célula de carga.



Fonte: KISTLERMORSE, 2022.

No entanto, células de carga sofrem influência da variação da temperatura, o que pode acarretar uma medição incorreta. É difícil garantir que nenhuma outra força longitudinal ou transversal gerada pelo movimento da correia não seja transferida pela seção de pesagem às células de carga. Assim deve ser garantido o paralelismo entre os cavaletes de pesagem e os demais cavaletes da área de influência. O acúmulo de material com o passar do tempo interfere e desloca o zero da calibração. Irregularidades, desalinhamento, além de desgastes e emendas no tapete causam interferências também no processo de pesagem. Desgastes mecânicos dos roletes, vibração excessiva e tensionamento inadequado do tapete causam perturbações nas medições.

De acordo com Silveira (2014):

[...] as causas desta reputação são diversas, o desconhecimento do usuário das físicas envolvidas nessa medição, a necessidade inerente do processo de ajustes programados na calibração, a estratégia de mercado dos fabricantes que omitem informações importantes. Porém na prática é a limitação do projeto das balanças que foram concebidos e continuam a ser tratadas desta forma, como se somente duas variáveis estáticas — peso e velocidade — devessem ser medidas, ignorando-se a complexidade e a necessidade de controle de uma terceira variável, dinâmica, associada: a tensão da correia.

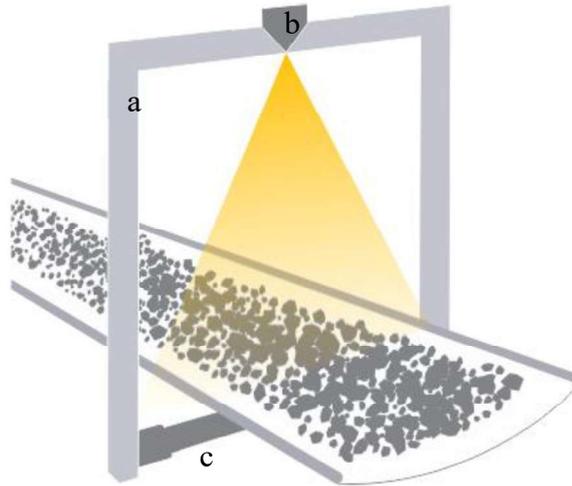
2.2.2 Medição radiométrica

De acordo com o fabricante de equipamentos, *Endress+Hauser* (2022), com os equipamentos de medição radiométrica, é possível efetuar quatro tipos de medição, quais sejam, nível contínuo, nível pontual, densidade e interface, mesmo em condições de processo extremas. A radiação gama é emitida quase sem atenuação em apenas uma direção e é amortecida em todas as demais direções. Isto assegura a mais alta segurança para operadores, bem como para uma medição confiável. A fonte gama, um isótopo de césio ou cobalto, emite radiação gama a qual é atenuada ao passar pelos materiais. O efeito da medição resulta da absorção da radiação pelo produto a ser medido e causada por mudanças no nível.

O sistema de medição consiste em uma fonte, um contêiner e um transmissor compacto como um receptor. As balanças de correias radioativas utilizam tecnologia nuclear para medição mássica de produtos em correias. Essa tecnologia de pesagem tem como característica a capacidade de medir a massa de forma precisa, sem sofrer interferências das particularidades identificadas pelo processo convencional de pesagem via balanças integradoras mecânicas. O funcionamento da balança radioativa, se baseia pelo princípio da emissão da radiação gama. Após a emissão da radiação, essa onda eletromagnética é atenuada ao atravessar o produto. Essa atenuação é registrada pela unidade eletrônica, o integrador.

Na Figura 9, tem-se um arranjo típico de montagem de uma balança radioativa. Por meio da ilustração é visto o portal de fixação, a fonte radioativa na parte superior e o detetor de radiação na parte inferior.

Figura 9 - Balança por medição radiométrica. a) Suporte de fixação, b) Fonte radioativa c) Receptor e unidade eletrônica



Fonte: Adaptado de VIKACONTROLS, 2022.

A medição de massa utilizando-se balanças radioativas, apresenta as seguintes vantagens:

- A balança não sofre interferências por intempéries, acúmulo de matérias, vibrações, excesso de tensionamento do tapete;
- Não ocorrem desgastes mecânicos, o que gera baixa demanda por manutenção mecânica;
- Baixa frequência de calibração requerida em comparação às balanças integradoras convencionais.

Apesar de muito utilizada nas indústrias de papel e celulose, ainda no segmento de mineração apresenta baixa aderência e alta rejeição como solução de medição devido as desvantagens apresentadas a seguir:

- Faz-se necessário um plano de gestão de elementos radioativos, com responsável legal, inventário de todas as fontes radioativas e aprovado pela autarquia CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear);
- Necessário maior controle patrimonial e de segurança por se tratar de elemento radioativo devido ao risco de furto, vandalismo e a saúde de trabalhadores e população em geral;

- O local de instalação se torna um ambiente restrito aos profissionais credenciados de acordo com o plano de radioproteção. Essa premissa pode inviabilizar a instalação em locais com pouco espaço ou que tenham fluxo próximo de pessoas;
- Ambientes com barragens devem ser evitados ou proibidos conforme orientação da CNEN;
- Controle médico periódico dos profissionais envolvidos na manutenção do sistema com dosimetria em laboratórios credenciados, exames médicos de rotina dentre outros.

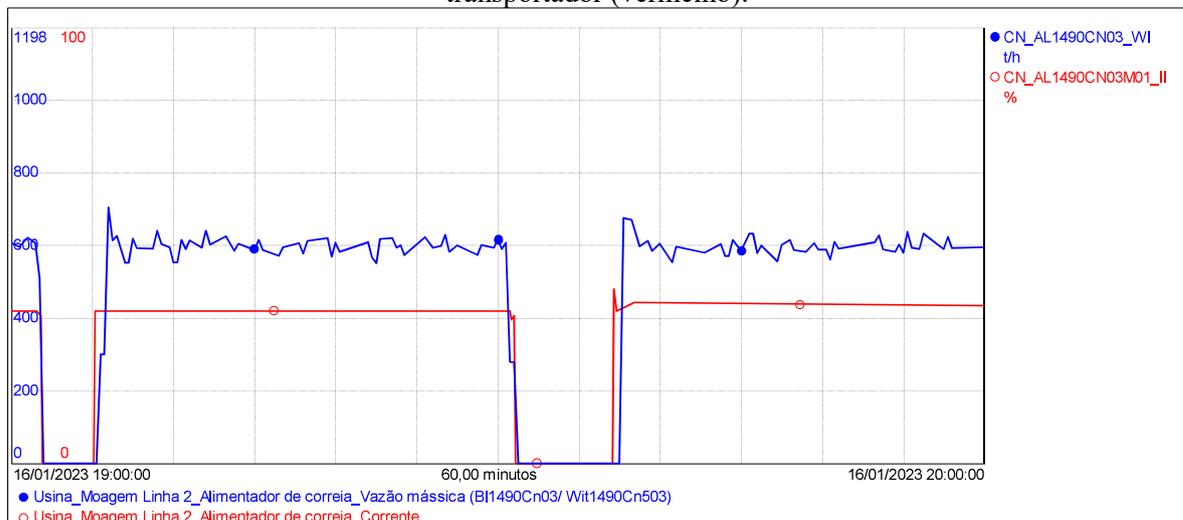
2.2.3 Medições indiretas sem balança física

Os dois métodos apresentados a seguir compreendem ensaios e experimentações dentro da própria empresa, portanto, ainda não testados e documentados partindo da experimentação empírica e prática provenientes dos setores de processo, instrumentação e automação.

2.2.3.1 Massa inferida por variação da corrente elétrica

Uma das iniciativas para o cálculo de massa sobre transportadores se dá pela técnica de medição da corrente elétrica do motor de acionamento. Por meio da leitura da corrente elétrica e por inferência, se faz o cálculo da massa sobre o transportador. Conforme observado na Figura 10, todo o esforço físico, torque, observado pelo sistema eletromecânico do transportador de correias é percebido na leitura da corrente elétrica.

Figura 10 – Perfil medido da vazão mássica (azul) em t/hora e do percentual de corrente elétrica de um transportador (vermelho).



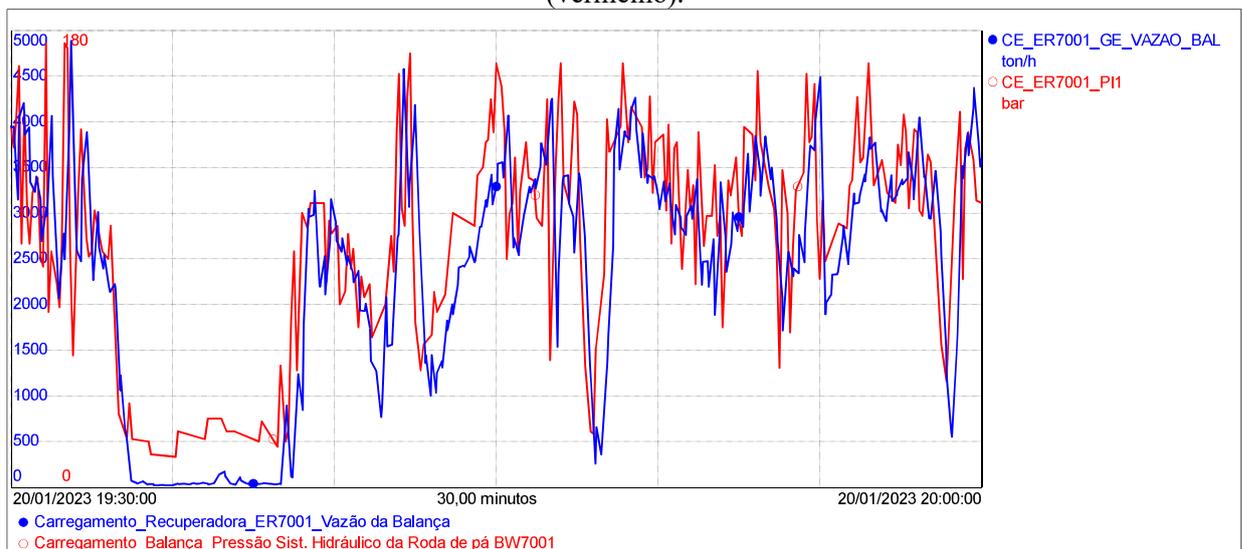
Fonte: AUTOR, 2023.

Ainda na Figura 10, tem-se um acompanhamento de um equipamento transportador, no qual se faz as leituras da massa de uma balança e da corrente elétrica consumida pelo motor desse sistema. Analisando-se apenas os perfis das variáveis vazão mássica (em azul) e corrente elétrica (em vermelho), percebe-se que estas possuem o mesmo comportamento.

2.2.3.2 Massa inferida por variação da pressão

Outra maneira comum de se inferir a vazão em sistema é pela correlação entre a pressão e a vazão mássica do sistema. A Figura 11 demonstra a relação entre pressão hidráulica (em vermelho) de uma roda de caçambas e vazão mássica (em azul) medida em uma balança convencional do mesmo equipamento, sendo percebido um comportamento semelhante:

Figura 11 – Perfil medido da vazão mássica (azul) e da pressão hidráulica de uma roda de caçambas (vermelho).



Fonte: AUTOR, 2023.

Tanto a medição de vazão indireta por meio da corrente elétrica do motor ou pela pressão, apresentam certas vulnerabilidades e instabilidades nesse cálculo inferido. Como exemplo a corrente elétrica medida no motor sofre influência de outras trações sofridas pelo sistema como agarramento do transportador causado por desalinhamento do tapete, oscilações bruscas na carga de minério alimentada no circuito também são imediatamente percebidas na leitura da corrente elétrica. Essas oscilações e outras que podem surgir, e inviabilizam a utilização do cálculo indireto da vazão por meio da leitura da corrente elétrica.

2.2.4 Medição a laser

O desafio de medição de vazão mássica de forma indireta por meio de sensores laser ou ópticos, apesar de algumas soluções, ainda apresenta baixa adesão. A justificativa se dá pelo fato dessas soluções de mercado apresentarem alto custo de aquisição e calibração e não estarem validadas em processos de mineração.

No entanto, os sensores LiDAR já estão em uso em diversos segmentos das indústrias do mundo inteiro. Esses sensores, além de proteger pessoas, como em sistemas de anticolisão, também permitem a realização de processos automatizados, como medição de volumes, perfis dentre outros. A seguir será esclarecido o funcionamento básico das diferentes variantes LiDAR. Os casos selecionados indicam possibilidades de aplicação dos *scanners* a laser sem contato, muitas vezes invisíveis.

De acordo com Weber (2018), a utilização de laser em ambientes industriais teve início com a tecnologia de medição TOF (*Time of Flight*), em português, tempo de voo. Esse termo é substituído pelos conceitos mais precisos LADAR ou pelo conceito mais utilizado LiDAR. LADAR (*Laser Detection and Ranging*) ou LiDAR (*Light Detection and Ranging*) foram denominados conscientemente em associação ao popularmente conhecido RADAR que significa *Radio Detection and Ranging*. Utilizar um laser significa iluminar ativamente o objeto de medição. Com uma iluminação ativa em qualquer situação de medição, pode ser utilizada a vantagem de se poder sintonizar o receptor do sensor com a fonte emissora. O sensor independe de fontes de luz externas, podendo ser utilizado durante a noite, durante o dia, em túneis com a mesma eficiência de aplicações na área externa ou sob luz artificial.

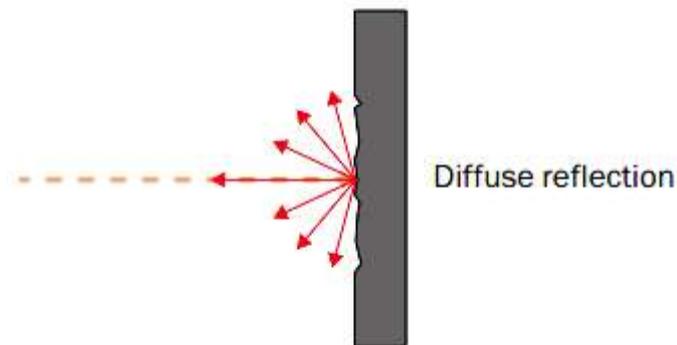
A utilização da luz de um laser coerente em feixes ainda tem outras vantagens, por exemplo, o sinal de emissão para detectar um objeto pode ser delimitado com nitidez no espaço. Neste caso, é importante que os sensores sejam projetados de modo seguro para os olhos e que correspondam às respectivas prescrições legais referentes à permissão das potências emitidas.

Na faixa 2D e 3D, a focalização de lasers emissores possibilita resoluções muito finas para detectar objetos a grandes distâncias ou objetos de estruturas finas. Faz parte da medição com laser, como fonte emissora, o uso de um elemento receptor correspondentemente adequado. Emissor e receptor, assim como a unidade de avaliação de alta resolução temporal, constituem o núcleo essencial do sensor LiDAR.

Um método de medição sem contato requer que o objeto de medição seja fisicamente detectável de acordo com o princípio de medição do sensor. Uma grande vantagem da medição a laser sem contato é que ela funciona em quase todo o tipo de constituição do objeto de medição. Isso possibilita uma vasta aplicabilidade do uso do laser no mundo industrial. Sensores de medição baseados em laser são utilizados, por exemplo, na logística, em processos de transporte, na detecção dos fluxos de trânsito em rodovias ou na automação de procedimentos de carga e descarga em contêineres em portos.

A potência luminosa refletida de um pulso de laser depende diretamente da distância e da constituição do objeto de medição. Pelo alargamento plano e retangular do pulso de laser na direção de emissão, a divergência, é lançada menos potência luminosa sobre o objeto por unidade de superfície, dependendo da distância. As mesmas condições de alargamento também valem para a luz refletida. Além disso, as superfícies a serem consideradas não estão necessariamente alinhadas de modo que nem toda a luz refletida seja enviada de volta, na direção do sensor. No caso dos sensores LiDAR, apenas uma fração da luz refletida chega no receptor do sensor LiDAR. A Figura 12, ilustra o princípio da reflexão difusa, ou seja, apenas uma parte do sinal emitido, retorna ao sensor, o restante do sinal sofre desvios causados pela superfície.

Figura 12 - Reflexão do feixe de luz na superfície do objeto



FONTE: WEBER, 2018.

2.2.4.1 Sensores de medição de superfícies (2D)

O desenvolvimento de sensores 2D teve como objetivo efetuar medições de superfícies utilizando-se das propriedades da medição com laser. O princípio consiste em deslocar um feixe de laser por meio de um espelho rotativo. Muitos sensores de varredura são sistemas de medição coaxial. O feixe do laser se encontra no meio do feixe de recepção e este feixe é desviado por um espelho rotativo. Todas as propriedades descritas que tornam a medição com laser tão

propícia ficam mantidas, ou seja, o grande alcance e a propriedade de medir também objetos extremamente escuros.

Nos sensores LiDAR, a sequência dos disparos dos pulsos do laser é sincronizada com a frequência de rotação do motor e com a resolução angular desejada. Normalmente, a frequência máxima dos disparos da fonte do laser e a resolução angular desejada determinam a velocidade de rotação do motor. Durante a rotação, não podem ser gerados mais pulsos do que o permitido pelo circuito do laser.

O sensor 2D laser scanner ou 2-D-LiDAR sensor é um sensor de medição de distância a laser que funciona com base no princípio *Pulse Ranging Technology* (PRT) que fornece medições precisas, curto tempo de resposta em condições variadas de ambiente e objetos. O sensor foi desenvolvido pela empresa *Pepperl+Fuchs*. A Figura 13 ilustra o exemplo de um sensor de varredura 2D LiDAR.

Figura 13 - Sensores de varredura 2D LiDAR R2000.

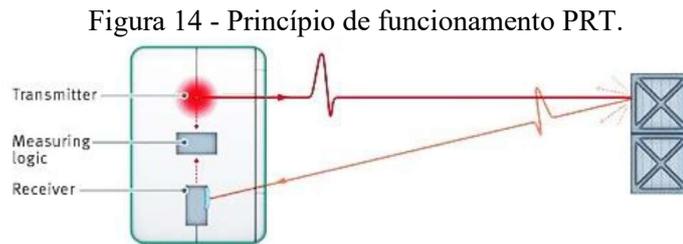


Fonte: PEPPERL+FUCHS, 2022¹.

¹ PEPPERL+FUCHS. Manual 2-D LiDAR Sensor R2000 Measuring Sensors. Disponível online: https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/doct6019a_eng.pdf?v=20200525155626.

2.2.4.2 Princípio de Funcionamento, *Pulse Ranging Technology* (PRT)

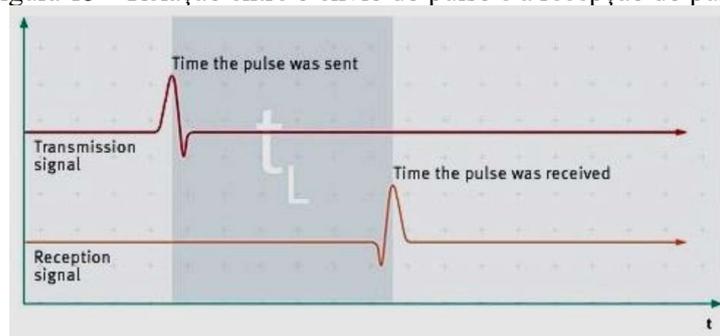
De acordo com o fabricante *Pepperl+Fuchs* (2022), com esse método de medição, uma fonte de luz de laser potente emite pulsos curtos e de alta energia, que são refletidos pelo objeto alvo e, em seguida, recapturados por um receptor sensível à luz. A Figura 14 ilustra o princípio de medição PRT.



Fonte: PEPPERL+FUCHS, 2022.

Durante esse processo, os tempos de emissão e recepção são detectados com alto grau de precisão. A partir dos valores determinados, a distância até o objeto alvo é calculada usando o tempo de execução dos pulsos de luz. Se o objeto alvo estiver próximo, o tempo de propagação da luz será curto. Se o objeto estiver mais distante, o tempo de propagação da luz é maior. A Figura 15, representa a relação entre o tempo de emissão do pulso e o tempo de detecção do pulso no receptor.

Figura 15 – Relação entre o envio do pulso e a recepção do pulso.



Fonte: PEPPERL+FUCHS, 2022.

Com base na Figura 15, a distância exata, s , do objeto é calculada usando o valor do tempo decorrido entre a transmissão e a recepção do pulso t_L e considerando a velocidade da luz, c , constante, tem-se:

$$S = c * \frac{t_L}{2} \quad (1)$$

Ainda de acordo com o fabricante, sensores com PRT emitem um pulso de luz muito curto e de alta intensidade e calculam a distância do objeto com base na constante de velocidade de luz e tempo de voo do pulso de luz refletido. Ao contrário de outros sensores de tempo de voo que emitem um feixe de luz contínuo, os sensores PRT emitem pulsos curtos de luz de alta intensidade até 250.000 vezes por segundo. Em comparação com uma fonte contínua, a densidade de energia de um pulso PRT pode ser até 1.000 vezes maior, permitindo detecção estável e altamente confiável, mesmo a distâncias de 300 metros ou mais. Em contraste com os sensores baseados em triangulação, a faixa de detecção de um sensor PRT não é limitada pelo *layout* geométrico do sensor óptico. Consequentemente, os sensores PRT podem tirar proveito de carcaças menores, ao mesmo tempo em que fornecem faixas de detecção significativamente maiores.

As vantagens da tecnologia LiDAR de transmissão PRT são:

- Oferece alta precisão mesmo se medindo grandes distâncias;
- Resultados precisos e repetíveis, independentemente de superfície ou cor alvo;
- Excelente resistência à luz ambiente;
- Supressão confiável do meio ambiente às influências como poeira, fumaça ou neblina.

2.2.5 Medição por soft-sensor

Sensores Virtuais ou *Soft Sensors*, consistem na implementação de um modelo que possui como entradas, variáveis secundárias que podem ser medidas e como saída uma variável de interesse que será inferida. Esse método é muito utilizado em aplicações em que existe a impossibilidade do uso de sensores reais.

O trabalho de Sobreira (2021), propõe a utilização de técnicas de aprendizado de máquina, mais especificamente M5P, Random Forest e REPTree, para o desenvolvimento de sensores virtuais para estimar a vazão mássica de minério em um transportador que não possui uma balança integradora. Os sensores foram desenvolvidos a partir de dados de corrente, torque e velocidade do motor de uma correia transportadora e das medições de vazão de minério de ferro de uma balança integradora instalada em outro transportador à montante.

As vantagens dessa solução são:

- Por meio da inferência, e baseado nos sinais dos sensores físicos instalados à montante se viabiliza a medição em pontos diferentes e que possam contribuir para uma implementação de controle mais assertiva.
- São relativamente baratos a sua implementação, uma vez que já utilizam de informações de medições de sensores já existentes no processo.
- Dependem exclusivamente do desenvolvimento de lógica de programação específico, desobrigando a necessidade de projetos para instalação física de sensores.

As desvantagens dos soft-sensors são:

- A solução é dependente dos dados de sensores reais, qualquer erro ou falhas de calibração são replicadas para os sensores virtuais.
- Soluções que utilizam balanças de correias como provedora de medições, estão sujeitas aos problemas relacionados à essa tecnologia.

2.2.6 Outras aplicações do LIDAR para medição de volume

No trabalho de Amorim et al. (2019) foram utilizados pares de sensores LiDAR para estimar o cálculo do volume de cargas em caminhões em movimento. Os sensores foram montados em estruturas fixas de forma que os caminhões possam passar por essas estruturas sem a necessidade de parar. Essa iniciativa se mostra também aplicável em processos de medição de volumes de vagões de minério de ferro carregados.

Em Chen (2010) é feito um estudo de Viabilidade de Classificação de Minério usando LiDAR hiperespectral ativo. A combinação de imagens hiperespectrais e técnicas LiDAR é um método emergente para adquirir informações espaciais e espectrais simultaneamente que permite o mapeamento remoto de conteúdo e distribuições minerais de alta resolução e identifica variações químicas sutis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se aqui a metodologia utilizada para execução do projeto.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Localizado na mina de Conceição, pertencente ao Complexo Minerário Itabira, no município de Itabira Minas Gerais, o pátio de produtos é responsável pelo armazenamento das produções de minério de ferro oriundas das usinas de beneficiamento Conceição 1 e Conceição 2. Esse pátio tem aproximadamente quinhentos metros de extensão e cem metros de largura. É subdividido em pátio de estocagem de *Pellet Feed* e *Sinter Feed*.

O armazenamento do material é feito por três empilhadeiras, sendo duas para empilhamento do *Pellet Feed* e uma para o *Sinter Feed*. Duas máquinas de pátio de rodas de caçambas são responsáveis por retomar e direcionar o minério pelas correias transportadoras até os silos de carregamentos. Pela Figura 16, tem-se uma visão aérea do pátio de produtos Conceição.

Figura 16 - Vista aérea do pátio de produtos Conceição. Vale, Itabira, MG.



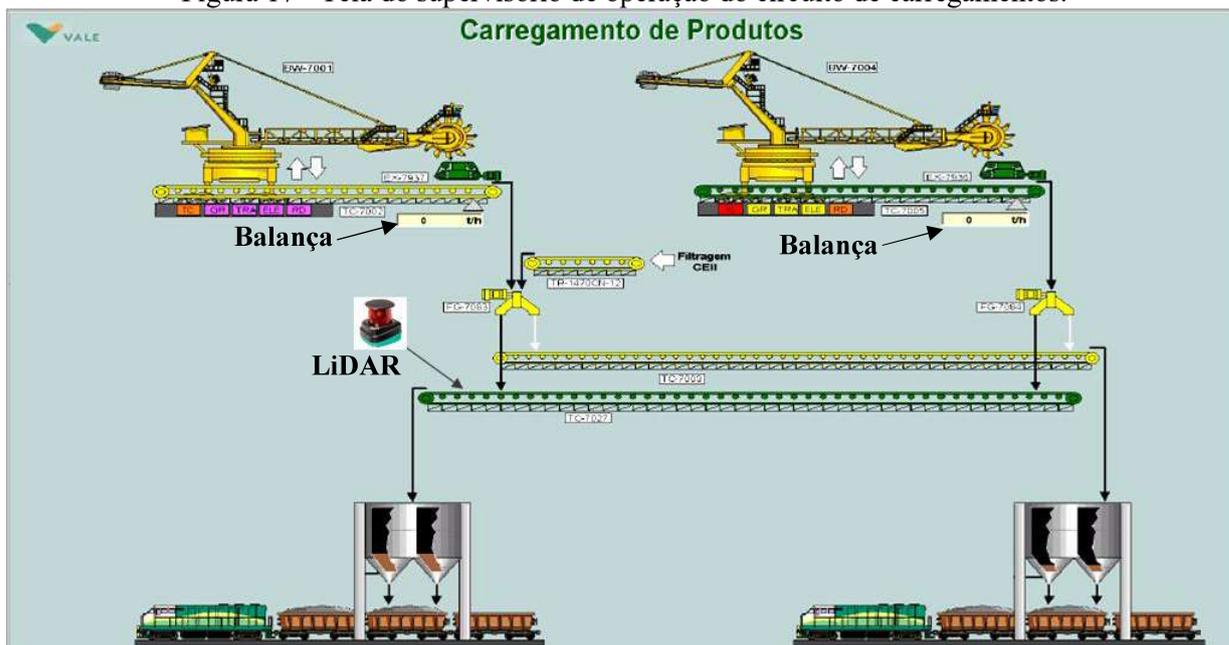
Fonte: GOOGLE MAPS, 2021.¹

O processo de carregamentos possui duas rotas, sendo a primeira composta pela retomadora 26ER70010, transportadores 26TC070020, 26TC070030 e silo 26SL070810. A

¹<https://www.google.com.br/maps/place/Mina+Concei%C3%A7%C3%A3o+-+Portaria/@-19.6531555,-43.2613993,518m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0xa5a3e35074012d:0xd7d4a880e7dac0ba!4b1!8m2!3d-19.6545104!4d-43.2564753>

segunda é composta pela retomadora 26ER70040, transportadores 26TC07005, 26TC070260 e silo 26SL070820. Somando-se todas as correias, cada circuito, tem aproximadamente 700 metros de extensão de correias. Na Figura 17, tem-se a tela do fluxo de processo do pátio de carregamento e expedição do minério de ferro e o local que se sugere a instalação do sensor LiDAR.

Figura 17 - Tela do supervisório de operação do circuito de carregamentos.



Fonte: Autor, 2021.

Cada circuito possui uma balança integradora na lança da retomadora e uma balanças no transportador do pátio (26TC070020 e 26TC070050).

3.2 DADOS

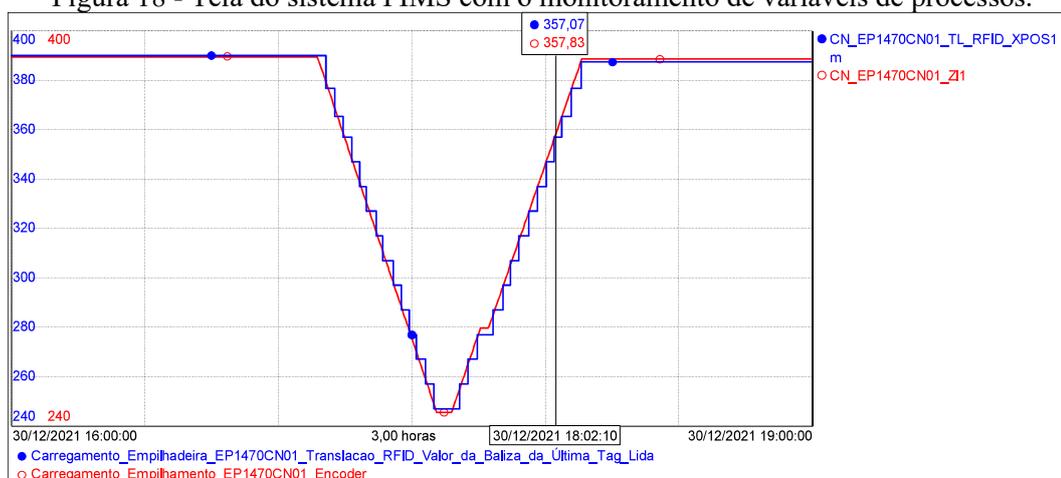
A massa e volume são duas unidades usadas para medir objetos. Massa é a quantidade de matéria que um objeto contém, enquanto volume é a quantidade de espaço que ele ocupa. A densidade relaciona a massa de um material ao volume que ele ocupa, sendo uma propriedade intrínseca do material e pode ser calculada pela equação 2:

$$d = \frac{m}{V} \quad (2)$$

em que d é a densidade dada em toneladas por metro cúbico (t/m^3), m é a massa do material dada em toneladas (T) e V é o volume que esse ocupa dado em metros cúbicos (m^3).

Todas as variáveis relacionadas ao sistema de medição de volume deverão ser configuradas e cadastradas para monitoramento futuro. Por meio da ferramenta de banco de dados em tempo real, *PI System*, é possível criar estruturas de análise e comparação de resultados passados com resultados presentes, definir metas e KPI's (*Key Performance Indicator*). A Figura 18 ilustra o monitoramento de variáveis de processos armazenadas no PIMS e seu comportamento.

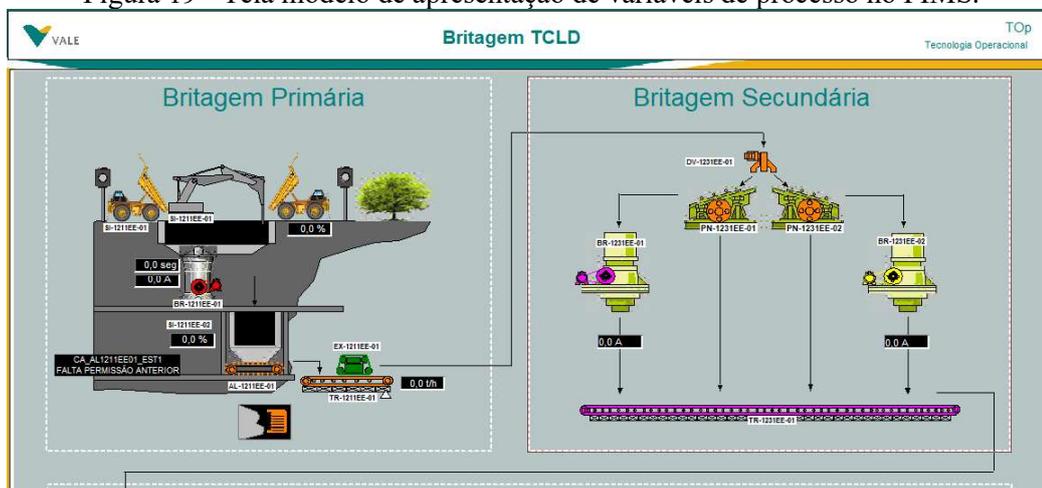
Figura 18 - Tela do sistema PIMS com o monitoramento de variáveis de processos.



Fonte: Autor, 2021.

As telas de supervisão criadas no ambiente do PIMS são recursos que permitem ao usuário final ter a reconstrução das telas de supervisão semelhantes ao supervisório da planta. A Figura 19 ilustra a criação de telas de supervisão que podem ser elaboradas por meio da ferramenta PIMS. Nessa figura, tem-se uma visão da tela de monitoramento de variáveis da área de britagem criadas no ambiente PIMS.

Figura 19 - Tela modelo de apresentação de variáveis de processo no PIMS.



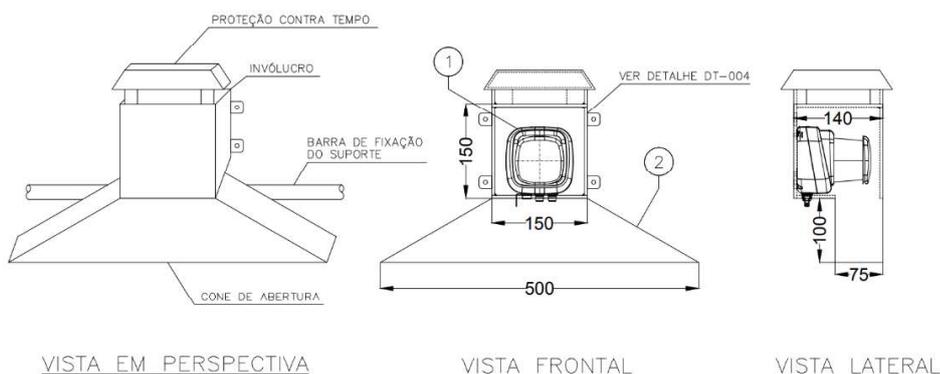
Fonte: Autor, 2021.

3.3 METODOLOGIA

O sensor LiDAR é instalado de forma perpendicular sobre a estrutura de uma das correias transportadoras que compõem o circuito de carregamento. Após o tratamento adequado do sinal, o resultado dessa medição é comparado e validado por uma balança integradora presente nesse mesmo processo, à montante da instalação do sensor LiDAR.

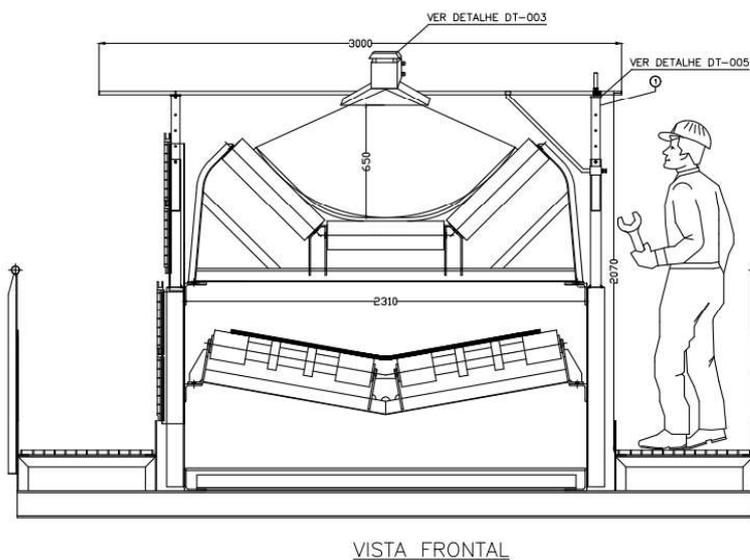
As montagens dos sensores se dão por meio das definições especificadas na fase da engenharia detalhada do projeto. A Figura 20 e Figura 21 ilustram o arranjo mecânico para montagem do sensor LiDAR sobre a correia transportadora. As confecções e montagens seguem as especificações dadas pelos desenhos técnicos.

Figura 20 - Detalhes e dimensional para construção do suporte de fixação do sensor LiDAR.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 21 - Detalhes de fixação do suporte Sensor LiDAR.



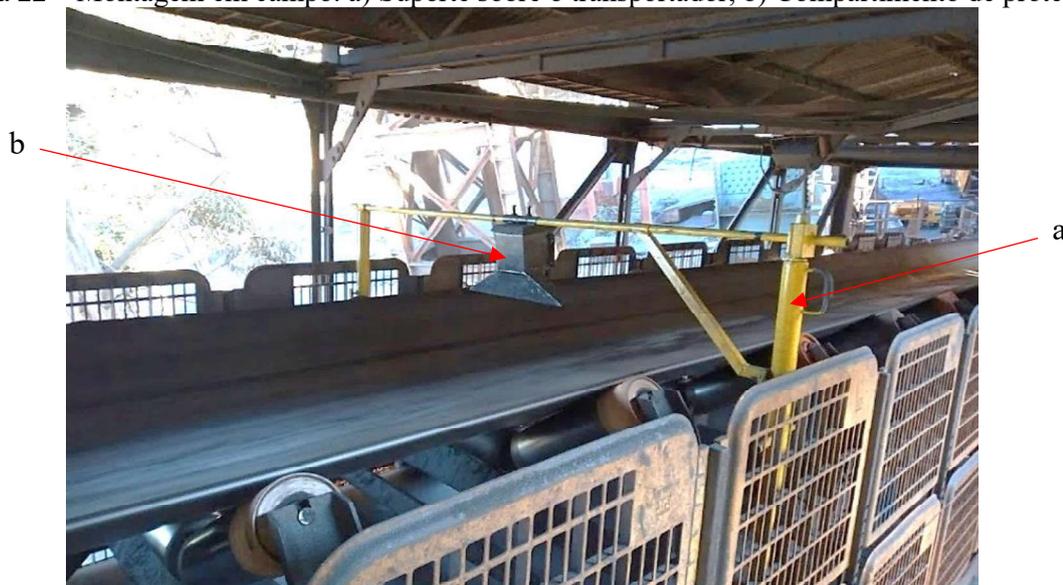
VISTA FRONTAL

Fonte: Autor, 2021.

As montagens em campo seguem cronograma especificado e são executadas conforme detalhamento dos documentos de engenharia gerado. Previamente é feito um planejamento detalhado de recursos e insumos para execução das montagens em campo. Esse planejamento é encaminhado ao setor de gestão de paradas PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) que por sua vez encaixa essa demanda junto ao calendário de paradas da planta. As paradas de planta ocorrem mensalmente e durante esses intervalos é que são feitas as montagens de campo. As montagens são executadas por equipe específica. As principais atividades de montagem são a fixação do suporte sobre o transportador, montagens de eletrodutos, lançamentos de cabos, interconexões elétricas e energização.

A Figura 22 ilustra a montagem do suporte e sensor LiDAR sobre a correia transportadora. Em amarelo (a) está o suporte principal e em preto (b) o compartimento de proteção contra intempéries (chuva, poeira, danos mecânicos etc.).

Figura 22 – Montagem em campo. a) Suporte sobre o transportador, b) Compartimento de proteção.



Fonte: Autor, 2021.

A Figura 23 ilustra os detalhes finais das montagens sobre o transportador bem como os ajustes finais de altura em relação ao transportador.

Figura 23 - Montagens e ajustes finais do sensor LiDAR sobre o transportador.



Fonte: Autor, 2022.

Após a instalação dos sensores LiDAR, energização e comissionamento, mede-se o volume do material sobre a correia transportadora. É necessário o tratamento dos dados emitidos por esses sensores. O sensor LiDAR emite pacotes de dados, conhecido como nuvem de dados.

Utiliza-se para a integração computadores industriais e o *software Labview*. Após as tratativas dos dados, esses são transmitidos ao CLP (Controlador Lógico Programável) da planta para integração final. A partir desse ponto, lógicas de programação específicas são implementadas no controlador da planta.

O volume de minério sobre o transportador é conhecido a partir da leitura via sensor LiDAR a uma taxa de amostragem por segundo. Uma vez conhecido esse volume, é inferida a densidade e calculada a vazão mássica produzida. Para esse método, dá-se o nome de balança volumétrica.

Para a calibração da balança volumétrica, são utilizadas as balanças integradoras presentes no mesmo circuito. Tanto os dados de produção contabilizados pela balança volumétrica quanto pela balança de correia são historiados em banco de dados de tempo real, conhecido por *PIMS (Plant Information Management Systems)* que por meio de uma arquitetura definida, é um sistema que coleta os dados de processo como temperatura, vazão, corrente, estados dentre outros, sendo esses dados oriundos de diferentes fontes.

Após configuração da taxa de amostragem, o PIMS armazena as coletas em um banco de dados históricos e os disponibilizam por meio de diversas formas de representação dentro do próprio *software* ou integrado ao *Microsoft Excel*. Após definidos o período ou janela de

armazenamento dos dados nas variáveis cadastradas no *PIMS*, por meio de análise visual e matemática, é possível inferir e aplicar os ajustes, ou *offsets* para calibração da nova balança volumétrica.

Uma vez conhecido o volume (V) por meio da medição do sensor LiDAR e definida a densidade do minério de ferro carregado, da equação (2), isolando-se a variável massa (m) e considerando a integral das pequenas amostras da área $\int A dx$, tem-se a massa calculada, com base na equação 3:

$$m = \left(\int A dx \right) * d \quad (3)$$

De acordo com o setor de qualidade da empresa, tem-se como principais produtos das usinas de Conceição 1 (CE1) e Conceição 2 (CE2) a produção de *Pellet Feed*. Para a primeira usina, o valor de densidade está padronizado em 2,38 t/m³ e para a segunda está em 2,42 t/m³.

A Figura 24, apresenta no sistema de gestão de Produção Vale (GPV) o valor estabelecido da densidade para o *Pellet Feed* para CE1.

Figura 24 - Sistema Gestão Produção Vale. Valor de densidade Pellet Feed CE1.

The screenshot shows the Vale GPV Mineração system interface. At the top, there is a header with the Vale logo and technical information: ENV: PRD | SYS TIMEZONE: GMT, WEB SERVER: gpvm-a_prd_ms05 | CACHE: INATIVO, BUILD: v1.4.23.5. The main navigation bar includes: Cadastro, Planejamento, Execução, Acompanhamento, Administração, and Outros Sistemas. The breadcrumb trail is: [CS01] Cadastro » Estocagem » Cadastro de Densidade. Below this, there are filters for Unidade Operacional: CEI, Sistema Produtivo: Pátio de Produto, Pátio: CE1_P, Pilha: CEP200015, and Material: PFCE. A table displays density data for two records.

Início Vigência	Característica	Densidade (t/m ³)	Justificativa	Observação
03/12/2020 19:00	Informada	2,590	Cadastro Inicial - replica da pilha origem.	
16/08/2021 11:00	Informada	2,380	Aferição de rotina.	

Fonte: Autor, 2023.

A Figura 25, apresenta no sistema de gestão de Produção Vale (GPV) o valor entalecido da densidade para o *Pellet Feed* para CE2

Figura 25 - Sistema Gestão Produção Vale. Valor de densidade Pellet Feed CE2.

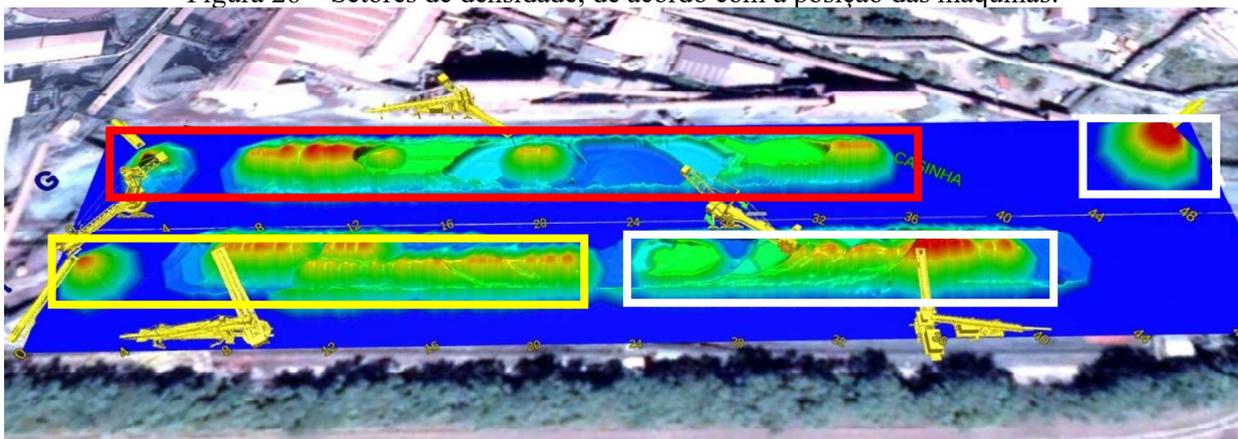
ENV: PRD SYS TIMEZONE: GMT WEB SERVER: gpvm-a_prd_ms05 CACHE: INATIVO BUILD: v1.4.25.5		GPV Mineração	
Cadastro ▾ Planejamento ▾ Execução ▾ Acompanhamento ▾ Administração ▾ Outros Sistemas ▾			
[CS01] Cadastro » Estocagem » Cadastro de Densidade		Visualizar	
Unidade Operacional: CEII		Sistema Produtivo: Pátio de Produto	
Pilha: CNP200013		Pátio: CEII_P	
Visualizando 1 a 2. Total de 2.			
Início Vigência	Característica	Densidade (t/m ³)	Justificativa
01/12/2020 19:00	Informada	2,610	Cadastro Inicial - replica da pilha origem.
16/08/2021 12:00	Informada	2,420	Aferição de rotina.

Fonte: Autor, 2023.

Além do *Pellet Feed*, a usina de Conceição 1 produz outro material, conhecido por *Sinter Feed*. Há, portanto, três tipos de materiais com densidades diferentes no pátio de produtos. O valor da densidade é um parâmetro de entrada para cálculo da massa. Para a correta seleção do valor da densidade, foi implementado via CLP, uma lógica para seleção do valor de acordo com a posição da máquina no pátio em relação à pilha de minério que será recuperada.

A Figura 26, ilustra a divisão do pátio de acordo com a localização dos produtos.

Figura 26 – Setores de densidade, de acordo com a posição das máquinas.



Fonte: Autor, 2023.

O setor em vermelho representa a produção de *Pellet Feed* da usina 1, com parâmetro de densidade igual a 2,38 ton./m³. O setor em amarelo representa a produção de *Sinter Feed* da

Usina 1 e valor de densidade de 2,62 ton./m³. O setor em branco representa a produção de *Pellet Feed* da usina 2 e valor de densidade de 2,42 ton./m³.

O último passo é acrescentar à fórmula a velocidade da correia transportadora. No primeiro momento, utiliza-se o valor já conhecido de projeto desse transportador. Uma avaliação futura poderá ser feita para instalação de um medidor de velocidade em tempo real. A vazão é calculada por meio da equação 4:

$$W = \frac{m}{h} \quad (4)$$

Onde W é a vazão mássica em t/h.

Utilizando as lógicas de cálculos da totalização da produção no controlador da planta, conforme equação 5:

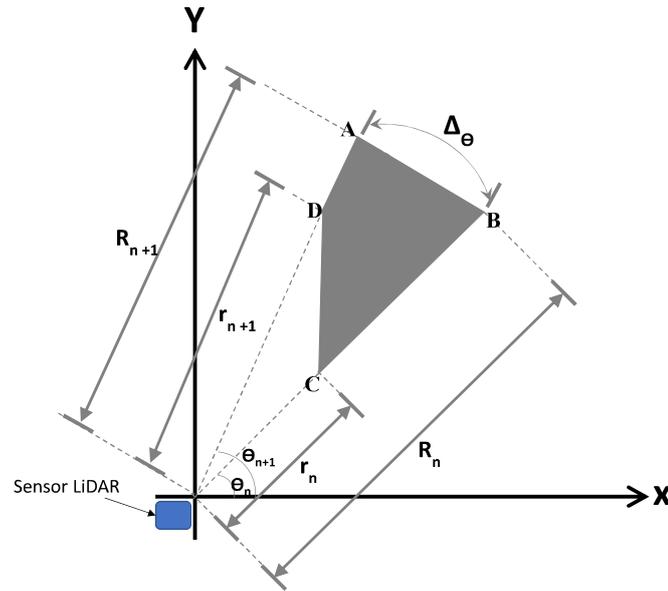
$$\text{Totalizador Produção} = \left(\int W dt \right) \quad (5)$$

3.4 CÁLCULO MATEMÁTICO

Por meio dos pontos gerados pela leitura do sensor LiDAR modelo R2000 da *Pepperl+Fuchs*, é realizado o cálculo de área a partir da definição da tara da superfície. Para facilitar o entendimento, utiliza-se como referência o cálculo da área do quadrilátero representado pela figura geométrica da

Figura 27. Considera-se que o sensor LiDAR encontra-se na origem do plano cartesiano.

Figura 27 – Representação da área de interesse no plano cartesiano.



Fonte: Autor, 2023.

Levam-se em consideração os pontos A, B, C e D dispostos em um plano cartesiano de forma que A_x , B_x , C_x e D_x correspondem às posições destes pontos no eixo das abscissas e A_y , B_y , C_y , D_y , as posições destes pontos no eixo das ordenadas.

Deseja-se então obter a área delimitada pelo quadrilátero formado pelos pontos A, B, C e D distantes da face do sensor de R_{n+1} , R_n , r_n , r_{n+1} , respectivamente e definidos em coordenadas polares. Para isso, é necessário expressar seus valores em coordenadas retangulares, de forma que:

$$\begin{aligned}
 A_X &= |R_{n+1}| \cos(\theta_{n+1}), & A_Y &= |R_{n+1}| \sin(\theta_{n+1}) \\
 B_X &= |R_n| \cos(\theta_n), & B_Y &= |R_n| \sin(\theta_n) \\
 C_X &= |r_n| \cos(\theta_n), & C_Y &= |r_n| \sin(\theta_n) \\
 D_X &= |r_{n+1}| \cos(\theta_{n+1}), & D_Y &= |r_{n+1}| \sin(\theta_{n+1})
 \end{aligned} \tag{6}$$

Considera-se que o segmento de reta formado entre os pontos A e B e todos os pontos desse intervalo representam a superfície definida como tara e correspondem às maiores distâncias medidas de entre cada ponto desse segmento em relação ao centro do sensor *LiDAR*.

Os segmentos de retas R_n e R_{n+1} , são as distâncias do centro do sensor até as extremidades da figura geométrica presente na

Figura 27, que para esse projeto, representam as bordas da correia. Considerando a instalação proposta do sensor em relação à correia, ou seja, alinhado ao centro da correia, pode-se considerar que as cotas R_{n+1} , R_n possuem a mesmo valor. As cotas r_n e r_{n+1} , representam as menores distâncias medidas do centro do sensor a partir da tara. A diferença entre os pontos (C – B) e (D

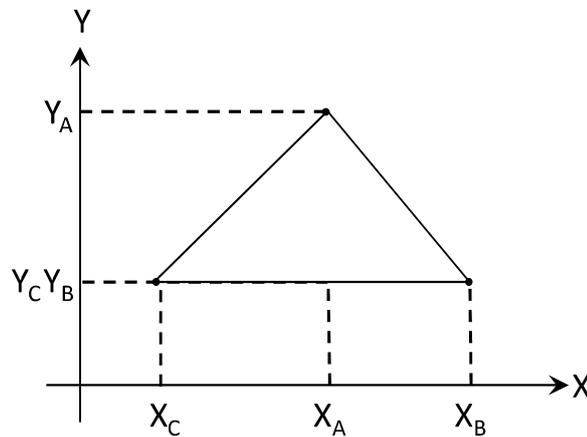
– A) representam a medição de qualquer perfil a partir da definição da tara. O valor de $\Delta\theta$, definido por incremento, representa o valor estabelecido na lógica do *Labview* para o deslocamento angular e cálculo das áreas dos múltiplos triângulos que podem ser formados a partir da figura geométrica A, B, C, D. Considera-se que o incremento angular é constante para todos os pontos na sequência, de forma que:

$$\sin(\theta_{n+1}) = \sin(\theta_n + \Delta\theta), \quad \Delta\theta \text{ é constante} \quad (7)$$

A

Figura 28, representa um triângulo qualquer inserido no plano cartesiano.

Figura 28 – Triângulo representado no plano cartesiano.



Fonte: Autor, 2023.

Sabe-se que o cálculo da área delimitada pelo triângulo formado por estes três pontos, é:

$$A = \frac{|D|}{2} \quad (8)$$

Onde $|D|$ é o módulo do determinante das coordenadas do triângulo ABC.

Montando a determinante para resolução tem-se:

$$D = \begin{vmatrix} A_X & A_Y & 1 & A_X & A_Y \\ B_X & B_Y & 1 & B_X & B_Y \\ C_X & C_Y & 1 & C_X & C_Y \end{vmatrix} \quad (9)$$

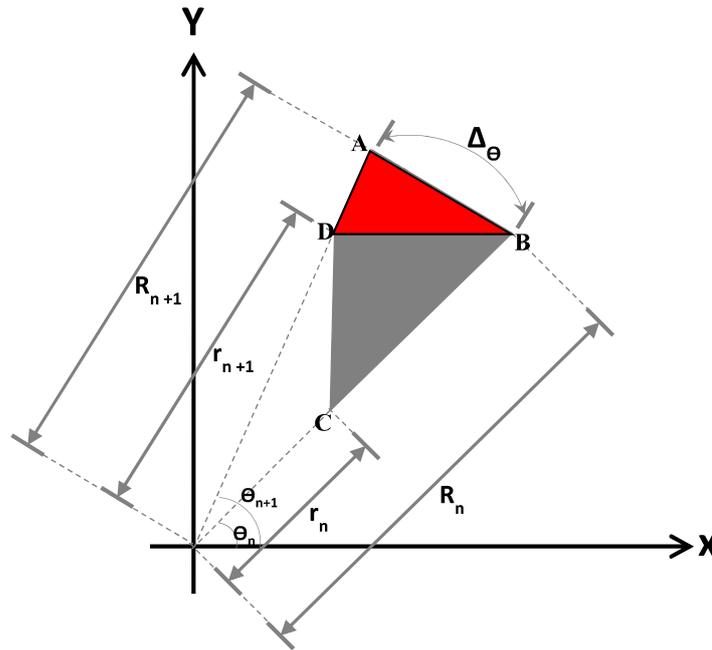
$$\hat{Área} = \frac{|A_X B_Y + A_Y C_X + B_X C_Y - (B_Y C_X + A_X C_Y + A_Y B_X)|}{2} \quad (10)$$

Colocando-se os termos em evidências têm-se:

$$\hat{Area} = \frac{|A_x(B_y - C_y) + B_x(C_y - A_y) + C_x(A_y - B_y)|}{2} \quad (11)$$

Assim, para calcular-se a área do quadrilátero A, B, C, D, representado na Figura 29, calcula-se primeiro a área do triângulo formado pelos pontos A, B e D, ou A_1 conforme sinalizado na Figura 29.

Figura 29 – Definição para cálculo da área do triângulo A, B, D.



Fonte: Autor, 2023.

Calculando-se sua área com a fórmula inicialmente apresentada, tem-se:

$$A_1 = \frac{|A_x(B_y - D_y) + B_x(D_y - A_y) + D_x(A_y - B_y)|}{2} \quad (12)$$

$$A_1 = \frac{|R_{n+1} \cos \theta_{n+1} (R_n \sin \theta_n - r_{n+1} \sin \theta_{n+1}) + R_n \cos \theta_n (r_{n+1} \sin \theta_{n+1} - R_{n+1} \sin \theta_{n+1}) + r_{n+1} \cos \theta_{n+1} (R_{n+1} \sin \theta_{n+1} - R_n \sin \theta_n)|}{2} \quad (13)$$

$$A_1 = \frac{|R_n R_{n+1} (\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1}) - r_{n+1} R_{n+1} (\text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_{n+1}) + R_n r_{n+1} (\text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n) - R_n R_{n+1} (\text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n) + r_{n+1} R_{n+1} (\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1}) - R_n r_{n+1} (\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1})|}{2} \quad (14)$$

Simplificando a equação:

$$A_1 = \frac{|R_n R_{n+1} (\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1}) + R_n r_{n+1} (\text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n) - R_n R_{n+1} (\text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n) - R_n r_{n+1} (\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1})|}{2} \quad (15)$$

Colocando-se termos comum em evidência:

$$A_1 = \frac{|R_n R_{n+1} (\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1} - \text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n) - R_n r_{n+1} (-\text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n + \text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1})|}{2} \quad (16)$$

$$A_1 = \frac{|(R_n R_{n+1} - R_n r_{n+1})(\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1} - \text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n)|}{2} \quad (17)$$

Valendo-se da identidade trigonométrica:

$$\text{sen}(a \pm b) = \text{sen}(a) \cos(b) \pm \cos(a) \text{sen}(b) \quad (18)$$

Tem-se:

$$(\text{sen} \theta_n \cos \theta_{n+1} - \text{sen} \theta_{n+1} \cos \theta_n) = \text{sen}(\theta_n - \theta_{n+1}) = \text{sen} \Delta \theta \quad (19)$$

Dessa forma:

$$A_1 = \frac{(\text{sen} \Delta \theta)}{2} |(R_n R_{n+1} - R_n r_{n+1})| \quad (20)$$

Uma vez obtida a área do triângulo delimitado pelos pontos A, B, D, é possível então deduzir a área do triângulo B, C e D (A_2), de forma análoga, obtendo-se:

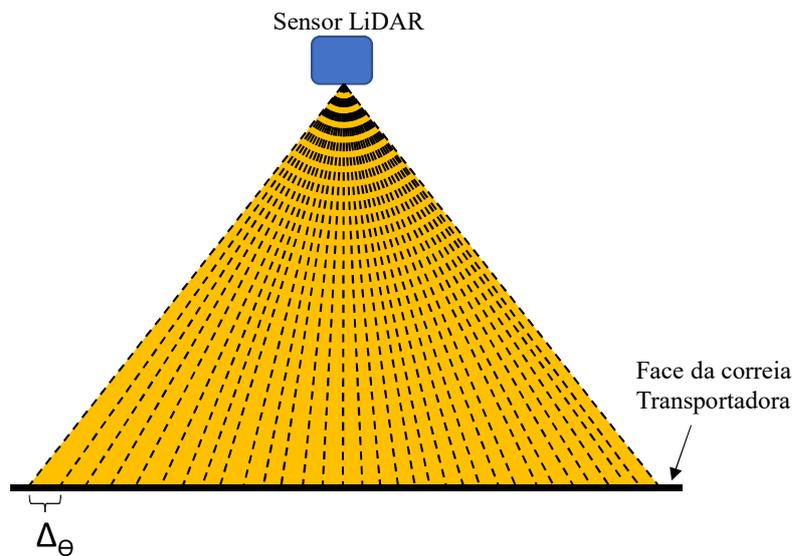
$$A_2 = \frac{(\text{sen}\Delta\theta)}{2} |(R_n r_{n+1} - r_n r_{n+1})| \quad (21)$$

Assim, a área do quadrilátero (A) é obtida por meio da soma das áreas dos triângulos. O conteúdo dos módulos nas equações A1 e A2 pode ser somado.

$$A = \frac{(\text{sen}\Delta\theta)}{2} |(R_n R_{n+1} - r_n r_{n+1})| \quad (22)$$

Considerando a teoria anterior, a Figura 30, representa o comportamento do incremento de ângulo para o cálculo da área. De acordo com o valor do incremento de ângulo $\Delta\theta$, formam-se múltiplos triângulos em relação a face do sensor e da face da correia.

Figura 30 - Influência do incremento de ângulo no cálculo da área.



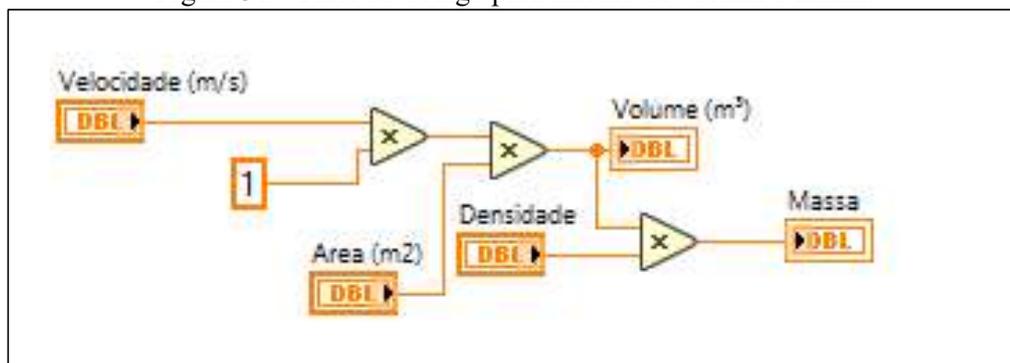
Fonte: Autor, 2023.

3.5 ESTRUTURAÇÃO DO CÓDIGO NO *LABVIEW*

No *Labview* o programa foi dividido em diretórios para armazenamento das *Vi's* (*virtual instrumentation*). Parte das *Vi's* fazem parte da estrutura de diretórios do RT IC-3120 Target, que consiste no modelo de *hardware* que recebeu a configuração do projeto. Parte da programação em *Labview* está ilustrada no apêndice A.

A Figura 31, detalha a parte do código para cálculo do volume e massa. As principais entradas são velocidade (6,42 m/s), o cálculo da área e densidade. Os parâmetros de velocidade e densidade foram fixados.

Figura 31 – Parte do código para cálculo do volume e massa.



Fonte: Autor, 2023.

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS PRELIMINARES

A Figura 32 mostra a bancada de testes, com sensor LiDAR (R2000) instalado ao alto fazendo a leitura da superfície. Ao lado, o notebook auxiliou na parametrização e coleta das primeiras leituras.

Figura 32 – Sensor LiDAR posicionado para leitura da superfície da bancada.



Fonte: Autor, 2022.

Na sequência, o sensor LiDAR foi testado em duas caixas, uma menor dentro de uma maior. A caixa maior foi utilizada como delimitação de uma área conhecida e como tara da medição. A Figura 33, ilustra o momento que a caixa maior de tara foi colocada na região de leitura do sensor LiDAR.

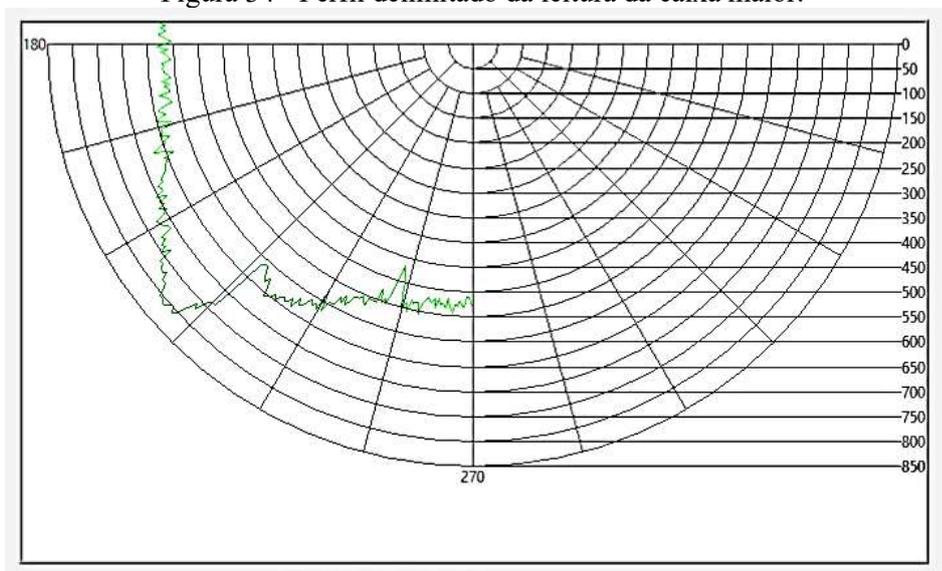
Figura 33 – Caixa maior posicionada para cálculo da tara do sistema.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 34, ilustra a curva em verde que representa pelo perfil da superfície da caixa maior de tara.

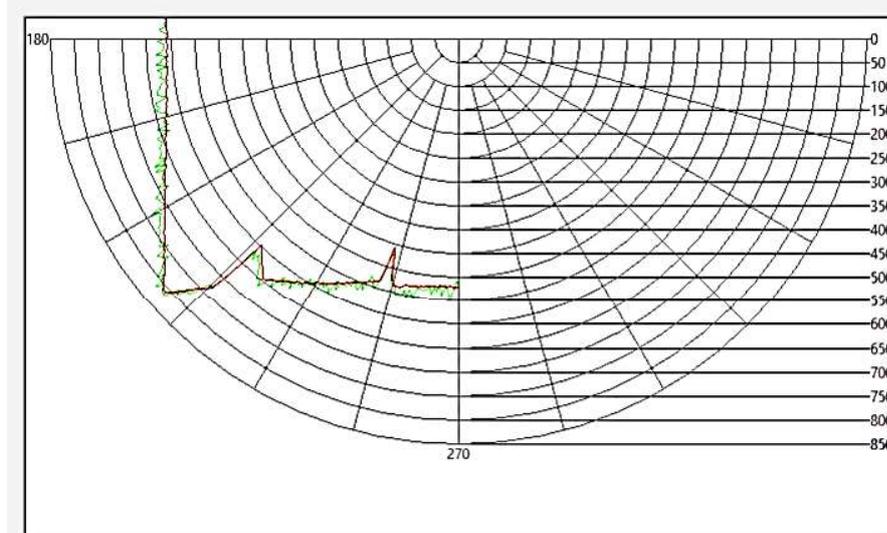
Figura 34 - Perfil delimitado da leitura da caixa maior.



Fonte: Autor, 2022.

Após o posicionamento da caixa maior de tara e estabilização das medições foi executado o comando de tara. A Figura 35, ilustra por meio da curva em vermelho o momento que foi definido a tara do sistema.

Figura 35 – Perfil calculado (vermelho) da tara com base no perfil medido da caixa maior (em verde).



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 36, ilustra o posicionamento da caixa maior, de tara e dentro dessa, a caixa menor que se deseja medir.

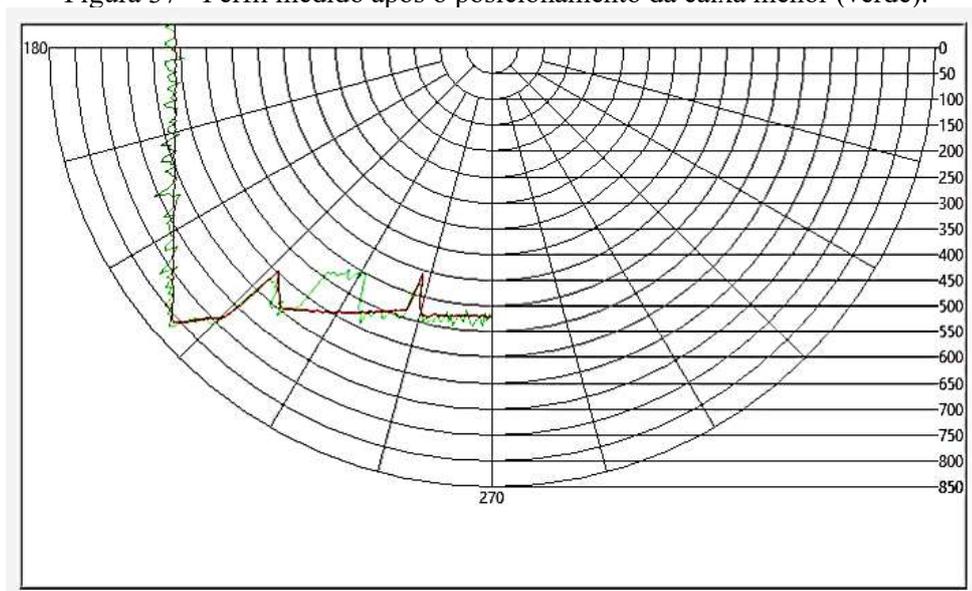
Figura 36 – Posicionamento para leitura do perfil da caixa menor.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 37, ilustra o perfil medido da caixa menor após posicionada dentro da caixa maior.

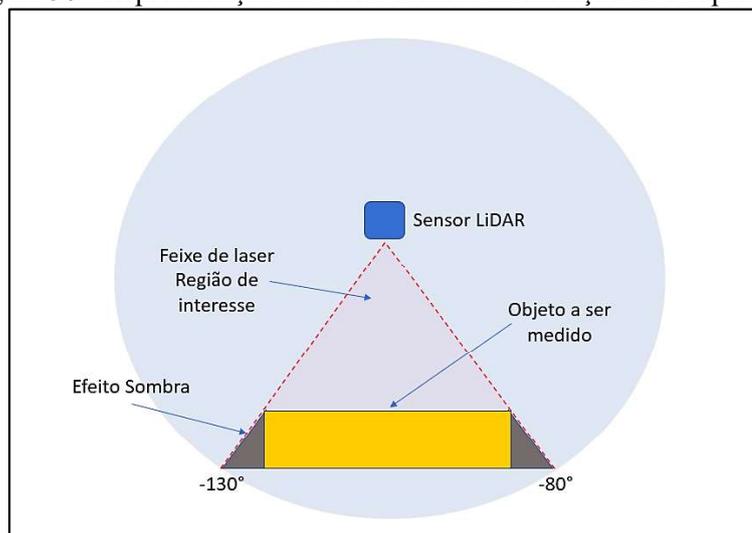
Figura 37 - Perfil medido após o posicionamento da caixa menor (verde).



Fonte: Autor, 2022.

Durante a leitura da caixa menor, foi percebido que se formavam sombras que deixavam indefinidas as bordas da caixa. A Figura 38, ilustra o efeito sombra na medição de perfil do objeto.

Figura 38 - Representação do efeito sombra na medição de e superfície.



Fonte: Autor, 2023.

Após a instalação do sensor em campo, esse efeito de sombra não foi percebido durante as medições reais do volume de minérios. Apesar de percebida em laboratório, essa particularidade não ocorreu na instalação final.

4.2 RESULTADOS PRÁTICOS APÓS INSTALAÇÃO EM CAMPO

A conclusão das instalações em campo permitiu a energização do sensor, configuração de parâmetros de rede, testes de funcionamento. Toda a etapa de integração seguiu rigorosamente as janelas de paradas de manutenção da planta o que permitiu a configuração e testes iniciais reduzindo os riscos de impactos no sistema de automação da planta e na produção.

Para comparação dos valores calculados de massa, foram consideradas as balanças TC7002WI1 e TC7005WI1 como referências padrão para calibração. De acordo com os relatórios de manutenção e calibração, essas balanças são aferidas e calibradas periodicamente.

A Figura 39, apresenta o relatório de calibração uma dessas balanças.

Figura 39 – Relatório do resultado de calibração das balanças.

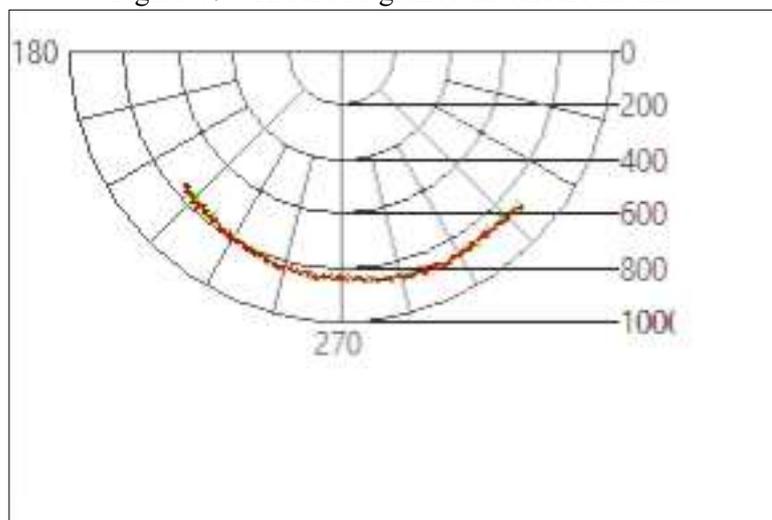
Relatório de Calibração Balança Integradora - Dosadora			
Anexo 01 - PRO-020605, Rev.: 06 – 15/06/2022			
DADOS DO INSTRUMENTOS			
TAG do Equipamento CE-WIT7005.01	Limite de Erro Permissível + / - 2%	Motivo da Manutenção Preventiva	Número O.M. 202301513631
Calibração preliminar			
Totalização indicada (T/h) 1219,00	Totalização Calculada (T/h) 1203,00	Erro % 1,33%	
AVALIAÇÃO			
Critério de Aprovação = Erro aceitável	+ / - 2%	Verificar critérios definidos na EPS 000199 - Instrumentos Críticos para Medição e Monitoramento Beneficiamento de Minério Complexo Itabira.	
Resultado da Validação:		<input checked="" type="radio"/> Aprovado	<input type="radio"/> Reprovado
PADRÕES UTILIZADOS			
TAG-SQ CE-MCO00001*	TAG-SQ CE-CRO00001*	TAG-SQ CE-MAE7005A	TAG-SQ
OBSERVAÇÕES			
Responsável/Matricula:	RENAN ARAUJO MACIEIRA - 01709659	Data:	05/05/2023
Página 01 de 01			

Fonte: Autor, 2023

Conforme se observa no relatório, o erro de calibração foi de 1,33%, ficando dentro da margem tolerância permitida que é de 2%. Conclui-se que as balanças do pátio passam por manutenções periódicas e fazem medições confiáveis.

Em seguida, iniciou-se a configuração do sensor LiDAR. A Figura 40, mostra o perfil de medição da correia vazia obtida do sensor LiDAR instalado sobre a correia do transportador TC7027, conseguido após executar o comando para cálculo da tara.

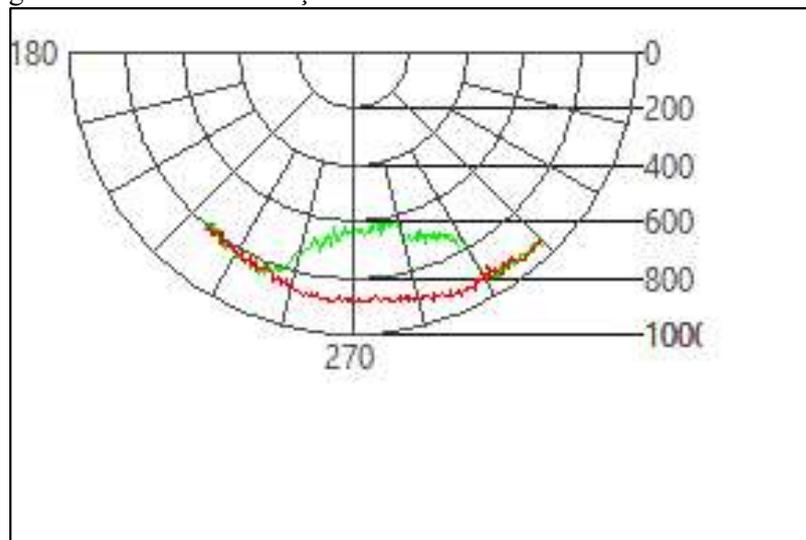
Figura 40 – Resultado gráfico do cálculo da tara.



Fonte: Autor, 2023.

Em vermelho tem-se o traço do perfil da tara medido sobre a correia do transportador. Uma vez definida a tara, qualquer perfil medido sobre a correia, representa o volume percebido pelo sensor LiDAR. A Figura 41, demonstra a medição de volume de minério (verde) sobre o transportador.

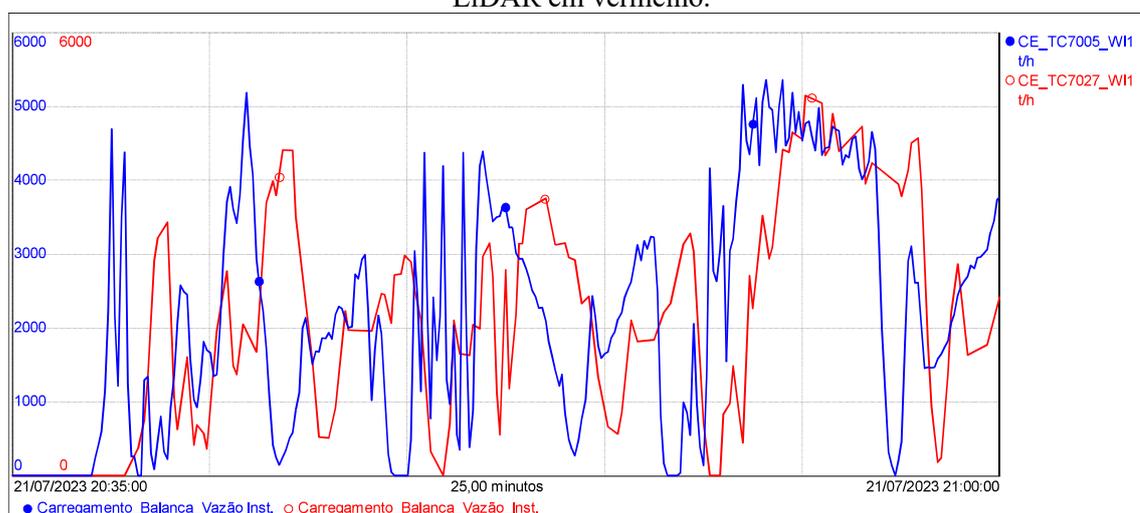
Figura 41 – Perfis de medição: Tara em vermelho e do volume em verde.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 42, mostra o sinal coletado via PIMS da medição de massa calculada a partir do tratamento via lógica *LabView* e o sinal de massa coletado da balança integradora (TC7005WI1) presente à montante da instalação do sensor LiDAR.

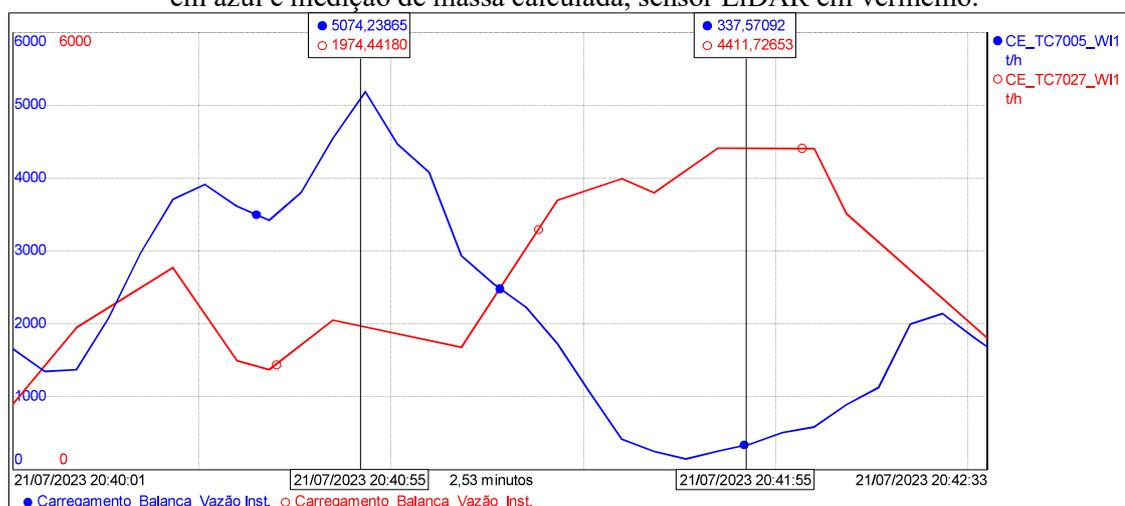
Figura 42 - Medição de massa, balança integradora em azul e medição de massa calculada, sensor LiDAR em vermelho.



Fonte: Autor, 2023.

Em azul tem-se o valor medido da massa pela balança integradora (mecânica) do circuito. Em vermelho tem-se a medição calculada via leitura de volume da superfície da correia cheia coletada pelo sensor LiDAR. As duas variáveis descrevem o mesmo comportamento na linha do tempo. Conforme se observa, há um intervalo de medição, ou seja, um tempo morto, entre os sensores, de aproximadamente sessenta (60) segundos. Esse tempo morto está relacionado às distâncias entre os pontos de instalação da balança integradora e o sensor LiDAR e as velocidades das correias. Na Figura 43, tem-se em destaque em azul o pico do sinal ocorreu em 20:40:55 na balança e em vermelho o pico de sinal semelhante ocorrido em 20:41:55 no LiDAR.

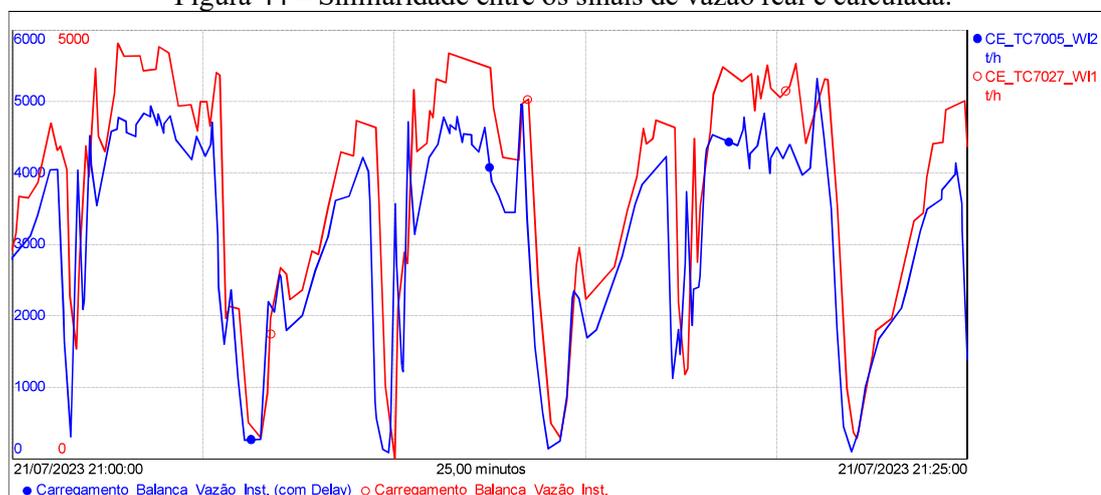
Figura 43 - Sinais com defasagem de acordo com a instalação. Medição de massa, balança integradora em azul e medição de massa calculada, sensor LiDAR em vermelho.



Fonte: Autor, 2023.

Para facilitar a análise, foi suprimido o valor de defasagem entre os sinais. A Figura 44, mostra o comportamento da medição das vazões na mesma base tempo, com defasagem entre os sinais próximos de zero.

Figura 44 – Similaridade entre os sinais de vazão real e calculada.



Fonte: Autor, 2023.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Nesta etapa do trabalho, será feita uma análise estatística para avaliar o desempenho do sensor LiDAR para a totalização da massa de minério, comparando-o com as balanças atualmente utilizadas no processo. Essa análise foi realizada utilizando a linguagem R.

4.3.1 Dados

Como base de comparação, foram utilizados os dados de totalização de massa coletados das balanças provenientes dos circuitos de carregamentos. Cada linha representa a totalização de produção carregada por lote. Cada lote é composto por 85 vagões, cada vagão comporta em média 85 toneladas de minérios. Com auxílio de uma planilha e integração ao sistema PIMS, calculou-se massa total expedida pelo circuito das balanças físicas e a totalização calculada pelo sistema LiDAR.

A Tabela 2, apresenta os valores totalizados em cada lote de carregamento.

Tabela 2 – Cálculo de totalização de massa:

Amostras	Balança TC7002	Balança TC7005	Balança TR1470CN12	Σ Totalização Balanças	Totalização LiDAR
1	6333	0	5993	12326	12288
2	3252	0	3154	6406	6272
3	2825	0	3122	5947	5952
4	-	1603	0	1603	1600
5	4606	1178	4198	9982	9984
6	3718	0	2371	6089	6208
7	6258	0	0	6258	6080
8	4501	0	2518	7019	7040
9	5785	0	1105	6890	6848
10	6199	0	0	6199	6272
11	5419	0	0	5419	5504
12	12596	0	0	12596	12864
13	1962	0	712	2674	2624
14	4589	0	1990	6579	6592
15	2960	0	1607	4567	4544
16	4623	0	2150	6773	6784
17	2960	0	1607	4567	4544
18	4719	0	2037	6756	6720
19	3080	0	0	3080	3072
20	0	6659	0	6659	6656
21	0	6972	0	6972	6976
22	0	6669	0	6669	6648
23	0	7040	0	7040	7104
24	0	7697	0	7697	7808
25	0	2052	522	2574	2560

Tabela 2 – Cálculo de totalização de massa (continua):

Amostras	Balança TC7002	Balança TC7005	Balança TR1470CN12	Σ Totalização Balanças	Totalização LiDAR
26	0	4202	582	4784	4800
27	0	4441	3012	7453	7680
28	0	3559	0	3559	3520
29	0	10883	3961	14844	15104
30	0	5671	2177	7848	7936
31	0	7324	4020	11344	11520
32	3476	0	3076	6552	6336
33	1272	2825	0	4097	4032
34	327	3835	2922	7084	7040
35	0	2153	1319	3472	3520
36	0	5413	0	5413	5376
37	6447	0	6331	12778	12480
38	5690	0	891	6581	6720
39	3046	0	3683	6729	6592
40	3960	0	2892	6852	6656
41	3147	0	3181	6328	6336
42	4008	0	2257	6265	6080

Fonte: Autor, 2023

4.3.2 Definição dos parâmetros do teste

Para o teste estatístico buscou-se responder à seguinte pergunta: Na média, a totalização da massa de minério, via sensor LiDAR, é igual à totalização original feita pelas balanças de correia?

Visando responder à essa questão, foram levantadas duas hipóteses ligadas ao valor médio das medidas levantadas com os dois métodos de totalização de massa de minério:

$$\rightarrow H_0: \mu_{LiDAR} = \mu_{Original}$$

$$\rightarrow H_1: \mu_{LiDAR} \neq \mu_{Original}$$

Onde H_0 é a hipótese nula, H_1 é a hipótese alternativa, μ_{LiDAR} (ou μ_2) é a média das amostras de totalização obtidas com o sensor LiDAR e $\mu_{Original}$ (ou μ_1) a totalização obtida da soma das medidas feitas pelas balanças de correia já em uso. Devido ao fato de o presente teste de hipótese não contar com o conhecimento das variâncias das medidas das duas formas de totalização de massa (LiDAR e Original), optou-se por utilizar o teste t de Student. Esse teste

segue a premissa de que a amostra possui distribuição normal, que as amostras são independentes e que as variâncias das medições pelos dois métodos são iguais. Os parâmetros necessários para a realização do teste *t* de *Student* são: nível de significância (α), o nível de potência ($1 - \beta$) e o tipo de teste de hipótese (unilateral/bilateral).

O nível de significância é a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. Foi adotado o valor de ($\alpha=0,05$) pois, é o valor padrão adotado na literatura. Esse α garante também um nível de confiança no teste de 95% ($1-\alpha$). O nível de potência ($1 - \beta$) quantifica a sensibilidade do teste de hipótese a efeitos que violam a hipótese nula. Os autores optaram por utilizar um nível de potência de 85%.

Uma vez que as amostras foram extraídas por métodos diferentes (sensor LiDAR e balanças de correia) porém, da mesma massa de minério que estava passando na correia em um determinado período, e, além disso, por se desejar comparar as médias das medidas, será feito o teste *t de Student* do tipo bilateral.

4.3.3 Verificação das premissas do teste

Antes de iniciar o teste de hipótese, foram verificadas as premissas de normalidade, igualdade das variâncias e independência das amostras, que são necessárias para validar o teste *t de Student*.

4.3.4 Teste de normalidade dos resíduos

A premissa de normalidade do teste *t* de Student foi validada para a presente amostra usando o teste de Shapiro-Wilk. A estatística do teste de Shapiro-Wilk (*W*) determina a possibilidade de se rejeitar ou não a hipótese nula. Se *W* for menor que um valor tabelado (W_α) de acordo com o número de amostras e o nível de significância (optou-se por usar 0,05), rejeita-se a hipótese nula do teste de Shapiro-Wilk. Essa hipótese nula afirma que a amostra provém de uma população Normal.

Executando o teste no *software* R (o qual é feito sobre os resíduos das amostras), obteve-se um p-valor muito inferior ao nível de significância adotado, levando à conclusão da não normalidade da distribuição dos resíduos (um total de 84 amostras). A Figura 45 seguir ilustra o teste realizado.

Figura 45 – Parte do código e resultados.

```

> n1<-length(dados$Original)
+ n2<-length(dados$LiDAR)
> vetor<-c(rep(n1, x = mean(dados$Original)), rep(n2, x = mean(dados$LiDAR)))
> resid <- c(dados$Original, dados$LiDAR) - vetor
+ shapiro.test(resid)

Shapiro-Wilk normality test

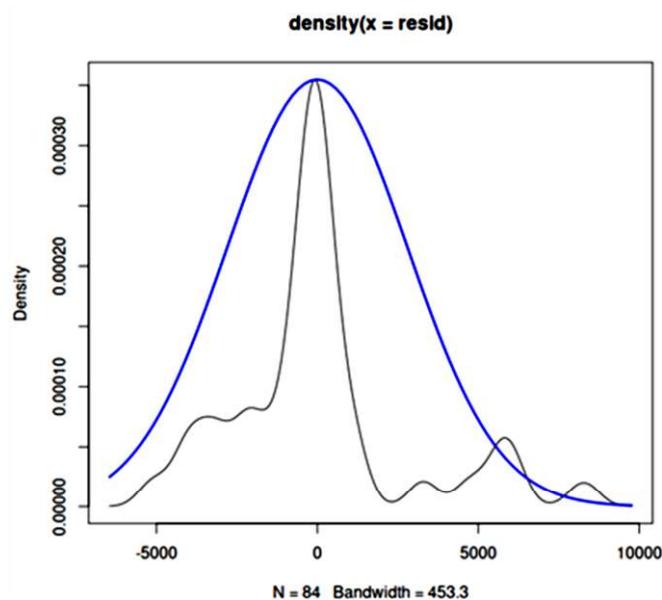
data: resid
W = 0.88764, p-value = 2.365e-06

```

Fonte: Autor, 2023.

Observando a distribuição dos resíduos (calculados pela diferença de cada amostra da média, para cada população), constata-se uma cauda à direita, justificando o resultado obtido no teste. A Figura 46, a seguir ilustra a distribuição dos resíduos em linha contínua preta e em azul a distribuição normal esperada.

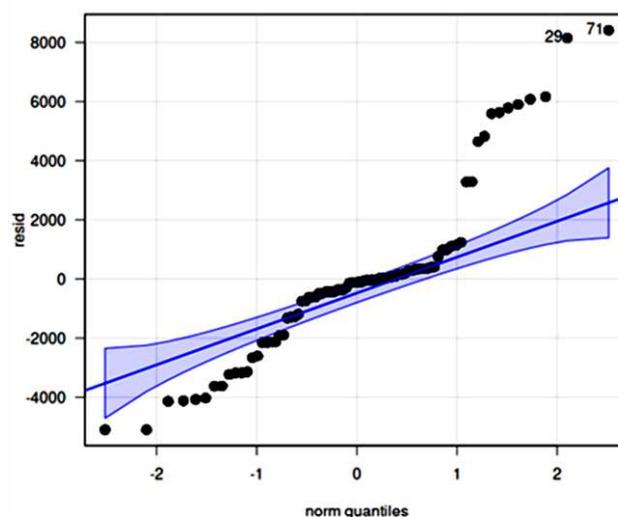
Figura 46 - Distribuição dos resíduos em linha contínua preta e em azul a distribuição normal esperada.



Fonte: Autor, 2023.

Isso sugere a existência de *outliers* que também podem ser visualizados no *quantile-quantile plot (Q-Q plot)* ilustrado na Figura 47 a seguir.

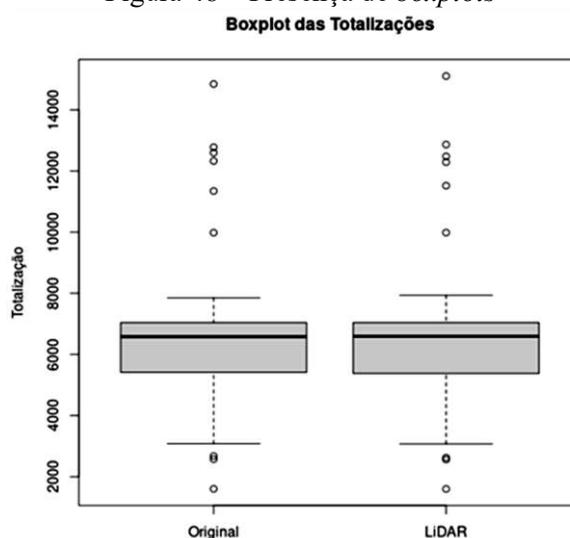
Figura 47 - Existência de outliers no *quantile-quantile*.



Fonte: Autor, 2023.

Esse gráfico traça a correlação entre as amostras e a distribuição normal. Uma linha de referência de 45 graus também é traçada. Observa-se que muitos pontos ficam distantes da linha de referência. Os *boxplots* das amostras evidenciam a existência de *outliers* que podem ser a causa da distribuição não normal encontrada. Os *boxplots* podem ser observados na Figura 48.

Figura 48 – Presença de *boxplots*



Fonte: Autor, 2023.

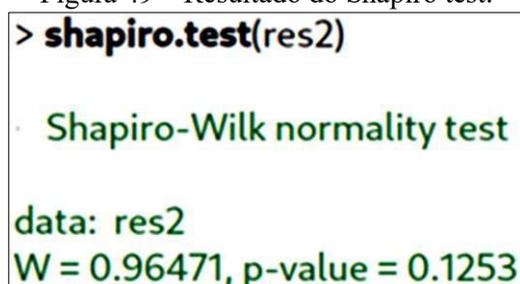
Explicando a razão da existência de *outliers*, esses se dão devido as características de algumas amostras presente na tabela 2, marcadas em letra vermelha. Durante o processo de coleta das amostras, a totalização de alguns carregamentos extrapolou em relação à média da maioria das demais amostras. A razão é explicada devido ao período de coleta de algumas amostras, ou seja, duração do carregamento, ser maior que a maioria das demais, como por exemplo, as

amostras em destaque, nas células hachuradas 1, 12, 15 e 31 tiveram valores maiores de totalização. Por outro lado, outras amostras já tiveram totalização bem inferior à média, as quais foram consideradas também como *outliers*. Como exemplo, citam-se as amostras, nas células hachuradas 4, 13, 19 e 25.

Apesar de serem considerados outliers para o teste aplicado, cada uma das 42 amostras da tabela 2, mantiveram uma diferença menor que 2 %, se comparado a cada uma das amostras da medição das balanças físicas.

Realizando a retirada dos *outliers* com o auxílio dos *boxplots*, sobram 52 amostras cujo resíduo agora apresenta distribuição normal. Isso é confirmado pelo novo teste de Shapiro-Wilk ilustrado na Figura 49.

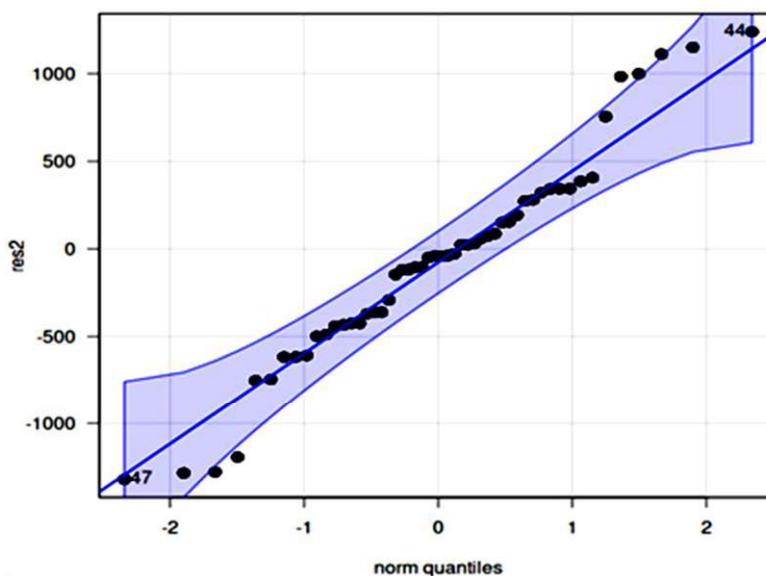
Figura 49 – Resultado do Shapiro test.



Fonte: Autor, 2023.

No Q-Q plot da Figura 50, observa-se que a maioria dos pontos ficam dentro da região limite da normalidade.

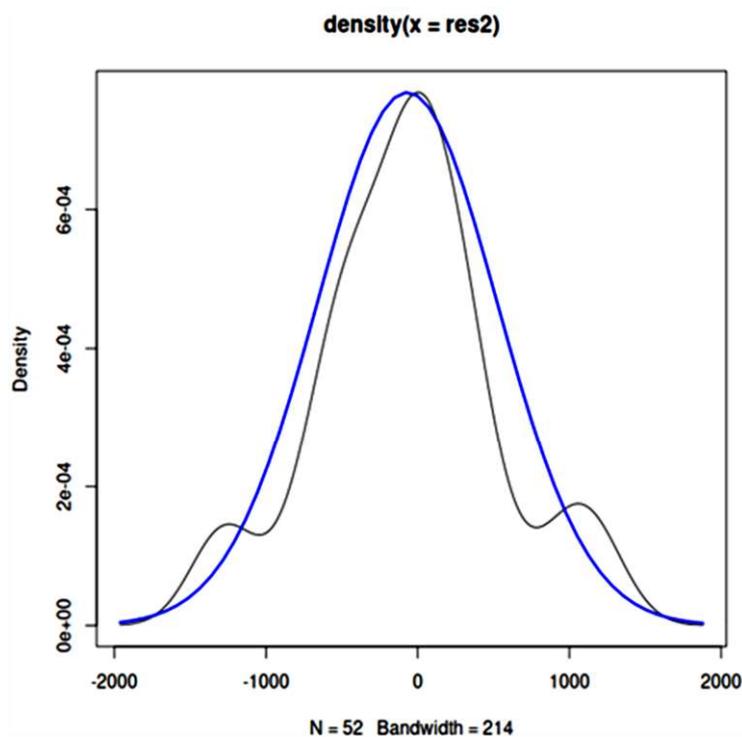
Figura 50 – Distribuição do teste de Shapiro.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 51 ilustra a nova distribuição dos resíduos em linha contínua preta e a distribuição normal desejada em azul.

Figura 51 – Distribuição dos resíduos em linha contínua preta e a distribuição normal desejada em linha contínua azul.



Fonte: Autor, 2023.

De acordo com a tabela disponível em Hanusz e Tarasinska (2011), o valor de W para 52 amostras (26 para cada sistema de totalização de massa) e nível de significância 0,05 é de 0.9559. Como o valor de W obtido (0,9647) é maior do que o tabelado, e o p -valor (0,1253) é maior que o nível de significância escolhido, não há evidências para a rejeição da hipótese nula, portanto, assume-se que a amostra provém de uma população normal. Adicionalmente, sendo mais conservador e considerando-se um nível de significância de $\alpha = 0.10$, o W tabelado de 0.9626 ainda seria inferior ao obtido e o p -valor também continuará superior, então, não se pode refutar a hipótese nula do teste, logo as amostras provêm de uma população Normal.

4.3.5 Teste de independência das amostras

Assumiu-se que as amostras são independentes entre si. Tal afirmação baseou-se no fato de que as amostras foram tomadas, sem repetição, de 26 totalizações diferentes da massa de minério. Além disso, realizou-se o teste de Durbin-Watson. A hipótese nula desse teste afirma

que a autocorrelação dos resíduos dos dados (feito para cada conjunto de amostras) é zero. O trecho de código obtido no R, ilustrado na Figura 52 a seguir, mostra o resultado do teste.

Figura 52 – Parte código R e resultado do teste.

```
> dwtest(dados$Original~1, data=dados)

      Durbin-Watson test

data: dados$Original ~ 1
DW = 2.2983, p-value = 0.8362
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0

>
> dwtest(dados$LiDAR~1, data=dados)

      Durbin-Watson test

data: dados$LiDAR ~ 1
DW = 2.3023, p-value = 0.8394
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0
```

Fonte: Autor, 2023.

O p-valor alto obtido após o teste (muito maior que o nível de significância $\alpha = 0.02$ adotado nas análises deste trabalho) sugere que não há indícios para a rejeição da hipótese nula do teste de Durbin-Watson, ou seja, sugere que os resíduos dos dados podem ter autocorrelação serial zero. Para os dados da totalização Original o p-valor foi de 0.8362 e para a totalização via LiDAR o p-valor foi 0.8394. Dessa forma, conclui-se pela independência dos dados utilizados na análise do presente estudo.

4.3.6 Teste de igualdade de variâncias dos resíduos

Para que se realize das hipóteses corretamente é necessário verificar a igualdade ou não das variâncias dos resíduos das populações. Para auxiliar, realizou-se o teste F. A hipótese nula deste teste afirma que a razão entre as variâncias dos resíduos das populações é igual a 1, ou seja, as variâncias são iguais. A Figura 53 ilustra o resultado do teste executado em R.

Figura 53 – Resultados do teste R

```
> F=var.test(OrigLimpo, LiDARLimpo, conf.level=1-alpha, alternative="two.sided")
> F

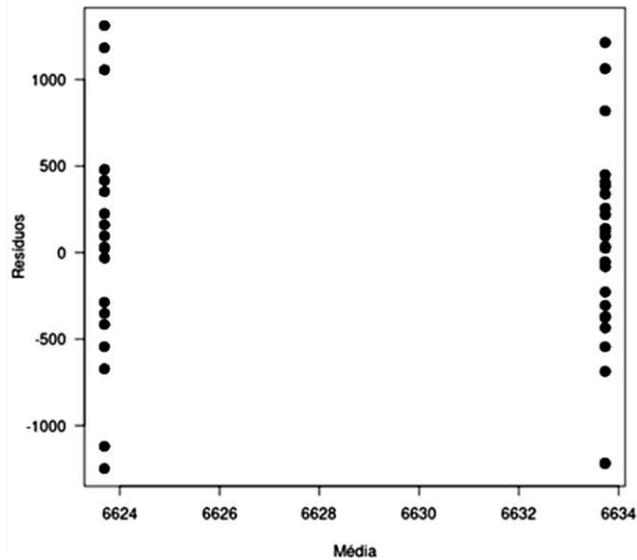
      F test to compare two variances

data: OrigLimpo and LiDARLimpo
F = 0.88858, num df = 25, denom df = 25, p-value = 0.77
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.3984105 1.9817925
sample estimates:
ratio of variances
 0.8885758
```

Fonte: Autor, 2023.

Como a estimativa do teste F (0.8885758) está dentro do intervalo (0.3984105, 1.9817925) com 95% de confiança, pode-se afirmar que a hipótese nula do teste F não pode ser rejeitada e, portanto, as variâncias das populações podem ser consideradas iguais entre si. O p-valor de 0.77 também confirma a hipótese nula. Graficamente essa semelhança entre as variâncias dos resíduos pode ser observada na Figura 54. Observa-se que os resíduos apresentam um comportamento similar para as duas amostras. Os resultados se encontram ao lado esquerdo e direito da figura.

Figura 54 – Gráfico de semelhança entre as variâncias dos resíduos.



Fonte: Autor, 2023.

Como a variância do processo de medição é desconhecida (porém similar para os dois métodos de totalização), pode-se calcular essa variância por meio da fórmula do Estimador Agrupado de Variância (S_p^2):

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (23)$$

Em que n_1 é a quantidade de amostras da totalização feita pelas balanças originais e S_1^2 sua variância, e n_2 a quantidade de amostras da totalização feita pelo LiDAR e S_2^2 sua variância. Com isso, o teste t bilateral agrupado é dado pela equação:

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{S_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (23)$$

Em que o valor esperado da diferença de médias das amostras é $E(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = (\mu_1 - \mu_2)$.

O termo $(\mu_1 - \mu_2)$ que será chamado aqui de μ_D , valerá 0 (zero) nas hipóteses nulas adotadas nesse trabalho uma vez que tais hipóteses afirmam sobre a igualdade das médias das técnicas de totalização de massa de minério analisadas, parâmetro μ no teste-t bilateral descrito a seguir.

4.3.7 Teste de hipótese

A seguir apresenta-se os testes de hipóteses: Teste-t bilateral e teste de Wilcoxon-Mann-Whitney.

4.3.7.1 Teste-t bilateral

Finalmente executando o teste t bilateral no R com os dados remanescentes, após a retirada dos *outliers*, tem-se o resultado da Figura 55 a seguir. Sobraram 26 amostras para cada método de totalização de massa. Por ser um teste bilateral agrupado, perdem-se dois graus de liberdade (df). Assim, considerando o $n=52$, tem-se um $df=50$. Calculando a estatística t tabelada para esse caso tem-se o exposto na Figura 55.

Figura 55 – Resultado do teste t-bilateral.

```
> teste<-t.test(LiDARLimp0,OrigLimp0, alternative="two.sided", mu=0, var.equal=T, conf.level=1-alpha)
>
> teste

      Two Sample t-test

data:  LiDARLimp0 and OrigLimp0
t = -0.060486, df = 50, p-value = 0.952
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -343.3830  323.3061
sample estimates:
mean of x mean of y
 6623.692  6633.731

>
> t_tabelado_bi <- qt(alpha/2, n1 + n2 - 2)
> t_tabelado_bi
[1] -2.008559
```

Fonte: Autor, 2023.

Pela tabela da distribuição *t de Student* bilateral, tem-se que $t_{0.025;50} = -2.008559$. Comparando o valor calculado de $t_0 = -0.060486$, disponível no resultado da Figura 55, retornado pela função *t.test*, com o valor tabelado, tem-se que $t_0 > t_{0.025;50}$, de forma que se pode concluir que a evidência é insuficiente para se rejeitar a hipótese nula no teste bilateral. Além disso, o

valor p-valor encontrado (0.952) foi maior que o nível de significância adotado nessa análise levando a concluir também pela não rejeição da hipótese nula ($p\text{-valor} > \alpha$). Com esse teste t bilateral, conclui-se, portanto, que, na média, as totalizações de massa de minério feitas pelo sensor LiDAR são similares às feitas pelas balanças de correia atualmente instaladas com 95% de confiança. A potência do teste foi calculada para a quantidade de amostras disponíveis (em cada conjunto de dados comparado) que foi de 26. O teste e o resultado estão ilustrados na figura a seguir. A potência estatística de um teste de hipóteses binário é a probabilidade de que o teste rejeite corretamente a hipótese nula (H_0) quando uma hipótese alternativa (H_1) é verdadeira (também conhecido como erro tipo II). Considerando o desvio padrão do conjunto de dados das balanças originais. A potência obtida foi de aproximadamente 94%, superando o valor desejado mínimo de 85%. A Figura 56, a seguir ilustra o teste realizado.

Figura 56 – Resultado da potência do teste para as 26 amostras.

```
> s <- sd(OrigLimpo)
> calc2<-power.t.test(delta=s, sd=s, sig.level=0.05, n=26, type="two.sample",alternative="two.sided")
> calc2

Two-sample t test power calculation

      n = 26
  delta = 580.4643
      sd = 580.4643
sig.level = 0.05
  power = 0.9424303
alternative = two.sided

NOTE: n is number in *each* group
```

Fonte: Autor, 2023.

4.3.7.2 Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney

Trata-se de um teste não-paramétrico para dados que não apresentam distribuição Normal. Sem realizar a limpeza dos *outliers*, a distribuição dos resíduos não é Normal, de modo que o teste de Shapiro-Wilk falha. Assim, a realização do teste-t não é válida. No teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, testa-se a H_0 de que os dois conjuntos de amostras pertencem a uma mesma população ao analisar se a distribuição dos dados é similar, independentemente de esta ser Normal ou não. Uma outra interpretação comum desse teste é que ele analisa se os conjuntos de dados possuem a mesma mediana. Realizando o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para a totalidade das amostras (42 para cada grupo testado: LiDAR e Original), tem-se o resultado ilustrado na Figura 57 a seguir.

Figura 57 – Resultado do teste das 42 amostras.

```
> testeWilcox <- wilcox.test(dados$Original, dados$LiDAR, correct = FALSE, paired=FALSE, alternative = "two.sided")
> testeWilcox

Wilcoxon rank sum test

data: dados$Original and dados$LiDAR
W = 894, p-value = 0.9145
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

Fonte: Autor, 2023.

Conclui-se que não há evidências para rejeitar H_0 pois o p-valor= 0.9145 é maior que o nível de significância de 0.05, ou seja, as duas amostras pertencem a mesma população. Outra interpretação é que a distribuição dos dados é similar, com ela mediana, a um nível de significância de 5%.

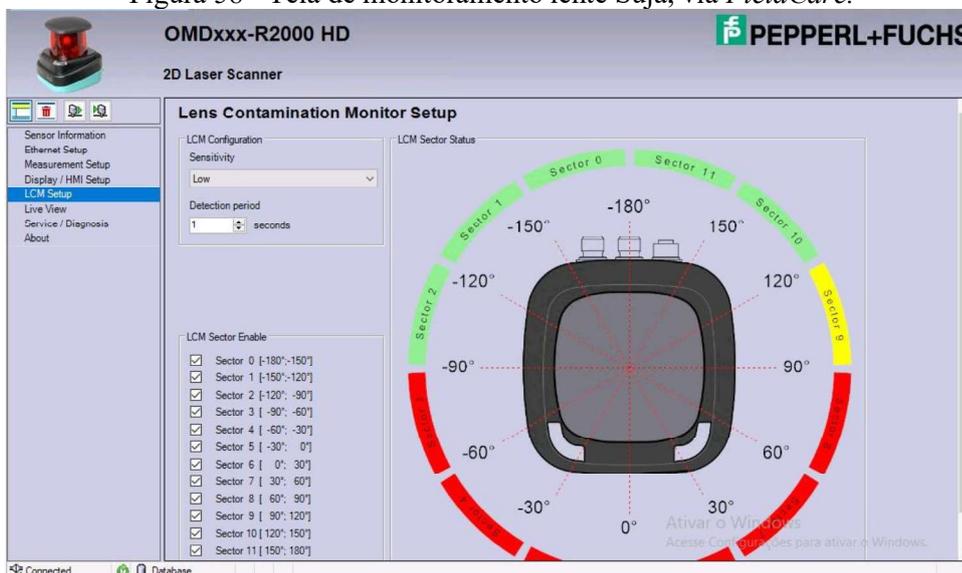
4.4 MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DO SISTEMA

A fase de monitoramento, consiste em implementar ferramentas para diagnóstico da saúde do instrumento, bem como inferir momentos que necessitam de algum tipo de intervenção e manutenção do sistema.

4.4.1 Implementação de Lente Suja

Por meio do software de gestão do ativo é possível configurar e monitorar a sujeira da lente do sensor LiDAR. O monitoramento é dividido em setores. Conforme se observa na Figura 58, o setor entre o setor 90 e 120° destacado em amarelo sinaliza princípio de sujeira. Caso ocorra aumento da sujeira, o setor sinaliza vermelho. Esse sinal é monitorado via lógica no *Labview*.

Figura 58 - Tela de monitoramento lente Suja, via *FieldCare*.



Fonte: Autor, 2023.

Os ângulos entre -90° e +90° correspondem a região coberta da lente do sensor pela proteção de campo. Observa-se que devido à proximidade da proteção com a lente o sensor infere lente suja. Como essa região não é de interesse na medição é desconsiderado no controle.

4.4.2 Monitoramento real da velocidade do transportador

A fim de mitigar uma das possíveis entradas de erro ao sistema, foi implementado em bancada um piloto de sensor para monitoramento real da velocidade do transportador de correia por meio de sensor contador de pulsos. A Figura 59 , ilustra os testes em bancada do sensor de pulsos, bem como a possível integração.

Figura 59 - Teste em bancada do sensor de velocidade.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 60 ilustra um típico de montagem eletromecânicas para fixação do suporte e sensor de velocidade ao transportador.

Figura 60 - Montagens do suporte e sensor de velocidade ao transportador.



Fonte: Autor, 2023.

Infelizmente, após a instalação houve desprendimento da polia acoplada ao taco gerador de pulsos. A Figura 61 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ilustra a tentativa frustrada para medição de velocidade.

Figura 61 – Sistema de medição danificado após instalação.



Fonte: Autor, 2023.

Como iniciativa futura, sugere-se a utilização de sensores de velocidade sem contato a fim de mitigar problemas mecânicos nesse sistema.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que é possível a utilização da tecnologia LiDAR como alternativa para medição de volumes e posterior cálculos da massa em transportadores de correias, em processos como os de usinas de beneficiamento de minérios de ferro.

Os resultados da totalização de produção medida e calculada pelo sistema proposto, após as calibrações necessárias, se manteve dentro da faixa de precisão requerida de $\pm 2\%$, em relação as medidas das balanças de correias utilizadas como padrão, respeitando o valor requerido pelo sistema de qualidade da empresa.

Os testes estatísticos também comprovam a similaridade entre os sistemas de medição, via LiDAR e via balanças, com 95% de confiança.

A aplicação do teste *t de Student*, resultou em um p-valor de 0,952 e apresentou uma potência de 94 %. A aplicação do teste *Wilcoxon-Mann-Whitney*, apresentou um p-valor de 0.9145. Tais resultados confirmaram a equivalências entre as medições feitas pelo sensor LiDAR e as medições feitas pelas balanças físicas, com nível de significância de 5%.

As características do pátio de produtos, onde se observou a presença de 3 tipos de minerais e a uniformidade dos valores de densidade desses produtos, atrelado a lógica de identificação das máquinas de pátio durante a recuperação desses minérios, permitiu uma boa assertividade nas medições de volume e cálculo da massa passante pelo sensor LiDAR.

Para aprimoramento da solução e mitigação de pontos de entradas de erros no sistema, o desafio da medição real da velocidade dos transportadores envolvidos no projeto por meio de soluções sem contato podem contribuir para esse objetivo.

Monitoramento da velocidade da correia é interessante para evitar erros no sistema futuramente.

Questões relacionadas às partes mecânicas, do sensor LiDAR, que podem sofrer com impactos, desgaste das partes rotativas sistema de giro podem inviabilizar o seu uso. Essa desvantagem do sensor é minimizada com o uso de um sensor de qualidade e com rotinas de manutenção adequada, além da implementação de lógica para desligamento da rotação do LiDAR em situações de transportador parado.

A replicação dessa solução é possível em outras partes do processo de beneficiamento do minério de ferro, levando-se em consideração as características e particularidades de cada processo.

A solução poderá ser aplicada em outras unidades da empresa que apresentam características e problemas similares aos processos apresentados nesse trabalho ou ser

O uso da tecnologia LiDAR poderá ser expandido dentro dos processos minerais, para isso, outros estudos e ensaios deverão ser aplicados.

É possível mitigar o problema do tempo morto com esta solução uma vez que não apresenta as mesmas restrições espaciais para sua instalação como as balanças de correias convencionais e melhoria nas ações de controle em função da redução do tempo morto podem ser aplicadas.

Foi submetido um artigo sobre o trabalho com o título *Use of LiDAR sensors for non-contact, real-time measurement of ore mass on belt conveyors* em revista internacional.

Assim o uso de sensores LiDAR, contorna esses problemas trazendo um potencial ganho de produção com a redução das perdas contábeis ocorridas no circuito e a automação dos processos de trabalho envolvendo a operação dos silos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, LUCAS L. **Simple and effective load volume estimation in moving trucks using lidars**. 2019.

CHEN, YUWEI. **Feasibility study of ore classification using active hyperspectral LiDAR**. 2018.

Conceito de pesagens, Balança Integradora. Disponível em: <https://crp.ind.br/produtos/balanca-integradora/>. Acesso em: 25/03/2022.

ENDRESS+HAUSER. **Medição de nível radiométrica**. Disponível em: <https://www.br.endress.com/pt/produtos/n%C3%ADvel/n%C3%ADvel-radiom%C3%A9trica>. Acesso em: 01/05/2022.

HANUSZ, ZOFIA; TARASINSKA, J. **Tables for Shapiro-Wilk W statistic according to Royston approximation**. In: Colloquium Biometricum. 2011.

JHONY, ALAN TAVARES FERREIRA. **Instrumentação virtual aplicada à pesagem de minério em correia transportadora**. Monografia de graduação em engenharia de controle e automação, 2014.

JINLONG ZHENG. **Non-contact measuring method for mine electric locomotive load**. 2019.

KISTLERMORSE. Células de carga. Disponível em: <https://www.kistlermorse.com.br/sensores>. Acesso em: 25/03/2022.

MARTIN D. ADAMS. **Lidar Design, Use, and Calibration Concepts for Correct Environmental Detection**. 2000.

MORDKOFF, J. Toby (2011), **The Assumption(s) of Normality**. Disponível em: <http://goo.gl/Z3w8ku>. Acesso em: 09/04/2016.

MULTIBELT SCHENCK. Disponível em: <https://www.schenckprocess.com/data/pt/files/9/bvp2125br.pdf>. Acesso em: 23/01/2022.

PEPPERL. **Manual 2-D LiDAR Sensor R2000 Measuring Sensors**. Disponível em: https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/tdoct3716e_eng.pdf?v=20230403152657. Acesso em: 23/01/2022.

Principle of Pulse Ranging Technology (PRT). Photoelectric Sensors. Disponível em: <https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/23474.htm>. Acesso em: 01/05/2022.

S. R. PERUDA, E. D. YONG, L. SAMANIEGO, R. P. DADOY, V. D. P. GUBATAN AND H. J. O. MARINDA, "**Low-Cost Stockpile Scanner and Volume Calculator using Light Detection and Ranging Device**," 2021 IEEE 11th International Conference on System

Engineering and Technology (ICSET), 2021, pp. 50-54, doi: 10.1109/ICSET53708.2021.9612538.

SHAPIRO, SAMUEL SANFORD; WILK, Martin B. **An analysis of variance test for normality (complete samples)**. Biometrika, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SILVEIRA, JULIO. **16º Seminário de Automação e TI Industrial - Como será a balança de correia transportadora no futuro**. 2012.

STA BALANÇAS. **Componentes da Balança. 2022**. Disponível em: <https://stabalancas.com.br/produtos/balancas-ferroviarias-dinamicas>. Acesso em: 23/01/2022.

VIKACONTROLS. **Medidor de Vazão de Sólidos LB 472**. Disponível em: <https://vikacontrols.com.br/produto/medidor-de-vazao-de-solidos-lb442/>. Acesso em: 25/03/2022.

WEBER, HARALD. **Modo de funcionamento e variantes dos sensores Lidar**. 2018. Disponível em: <https://www.sick.com/br/pt/from-micron-to-mile/artigo-tecnico-lidar-modo-de-funcionamento-e-variantes-dos-sensores-lidar/w/gmt-micron-to-mile-whitepaper-LiDAR/>. Acesso em: 23/01/2022.

APÊNDICE

APÊNDICE A – PARTE DA ESTRUTURA DE PROGRAMAÇÃO EM *LABVIEW*

A figura A1, ilustra a estruturação do programa:

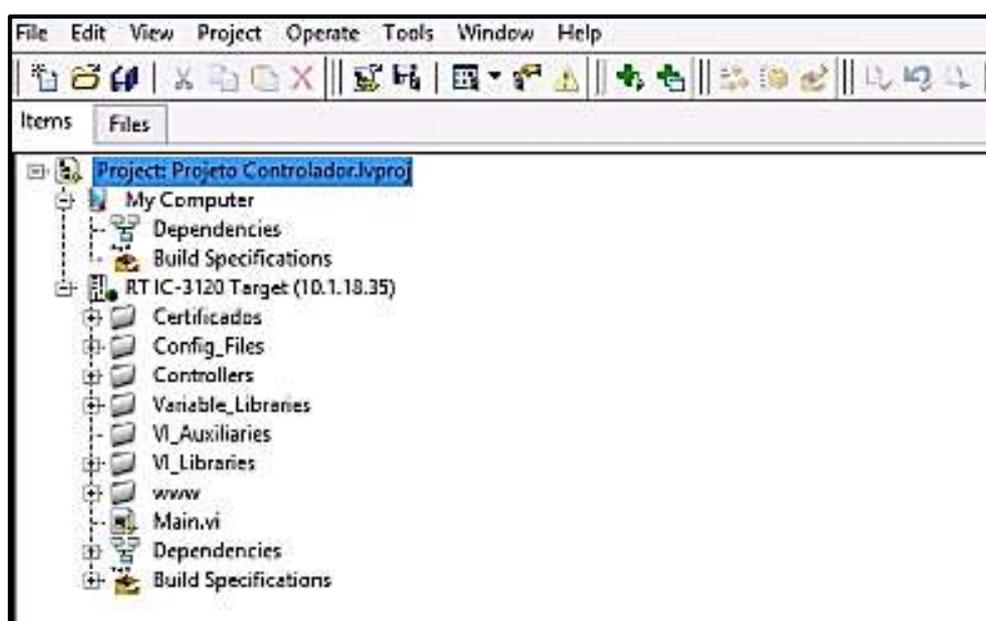


Figura A1 - Estrutura do Programa, ambiente de programação *Labview*.
Fonte: Autor, 2023.

A figura A2, representa a parte do código *Labview* para cálculo da área:

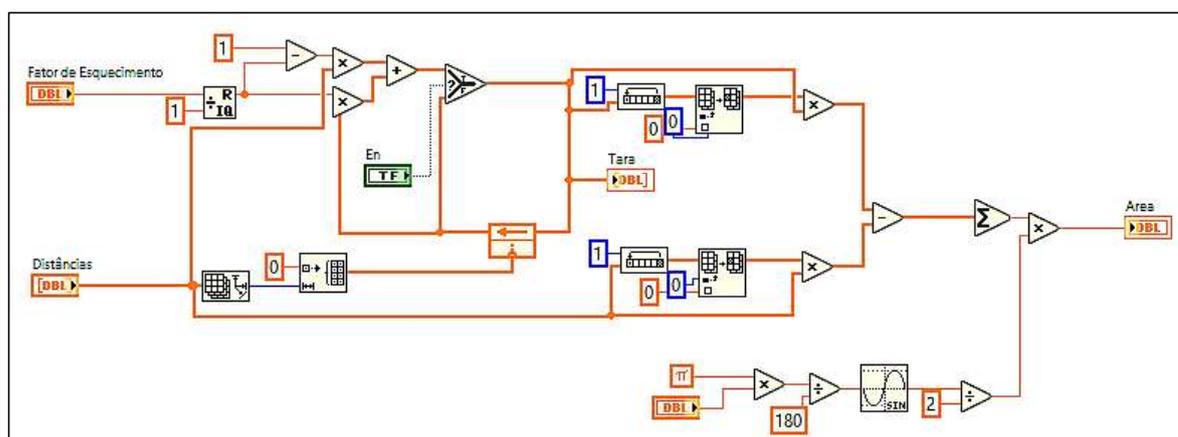


Figura A2 – Código *Labview* para cálculo da área.
Fonte: Autor, 2023.

Nessa Vi, têm-se como entradas as variáveis de entrada, denominadas fator de esquecimento e vetor de distâncias, feito a tara e utilizados a distância e o incremento de ângulo. Como resultado de saída, tem se a tara e o valor de área calculada.

O fator de esquecimento consiste em desconsiderar medições indesejáveis, ou seja, “esquecer” medições que possam contribuir negativamente na leitura da tara. O fator de esquecimento é uma entrada percentual. Ao utilizar a função nativa IRQ do *Labview*, o resultado, que é o quociente coleta as medições indesejadas, mantendo apenas a medição de tara calculada. Em termos práticos, essa funcionalidade aplica um filtro na medição da tara e dos perfis. A figura A3, ilustra a parte do código onde foi implementado o fator de esquecimento:

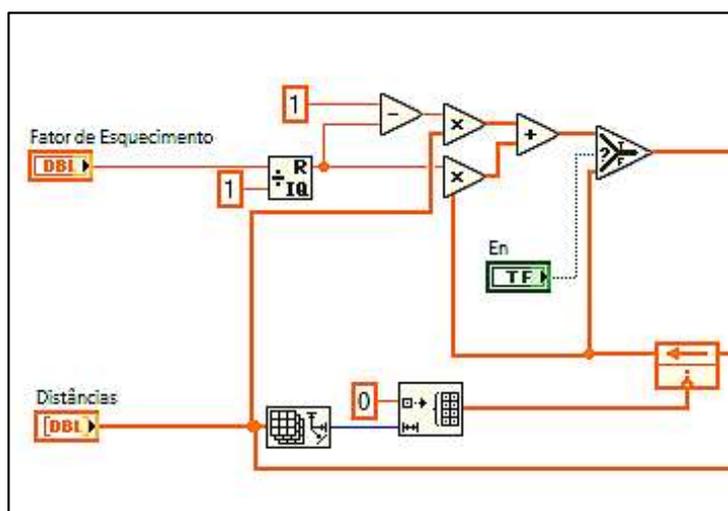


Figura A3 – Filtro de atenuação ou fator de esquecimento, utilizando-se função IRQ.
Fonte: Autor, 2023.

Todo o código para cálculo da área e se baseia na demonstração matemática explicada no item 3.4. A figura A4, ilustra a parte do código que representa a equação 22

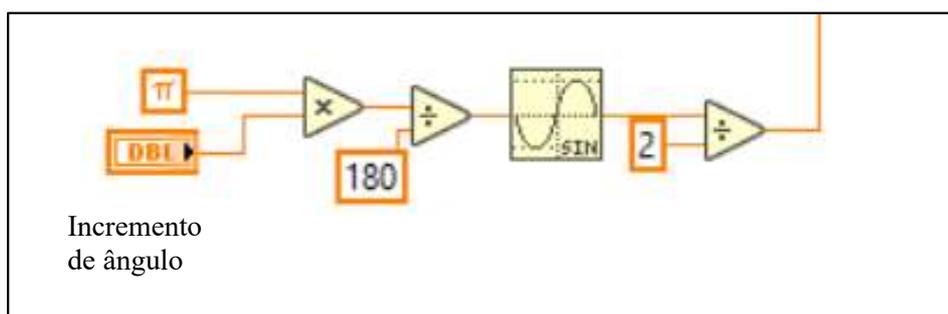


Figura A4 – Código para cálculo de área com base no perfil de minérios.
Fonte: Autor, 2023.

A figura A5, demonstra parte do código onde se tem como principais entradas, a comunicação e leitura de dados do sensor LiDAR (via função *Read Scan*), vetor de distâncias medidas, ângulo de medição, fator de esquecimento. As principais saídas são cálculo de volume, área, massa e vazão mássica.

