

Use of LiDAR Sensors for Non-Contact, Real-Time Measurement of Ore Mass on Belt Conveyors

Anderson S. Macedo  and Adrielle C. Santana 

Abstract—This work explores the use of LiDAR sensor technology as a non-contact method for real-time ore mass measurement in ore processing plants. The ore produced is stored in product yards in organized piles based on quality specifications and later transported through a circuit of yard machines, conveyor belts, and a loading silo. After filling the silo, wagons are loaded and their mass is measured using the railway scale. Inventory is determined either by topographical survey or conveyor belt scales. Discrepancies between measurements from belt scales and railway scales can cause inventory breakdown. Furthermore, traditional mass measurement systems have limitations due to physical constraints, besides the need for mechanical adjustments and recalibrations that interrupt processes. To overcome these challenges, this study suggests using LiDAR sensors. The proposed solution involves installing LiDAR sensors over the belt conveyors feeding the loading silo entrance. This allows for real-time integration of the ore area passing through and, with known density, enables the calculation of its volume and mass on the belt. Comparisons between LiDAR measurements and existing scales were statistically tested with field measurements, showing a significant similarity at a 5% significance level. The results demonstrate that LiDAR technology provides a viable and accurate alternative or complement to traditional mass measurement systems in ore processing plants. This method offers flexibility in installation points, eliminating the need for constant mechanical adjustments and recalibrations, enhancing measurement accuracy in the loading circuit. Furthermore, potential applicability of LiDAR can be extended beyond ore processing.

Index Terms—Conveyor Belts, LiDAR, Measurement, Ore Mass, Scales.

I. 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, o minério é retomado e movimentado via transportadores até os silos de carregamento para enchimento de vagões. A Fig. 1 ilustra essa parte do circuito e na Fig. 2 observa-se a imagem do enchimento dos vagões via silo de carregamento.

Infelizmente, o processo de pesagem pode apresentar alguns problemas tais como: a quebra contábil ou o aumento do tempo morto que pode acarretar dificuldades no controle da produção.

Anderson S. Macedo está com o Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto Tecnológico Vale e Vale S.A., e-mail: anderson.macedo@aluno.itv.org.

Adrielle C. Santana está com a Universidade Federal de Ouro Preto e o Instituto Tecnológico Vale, e-mail: adrielle@ufop.edu.br.



Fig. 1. Processo de retomagem de minério de ferro.

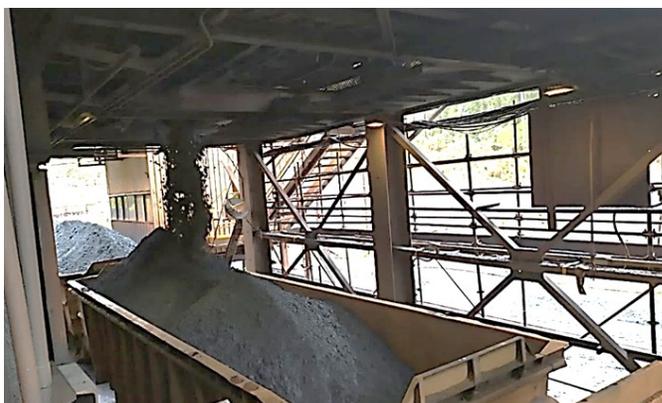


Fig. 2. Vagão sob silo para carregamento de minério.

O problema da quebra contábil aparece durante o ciclo de fechamento da produção onde se percebe a discrepância entre os métodos de contabilização da massa produzida e estocada no pátio e a massa expedida carregada nos vagões. Assim, ocorre uma discrepância entre o valor informado de estoque e o valor expedido via ferrovia.

O estoque é contabilizado pelo volume de produção presente nas pilhas que pode ser calculado por levantamento topográfico destas ou por totalização de produção integrada pelas balanças das correias transportadoras presente no circuito da usina. 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 com células de carga são os componentes responsáveis pela medição da massa carregada em cada vagão.

Como os transportadores de correia funcionam em regime de 24 horas por dia, esses equipamentos apresentam problemas com o passar do tempo, como desvios no percurso da correia,

acúmulo de detritos nas polias e excesso de tensão. Esses problemas interferem diretamente no desempenho e funcionamento das balanças presentes nessas correias.

A perda de desempenho das balanças, também está relacionada a problemas inerentes à manutenção, como desalinhamento da sessão de pesagem, rolos desbalanceados e presença de ressaltos ou descontinuidade na superfície do tapete de borracha.

A instalação convencional de balanças em transportadores pode ser inviável devido às características construtivas e à falta de espaço para fixação, resultando em aumento do tempo morto e, conseqüentemente, a ações de controle inadequadas. O tempo morto é um problema que surge devido ao atraso entre a medição da massa e o início da ação de controle.

Assim, a medição correta da massa de minério e a investigação de novos métodos para fazê-la, de preferência que não tenham contato ou envolvam partes mecânicas móveis (que normalmente exigem manutenções constantes), é de grande importância para os processos dentro de uma usina de beneficiamento.

Algumas soluções disponíveis na literatura incluem o uso de sensores virtuais ou técnicas de inteligência computacional [1]. Os sensores virtuais são modelos que utilizam variáveis secundárias medidas para inferir uma variável de interesse quando não é possível usar sensores reais.

O trabalho de [2], 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.

Sensores do tipo LiDAR (*Light Detection and Ranging*) são muito conhecidos por possibilitar medições de áreas e volumes sem contato. No trabalho de [3], os autores utilizam o mapa 3D obtido com a nuvem de pontos do LiDAR juntamente com uma rede neural convolucional para garantir segurança durante a movimentação de cargas por pontes rolantes. No trabalho de [4] 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 poderiam passar por essas estruturas sem a necessidade de parar. Em [5] a tecnologia LiDAR foi utilizada para medir volumes de pilhas de estocagem. O sistema desenvolvido pelos autores pode produzir um modelo 3D de um estoque e pode calcular automaticamente seu volume.

Sabendo-se o volume do objeto e sua densidade, é possível calcular sua massa. Dessa forma, o projeto apresentado neste artigo propõe a utilização do sensor de medição a laser do tipo LiDAR para a medição de volume e massa sobre transportadores de correia em tempo-real. O resultado dessa medição é comparado e validado por balanças integradoras de medição presente nesse mesmo processo.

Atualmente, não existe no mercado uma solução validada para medir a massa de minério em transportadores de correia na indústria de mineração. A solução proposta não apresenta

restrições mecânicas, como nas balanças convencionais, e pode ser instalada em diferentes pontos do transportador conforme necessário. Além disso, em comparação com uma balança radiométrica, não há restrições de segurança.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. *Medição a Laser*

A medição indireta de vazão mássica usando sensores laser ou ópticos tem baixa adesão devido ao alto custo de aquisição e calibração, e falta de validação em processos de mineração.

No entanto, os sensores LiDAR já estão em uso em diversos segmentos das indústrias do mundo inteiro. De acordo com [6] 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, do inglês *Radio Detection and Ranging*.

Usar um laser para iluminar o objeto de medição permite ajustar o sensor à fonte emissora, sendo independente de luz externa e eficiente em várias condições de iluminação.

O uso de feixes de laser coerente tem a vantagem de delimitar nitidamente o sinal emitido para detectar objetos, mas é importante que os sensores sejam seguros para os olhos e estejam em conformidade com as regulamentações de potência emitida.

As versões 2D e 3D do sensor LiDAR utilizam lasers focalizados para detectar objetos a grandes distâncias ou com estruturas finas. O emissor, receptor e a unidade de avaliação formam o núcleo essencial do sensor LiDAR, juntamente com alta resolução temporal.

A medição a laser sem contato requer que o objeto seja detectável pelo sensor de acordo com o princípio de medição do sensor. Na utilização de laser, isso significa uma radiação perfeita do feixe de laser em direção ao objeto e se afastando dele na "*line of sight*" direta. Isso oferece várias aplicações industriais, como logística, transporte e automação de procedimentos em portos.

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 oferece muitas possibilidades de aplicação em várias áreas, tais como na inspeção e manutenção de infraestruturas como pontes e edifícios, no monitoramento e controle de tráfego, na navegação e detecção de obstáculos em veículos autônomos, no mapeamento e modelagem 3D de ambientes, na automação de procedimentos de carga e descarga de contêineres em portos, entre outras aplicações.

A potência luminosa refletida de um pulso de laser depende da distância e da constituição do objeto. O alargamento plano e retangular do pulso de laser na direção de emissão (a divergência) resulta em menos potência luminosa atingindo o objeto à medida que a distância aumenta. Nem toda luz refletida é direcionada de volta ao sensor, apenas uma fração chega ao receptor do sensor LiDAR.

B. Sensores de Medição de Superfícies (2D)

O desenvolvimento de sensores 2D visou manter as propriedades da medição a laser e aplicá-las a um sensor de medição de superfícies, mas o método de mover um feixe de laser com um espelho rotativo é relativamente complexo.

Muitos sensores de varredura são sistemas de medição coaxial, onde o feixe de laser está no centro do feixe de recepção e é desviado por um espelho rotativo. Esses sensores mantêm as propriedades da medição a laser, como o grande alcance e a capacidade de medir 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.

Os sensores de varredura são excelentes na sua resolução angular e na fidelidade angular da sequência dos disparos, bem como a alta frequência de medição (velocidade de rotação dos motores). O 2D *laser scanner* (ou *2-D LiDAR sensor*), é um sensor de medição de distância a laser que tem como base o princípio *Pulse Ranging Technology* (PRT) que fornece medições precisas, curto tempo de resposta em condições variadas de ambiente e objetos. O sensor utilizado neste trabalho foi desenvolvido pela empresa *Pepperl+Fuchs*®.

C. Princípio Funcional *Pulse Ranging Technology* (PRT)

De acordo com [7], no método PRT de medição, pulsos curtos e de alta energia são emitidos por um laser potente, refletidos pelo objeto alvo e recapturados por um receptor sensível à luz. A distância até o objeto alvo é calculada com base no tempo de emissão e recepção dos pulsos de luz. A Fig. 3, representa a relação entre o tempo de emissão do pulso e o tempo de detecção do pulso no receptor.

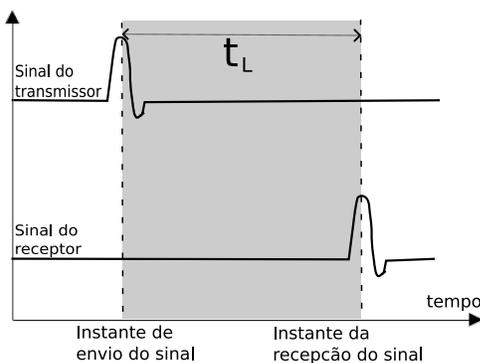


Fig. 3. Relação entre o envio do pulso e sua recepção.

Com base na Eq. (1), 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 [7], sensores PRT emitem pulsos curtos e intensos de luz para calcular a distância com base

no tempo de voo do pulso refletido. Eles emitem pulsos até 250.000 vezes por segundo, com uma alta densidade de energia, permitindo detecção estável em distâncias de até 300 metros. Ao contrário de sensores de triangulação, os sensores PRT não têm limitações geométricas e podem ter carcaças menores com faixas de detecção maiores.

As vantagens dessa tecnologia incluem:

- 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.

Como algumas desvantagens citam-se:

- Limitação de alcance em ambientes externos com alta luminosidade, como luz solar direta;
- Sensibilidade a neblina, chuva intensa ou neve;
- Dificuldade em detectar objetos com baixo coeficiente de reflexão, como superfícies escuras ou transparentes;
- Diminuição da precisão das medições em distâncias maiores devido à dispersão do feixe de luz;
- Baixa resolução espacial em comparação com outras tecnologias, como a do LIDAR de varredura mecânica.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Metodologia

Pretende-se medir e conhecer o volume de produção de minério sobre a correia utilizando-se um sensor LiDAR modelo *2D OBD30M – R2000 – 4EP – V1V17 – 1L* da *Pepperl+Fuchs*, com faixa de medição de 0,1 a 30 m, largura do pulso 5 ns, reprodutibilidade menor que 12 mm e taxa de repetição de 54 kHz.

O sensor está interligado ao controlador industrial da *National Instruments*. A nuvem de pontos dos sinais medidos pelo sensor LiDAR é tratada via lógica de programação *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)*. Após toda a tratativa dos dados, tem-se o cálculo da área e volume do perfil medido.

A tara do sistema é definida medindo a superfície vazia da correia usando o sensor LiDAR. Essa tara é calculada com base na nuvem de pontos das distâncias recebidas pela medição da superfície do transportador em relação a face do sensor. Qualquer perfil ou traço de medição que descreva uma forma será considerado volume sobre a correia. Com parâmetros de densidade e velocidade do transportador, é possível calcular a massa sobre a correia.

Os detalhes da instalação do sensor até a obtenção da vazão mássica do minério sobre o transportador de correia via sensor LiDAR, serão discutidos nos próximos tópicos.

B. Retomagem de Produtos

O pátio de produtos onde foi testada a solução com o sensor LiDAR, tem aproximadamente 500 metros de extensão e 100 metros de largura. É subdividido em pátio de estocagem de *Pellet Feed* e *Sinter Feed* (produtos do beneficiamento do

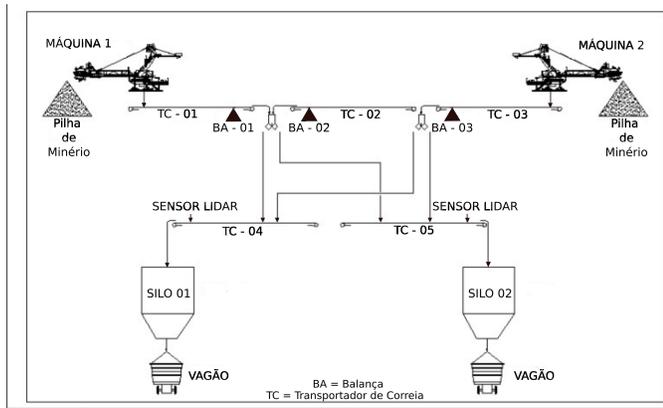


Fig. 4. Circuito de carregamento composto por máquinas de pátio, transportadores de correia (TC), balanças (BA) e silos. Sensores LiDAR posicionados logo antes dos silos.

minério de ferro). O empilhamento 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.

O circuito de carregamento é composto por dois sub-circuitos, sendo cada um composto por uma retomadora, dois transportadores de correia e um silo. Somando-se todas as correias, cada sub-circuito, tem aproximadamente 700 metros de extensão de correias.

Na Fig. 4, tem-se o fluxo de processo do pátio de carregamento e expedição do minério de ferro beneficiado. Cada circuito possui uma balança integradora na lança da retomadora (Máquinas 1 e 2) e uma balança no transportador do pátio (BA - 01, 02 e 03). Os transportadores levam o minério até os silos (01 e 02) onde ocorre o carregamento dos vagões. Os sensores LiDAR foram posicionados próximos aos silos e os dados utilizados nesse trabalho foram obtidos de apenas um dos dois sensores instalados até o momento.

C. Dados

Massa é a quantidade de matéria em um objeto, volume é o espaço que ele ocupa. A densidade relaciona massa e volume, sendo uma propriedade intrínseca do material e pode ser calculada pela Eq. (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).

Nesse projeto, 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 - PIMS*, é possível criar estruturas de análise e comparação de resultados passados com resultados presentes, definir metas e KPI's (*Key Performance Indicator*). O PIMS é um sistema que coleta dados de processo, como temperatura, vazão, corrente, entre outros, de várias fontes. Após configuração da taxa de amostragem, ele

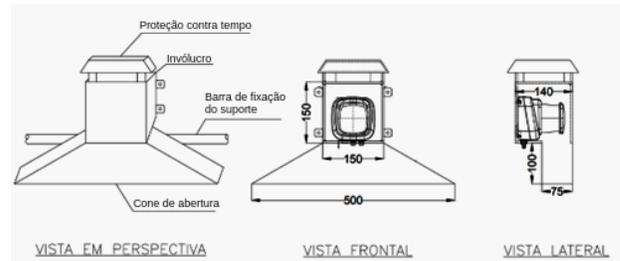


Fig. 5. Especificações para a construção do suporte de fixação. Medidas em centímetros (cm).



Fig. 6. Montagens e ajustes finais do sensor LiDAR sobre o transportador.

armazena esses dados em um banco de dados históricos e os disponibiliza por meio de diferentes formas de representação no próprio *software* ou integrado ao Microsoft Excel.

As telas de supervisão no PIMS são recursos que permitem aos usuários reconstruir telas de supervisão semelhantes ao sistema de supervisão da planta.

Os dados de produção medidos pelo LiDAR e pelas balanças de correia são registrados no PIMS. Após definido o período de armazenamento dos dados nas variáveis cadastradas no PIMS, é possível realizar análises visuais e matemáticas para inferir e aplicar ajustes finos, ou *offsets*, para calibrar a nova balança volumétrica implementada com o LiDAR.

D. Montagem Física do LiDAR

As principais atividades de montagem são a fixação do suporte sobre o transportador, montagens de eletrodutos, lançamentos de cabos, interconexões elétricas e energização.

A montagem do sensor se deu por meio das definições especificadas na fase da engenharia detalhada do projeto. A Fig. 5 ilustra as dimensões e fixação do LiDAR no suporte.

A Fig. 6 ilustra os detalhes finais das montagens do sensor LiDAR sobre o transportador bem como os ajustes finais de altura em relação ao transportador.

E. Cálculo Matemático

Por meio dos pontos gerados pela leitura do sensor LiDAR, é realizado o cálculo de área a partir da definição da tara da superfície da correia. Para facilitar o entendimento, considere o plano cartesiano representado na Fig. 7, no qual o sensor

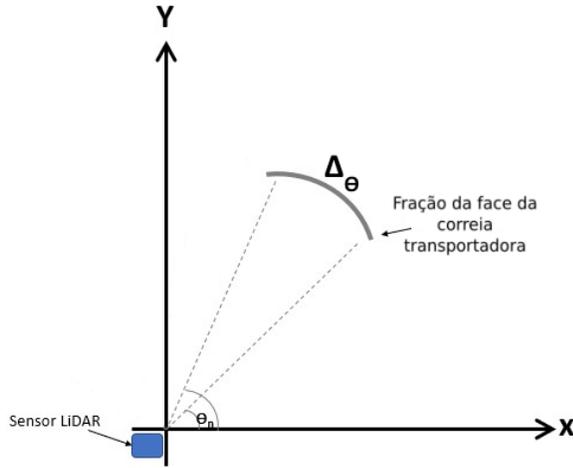


Fig. 7. Representação no plano cartesiano do sensor LiDAR e de uma fração da face do transportador de correia coberta durante o escaneamento do sensor.

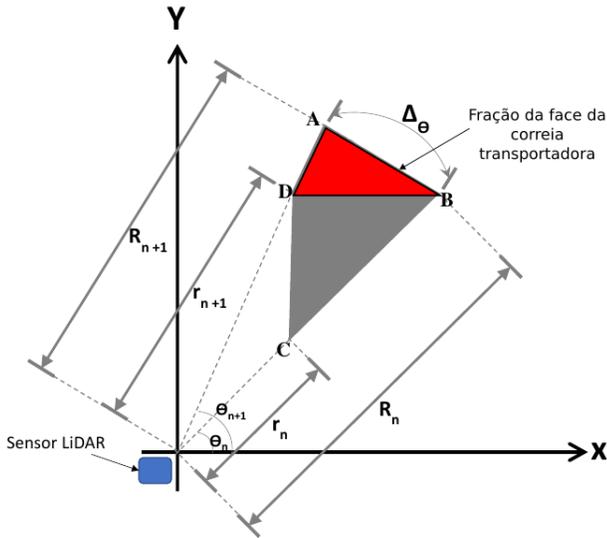


Fig. 8. Representação no plano cartesiano da área de interesse. O sensor LiDAR se encontra na origem do plano.

LiDAR se encontra na origem, e uma fração da face do transportador de correia, coberta pelo LiDAR durante a sua varredura, se encontra representada. Em seguida, utiliza-se como referência o cálculo da área do quadrilátero representado pela figura geométrica da Fig. 8.

Leva-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 e 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.

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.

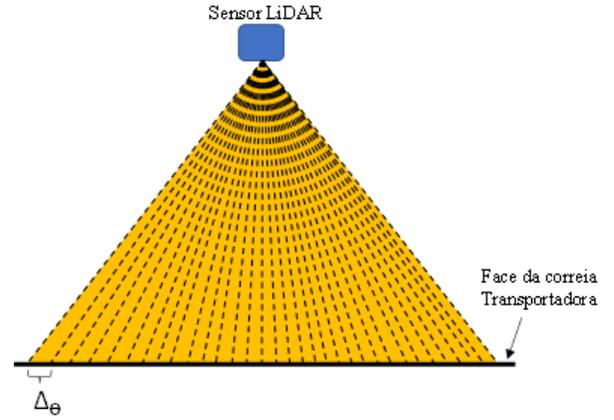


Fig. 9. Representação dos múltiplos triângulos cuja soma das áreas resulta no perfil do minério que está sobre a correia. Os triângulos são calculados via escaneamento da superfície da correia transportadora pelo sensor. O escaneamento abrange deslocamentos de ângulo ($\Delta\theta$) do LiDAR durante a varredura.

Os segmentos de retas R_n e R_{n+1} , representam as distâncias do centro do sensor até as extremidades da forma geométrica (pontos A e B) na Fig. 8, que para esse projeto, representam uma fração da face da correia. Assim, alinhado ao centro da correia, pode-se considerar que as distâncias R_n e R_{n+1} possuem o mesmo valor. Já as distâncias 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 $\Delta\theta$, é o parâmetro que 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 do quadrilátero A, B, C, D. Para entender melhor esse conceito, considere a ilustração na Fig. 9, a qual representa o comportamento desse deslocamento angular para o cálculo da área. De acordo com o valor de $\Delta\theta$, formam-se múltiplos triângulos em relação a face do sensor e da face da correia.

Considera-se que o deslocamento angular é constante para todos os pontos na sequência. Para se obter a área de cada triângulo considere o quadrilátero A, B, C e D da Fig. 8. Para calcular a área desse quadrilátero (A_Δ), é necessário primeiro calcular-se a área do triângulo formado pelos pontos A, B e D (A_1), dada na Eq. (3):

$$A_1 = \frac{|A_x(B_y - D_y) + B_x(D_y - A_y) + D_x(A_y - B_y)|}{2} \quad (3)$$

Representando A_x, B_x, D_x, A_y, B_y e D_y em coordenadas retangulares e simplificando, obtém-se o valor de A_1 conforme a Eq. (4).

$$A_1 = \frac{\text{sen}(\Delta\theta)}{2} |(R_n R_{n+1} - R_n r_{n+1})| \quad (4)$$

De forma análoga obtém-se a área do triângulo B, C e D (A_2) dada pela Eq. (5).

$$A_2 = \frac{\text{sen}(\Delta\theta)}{2} |(R_n r_{n+1} - r_n R_{n+1})| \quad (5)$$

Assim, a área do quadrilátero A, B, C, D (A_{Δ}) é obtida por meio da soma das áreas A1 e A2 resultando na Eq. (6). A soma de várias dessas áreas em deslocamentos de $\Delta\theta$ resulta na área total do perfil do minério sobre a correia (A_{total}).

$$A_{\Delta} = \frac{\text{sen}(\Delta\theta)}{2} |(R_n R_{n+1} - r_n r_{n+1})| \quad (6)$$

A partir do conhecimento dessa área total é possível calcular a massa do minério de acordo com a Eq. (7).

$$m = \left(\int A_{total} dx \right) * d \quad (7)$$

Em que dx é o menor passo de deslocamento do minério sobre a correia e que depende da velocidade desta, da taxa de amostragem do sinal do LiDAR (dependente do seu tempo de varredura em cada giro) e da taxa de amostragem do sistema de aquisição do Controlador Lógico Programável (CLP). O valor da velocidade da correia utilizada nos cálculos foi fixado de acordo com o conhecimento desse pelos operadores da planta.

A densidade d do material é aferida periodicamente pela equipe de Qualidade da empresa e é uma informação disponível no sistema interno. A depender da pilha de minério no pátio, a densidade pode ser diferente, mesmo considerando o mesmo tipo de minério beneficiado. Por exemplo, no momento da realização dos testes desse trabalho, a produção de *Pellet Feed* apresentava densidade igual a $2,37t/m^3$ em um setor do pátio, e em outro setor essa densidade era de $2,42t/m^3$. Em um terceiro setor tem-se o minério do tipo *Sinter Feed* que apresentava valor de densidade de $2,62t/m^3$.

Como se tem 3 origens de materiais diferentes, para a seleção correta do valor da densidade, foi implementado via CLP uma lógica de seleção de densidade de acordo com a posição das máquinas no pátio. De posse da massa, a vazão mássica W , dada em t/h , pode ser calculada por meio da Eq. (8):

$$W = \frac{m}{h} \quad (8)$$

Para a integração da vazão mássica, utilizou-se lógicas de cálculos de produção (totalização) já usuais, no controlador da planta (CLP), a partir das quais obtém-se a totalização para qualquer janela de tempo desejada (hora, dia, mês, etc.) de acordo com a Eq. (9).

$$Totalização = \int W dt \quad (9)$$

IV. RESULTADOS

Foram levantadas 42 medidas de totalização de massa feitas com o sensor LiDAR e, simultaneamente, a mesma massa foi obtida também pela soma das totalizações feitas por três balanças de correia que descarregam na correia onde se encontra o LiDAR. Essas balanças haviam sido calibradas há pouco tempo (com margem de erro dentro de 2% conforme padrão da empresa) e foram utilizadas como padrão de comparação neste trabalho. Como as totalizações são feitas com alguns segundos de diferença, foi necessário fazer um ajuste fino do *delay* entre as duas medidas para que fosse possível ter a certeza de que se estava capturando as medidas da mesma massa nos dois sistemas de medição. Cada totalização considera um período

de cerca de 3 horas, que é o tempo médio de enchimento de todos os vagões. Em média, as medidas do LiDAR tiveram uma margem de erro de $\pm 2\%$ em relação a média das balanças originais.

A Fig. 10 ilustra as medições da vazão instantânea em t/h (toneladas por hora) feitas em tempo-real pelo LiDAR (em vermelho) e pela soma das balanças (em azul). Na Figura, tem-se um trecho de uma das janelas de tempo utilizada para se obter uma das 42 medidas de totalização de massa.

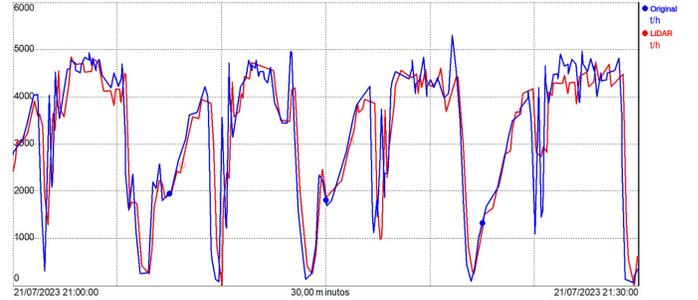


Fig. 10. Medições de vazão instantânea do minério, em tempo-real, feitas com o sensor LiDAR (vermelho) e com as balanças originais (azul). Valores em t/h.

Creditamos pequenas diferenças entre as medições aos diferentes sistemas de medição utilizados e à conformação da pilha de minério ao logo do seu transporte sobre a correia no caminho entre as balanças e o LiDAR. Ao fim da janela de carregamento, onde ocorre a passagem total do fluxo de minério em ambos os sistemas, espera-se que o valor da totalização seja similar entre eles apesar das pequenas diferenças instantâneas observadas nas vazões.

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 a essa questão, foram levantadas duas hipóteses ligadas ao valor médio das medidas levantadas com os dois métodos de totalização de massa de minério, conforme segue na Eq. (10):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_{LiDAR} = \mu_{Original} \\ H_1 : \mu_{LiDAR} \neq \mu_{Original} \end{cases} \quad (10)$$

Onde H_0 é a hipótese nula, H_1 é a hipótese alternativa, μ_{LiDAR} é a média das amostras de totalização obtidas com o sensor LiDAR e $\mu_{Original}$ a totalização obtida da soma das medidas feitas pelas balanças de correia já em uso. Com o auxílio da linguagem R realizou-se um teste *t de Student* bilateral, considerando um nível de significância α de 5%, o qual garante um nível de confiança de 95%. Além disso, deseja-se um nível de potência de teste de pelo menos 90%.

Verificou-se as premissas de normalidade e igualdade de variâncias dos resíduos, e de independências das amostras. O teste de Durbin-Watson [8], [9] avalia a autocorrelação dos resíduos dos dados e retornou um p-valor de 0.836 atestando a independência das amostras. O teste F tem como H_0 que a razão entre as variâncias dos resíduos das populações é igual a 1, ou seja, as variâncias são iguais. Com um p-valor de 0.77 como resultado do teste, tal hipótese não pode ser rejeitada.

Por fim, o teste de Shapiro-Wilk para a normalidade dos resíduos [10] indicou a não normalidade da distribuição destes. Em uma análise exploratória, observou-se alguns *outliers* nas amostras gerados por totalizações de valores muito altos ou muito baixos que ocorreram em alguns dias de medição, não por erro do sensor, mas por inconstância natural da produção na usina. Retiradas essas amostras, sobraram 26 medidas de totalização de massa. O teste resultou em um p-valor de 0.125 atestando a não rejeição da H_0 do teste de Shapiro-Wilk que afirma que a amostra provém de uma população com distribuição Normal.

Com as premissas do teste respeitadas, realizou-se o *t de Student* bilateral com as 26 amostras para cada grupo testado (LiDAR e Original) que resultou em um p-valor de 0.952 ($t[50] = -0.06$) de forma que se pode concluir que a evidência é insuficiente para se rejeitar a hipótese nula no teste bilateral, descrita na Eq. (10), ou seja, na média, a totalização da massa de minério, via sensor LiDAR, é igual à totalização original feita pelas balanças de correia, a um nível de confiança de 95%. A potência de teste obtida foi de aproximadamente 94%.

Foi realizado também o teste não-paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney para dados que não apresentam distribuição Normal. Assim, utilizou-se nesse teste a totalidade das amostras, ou seja, 42 para cada grupo testado: LiDAR e Original. Com um p-valor de 0.915 conclui-se que não há evidências para se rejeitar a H_0 ao nível de significância de 5%, ou seja, as duas amostras apresentam distribuição dos dados similar, com a mesma mediana.

Vibrações da estrutura da correia, causadas por problemas mecânicos diversos, e excesso de sujeira na lente, podem trazer incertezas na medição do LiDAR. As vibrações também afetam as balanças de correia, utilizadas como padrão de comparação neste trabalho. Essas e outras incertezas inseridas por fatores externos ao sistema de medição, estão embutidas nas medições e entram na faixa de erro de $\pm 2\%$ aceitos pela empresa. No entanto, melhorias podem ser feitas em alguns pontos do sistema buscando mitigar tais problemas. Como exemplo, uma lógica de monitoramento de sujeira de lente do LiDAR foi implementada e apresentou o funcionamento esperado. Uma vez que o sensor possui embarcado a funcionalidade de monitoramento de lente suja, por meio de um sinais binário enviado pelo sensor, sabe-se qual setor da lente está comprometida por alguma sujidade. Isso permite ações preventivas, já que a sujeira na lente pode interferir nos cálculos de distância e área.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que a tecnologia LiDAR pode ser uma alternativa para medir volumes e calcular a massa em usinas de beneficiamento de minério de ferro, evitando problemas com balanças convencionais, como limitações de instalação e manutenção.

Os resultados da totalização de produção medida e calculada pelo sistema proposto, se manteve dentro da faixa de precisão de $\pm 2\%$ comparando com as medidas das balanças originais. A utilização do método estatístico *t de Student* demonstrou que, na média, a totalização da massa de minério, via sensor Li-

DAR, é equivalente à totalização original feita pelas balanças de correia com 95% de confiança.

O uso do sensor LiDAR permitiu medições precisas de volume e cálculo de massa com base nas características do pátio de produtos, na uniformidade da densidade dos minerais e na lógica de identificação das máquinas. No entanto, os resultados são preliminares e requerem testes contínuos para compreender melhor o funcionamento e possíveis problemas a longo prazo.

Para aprimoramento da solução e mitigação de pontos de entradas de erros no sistema, sugere-se a medição, em tempo-real, da velocidade dos transportadores envolvidos no projeto por meio de soluções sem contato.

Possivelmente, a replicação dessa solução é viável em outras partes do processo de beneficiamento do minério de ferro e mesmo em outros setores industriais desde que sejam conhecidas a densidade do produto e a velocidade do transportador de correia.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), do Instituto Tecnológico Vale (ITV) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

REFERENCES

- [1] P. Kadlec, B. Gabrys, and S. Strandt, "Data-driven soft sensors in the process industry," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 795–814, 2009.
- [2] S. G. A. Sobreira, *Aplicação de Sensores Virtuais Baseados em Aprendizado de Máquina para Esmava da Vazão Mássica de Minério de Ferro em Correias Transportadoras*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto Tecnológico Vale, 2021. Disponível em: <https://www.itv.org/wp-content/uploads/2022/02/Dissertacao-Sandro-Versao-Final.pdf>.
- [3] J. M. García, J. L. Martínez, and A. J. Reina, "Bridge crane monitoring using a 3d lidar and deep learning," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 2, pp. 207–216, 2023.
- [4] L. L. Amorim, F. Mutz, A. F. De Souza, C. Badue, and T. Oliveira-Santos, "Simple and effective load volume estimation in moving trucks using lidars," in *2019 32nd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*, pp. 210–217, 2019.
- [5] S. R. Peruda, E. D. Yong, L. Samaniego, R. P. Dadoy, V. D. Gubatan, and H. J. O. Marinda, "Low-cost stockpile scanner and volume calculator using light detection and ranging device," in *2021 IEEE 11th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, pp. 50–54, 2021.
- [6] H. Weber, "Lidar sensor functionality and variants," *SICK AG in Waldkirch/Germany, whitepaper*, vol. 7, 2018. Acessado em 3 Ago 2022.
- [7] *Pepperl+Fuchs GmbH. 2-D LiDAR Sensor R2000 Measuring Sensors*, 2022. Acesso em 23 Jan 2022. Disponível em: https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/doct6019c_eng.pdf?v=20230403152657.
- [8] J. DURBIN and G. S. WATSON, "Testing for serial correlation in least squares regression: I," *Biometrika*, vol. 37, pp. 409–428, 12 1950.
- [9] J. DURBIN and G. S. WATSON, "Testing for serial correlation in least squares regression: II," *Biometrika*, vol. 38, pp. 159–178, 06 1951.
- [10] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, "An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)," *Biometrika*, vol. 52, p. 591, dec 1965.



Anderson Silva Macedo Electrical Engineer (Senior) at Vale S/A. Specialist in industrial automation, 23 years of experience in the areas of electrical and industrial automation in the topics: project management, electrical maintenance, industrial networks, CCMi, instrumentation, supervisory and asset management. Participation in the commissioning and implementation (EPO) of capital projects at Vale (ITMI-VGR, Conceição Itabiritos, Capanema). Degrees in Electrical Engineering (CES-CL), Information Systems (Funcesi) and People Management

(Unopar). Specializations in Industrial Automation (UFMG) and Project Management (Uninter).



Adrielle de Carvalho Santana Degree in Control and Automation Engineering from the Federal University of Ouro Preto (UFOP), Brazil. Master in Information Engineering from the Federal University of ABC (UFABC), Brazil. Professor at the Federal University of Ouro Preto (UFOP). Doctorate in Electrical Engineering from the Federal University of Minas Gerais (UFMG), Brazil, and in Cognitive Sciences, Psychology and Neurocognition from the Université Grenoble Alpes (UGA), France. Research area: control and automation, signal processing, auditory evoked potentials and computational intelligence.

and computational intelligence.