

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



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

LIDAR E IA NA AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE GRANULADOS

Saulo Neves Matos

Ouro Preto Minas Gerais, Brasil 2022

Saulo Neves Matos

LIDAR E IA NA AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE GRANULADOS

Dissertação apresentada 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.

Orientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio, D.Sc.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M433I Matos, Saulo Neves.

LiDAR e lA na avaliação de características de granulados. [manuscrito] / Saulo Neves Matos. - 2022. 92 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.
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 Minerais.

1. Light Detection And Ranging (LiDAR). 2. Instrumentação. 3. Inteligência Artificial (IA). I. Euzébio, Thiago Antonio Melo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5:622.2



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO **REITORIA** ESCOLA DE MINAS PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT. PROCESSOS DE MIN.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Saulo Neves Matos

LiDAR e IA na avaliação de características de granulados

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 26 de maio de 2022

Membros da banca

Doutor - Thiago Antonio Melo Euzébio - Orientador - Instituto Tecnológico Vale Doutor - Alan Kardek Rêgo Segundo - Universidade Federal de Ouro Preto Doutor - Rafael Bezerra Correia Lima - Universidade Federal de Campina Grande Doutor - Luís Marcelo Marques Tavares - Universidade Federal do Rio de Janeiro Mestre - Cristiano Lopes da Silva - Vale

Thiago Antonio Melo Euzébio, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 15/06/2022



Documento assinado eletronicamente por Saul Emanuel Delabrida Silva, VICE-COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONT. E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO, em 07/07/2022, às 10:51, 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 0357221 e o código CRC 264761A1.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008890/2022-17

SEI nº 0357221

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000 Telefone: (31)3552-7352 - www.ufop.br

Criado por 09997589696, versão 3 por 06080955679 em 07/07/2022 10:50:53.

Agradecimentos

Agradeço ao Pai, mestre dos mestres, que me deu a oportunidade de desenvolver este trabalho. Agradeço aos meus pais, Marcílio e Marinalva, que sempre me apoiaram e me deram todo suporte para completar esta etapa.

Agradeço à minha irmã Sarah por toda amizade e carinho.

Agradeço à todos meus amigos, que me apoiaram durante toda jornada.

Agradeço aos meus professores, em especial ao professor Thiago Euzébio, que muito me auxiliou no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço ao Instituto Tenológico Vale e a Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade.

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); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

"A recompensa de um trabalho é ter produzido; A recompensa do esforço é ter crescido por ele."

(A.D. Sertillanges).

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação,

Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a

obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

LIDAR E IA NA AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE GRANULADOS

Saulo Neves Matos

Maio/2022

Em grande parte da operação de usina, o minério processado está na forma de granulados sob

Orientador: Thiago Antonio Melo Euzébio

correia transportadora. Coletar informações acerca do minério transportado pelas correias transportadoras é de interesse da indústria mineral, já que essa ação é essencial para alimentar sistemas de automação, os quais são capazes de reduzir custos e melhorar a produtividade dos negócios. Neste trabalho é apresentada uma proposta de avaliar características de materiais granulados como grau de fragmentação, massa, tipo de material e a condição do material, em relação a sua umidade. Para isso, sugere-se o uso de *laser scanner* bidimensional para varredura da superfície do material e uma unidade de tratamento de sinais para aquisitar os dados e efetuar os cálculos necessários para avaliar características de granulados. Foram realizados testes em laboratório para avaliar as características de materiais granulados, em que o sistema foi capaz de avaliar o grau de fragmentação de agregados de construção civil com uma taxa de acerto em torno de 98%. Além disso, foi medida a massa de areia despejada em um recipiente, de maneira que foi obtido um erro porcentual de aproximadamente 12%. Por fim, foram realizados testes,

Palavras-chave: Light Detection And Ranging (LiDAR), Instrumentação, IA.

em que o sistema de instrumentação foi capaz de distinguir granulados de diferentes cores e

avaliar a condição de um solo, de modo a detectar materiais de alta umidade.

Macrotema: Usina; Linha de Pesquisa: Instrumentação no Processamento de Minérios;

Tema: Redução de Variabilidade e Melhoria de Controle; Área Relacionada da Vale: S11D

(PA).

vi

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and

Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Science (M.Sc.)

LIDAR AND AI FOR EVALUATING BULK CHARACTERISTICS

Saulo Neves Matos

May/2022

Advisor: Thiago Antonio Melo Euzébio

In a large part of the mining operation, the processed ore is in the form of granules transported by conveyor belts. Collecting information about the transported ore is in the interests to the

mineral industry, as this action is essential to feed automation systems, which are capable of

reducing costs and improving business productivity. This work presents a proposal to evaluate

characteristics of granulated materials such as degree of fragmentation, mass, type of material

and the condition of the material, in relation to its moisture. For this, we suggest the use of

a two-dimensional *laser scanner* to scan the surface of the material and a signal processing

unit to acquire the data and perform the necessary calculations to evaluate the characteristics of

granules. Laboratory tests were carried out to evaluate the characteristics of granulated materi-

als, in which the system was able to evaluate the degree of fragmentation of civil construction

aggregates with an accuracy of approximately 98%. In addition, the mass of sand poured into

a container was measured, so that was obtained an percentage error of approximately 12%.

Finally, tests were carried out, in which the instrumentation system was able to distinguish granules of different colors and evaluate the condition of a soil, in order to detect materials with

high humidity.

Keywords: Light Detection And Ranging (LiDAR), Instrumentation, Artificial Intelligence

(AI).

Macrotheme: Plant; Research Line: Instrumentation in Mineral Processing; Theme: Vari-

ability Reduction and Control Improvement; Related Area of Vale:S11D (PA).

vii

Lista de Figuras

Figura 3.1	Amplitudes dos sinais de luz transmitidos (A_T) e recebidos (A_R) . Em que, t_s	
é o ten	npo de viagem do pulso do <i>laser</i> . Fonte: Chang e Chung (2012)	31
Figura 3.2	Relação teórica entre intensidade e $range(R)$ e ângulo de incidência (α)	
para m	nateriais de diferentes refletâncias (ρ_1 e ρ_2). Fonte: Kashani <i>et al.</i> (2015)	34
Figura 4.1	Representação do processo de peneiramento. Fonte: adaptado de Gupta	
e Yan	(2016)	37
Figura 4.2	Oversize transportado via correia	38
Figura 4.3	Aspecto visual do minério causador de avalanche	40
Figura 5.1	Localização do sistema de medição proposto	42
Figura 5.2	Delimitação do ângulo de varredura do <i>laser scanner</i>	44
Figura 5.3	Sistema de coordenadas. Fonte: adaptado de Slamtec (2021)	44
Figura 5.4	Envoltórias oriundas da varredura de materiais com diferentes graus de	
fragme	entação	45
Figura 5.5	Área da seção transversal	46
Figura 5.6	Diagrama esquemático do funcionamento do sistema	47
Figura 5.7	RPLiDAR S1 da Slamtec. Fonte: Slamtec (2021)	48
Figura 5.8	URM-40LC-EWT da Hokuyo. Fonte: Hokuyo (2020)	49
Figura 5.9	Varredura de um LiDAR multi-echo, em que um pulso emitido promove	
múltip	las reflexões . Fonte: Gómez <i>et al.</i> (2020)	50
Figura 5.10	Raspberry Pi modelo 3B+. Fonte: adaptado de Raspberry Pi (2022)	50
Figura 5.11	Jetson Nano da Nvidia. Fonte: Kurniawan (2021)	51
Figura 5.12	C920 HD pro da Logitech.	52
Figura 5.13	RealSense D435i. Fonte: Intel (2022b)	52
Figura 5.14	3G/4G & LTE Base HAT, mini PCle EC-25 AU e antenas. Fonte: Sixfab	
(2022))	53
Figura 5.15	Primeiro protótipo	54
Figura 5.16	Segundo protótipo	54
Figura 5.17	Terceiro protótipo	55
Figura 5.18	Terceiro protótipo	55
Figura 5 10	Conceitos básicos do ROS. Fonte: ROS (2022)	56

Figura 5.20	Princípios essenciais da solução IoT	60
Figura 5.21	Diagrama de IoT que será utilizado	61
Figura 6.1	Plataforma de testes usada no experimento	65
Figura 6.2	Diferentes cenários usados no teste	66
Figura 6.3	Distribuições normal obtidas nas varreduras	67
Figura 6.4	Diagrama de fluxo da <i>Random Forest</i>	68
Figura 6.5	Boxplot da RF com 25 e 50 árvores.	69
Figura 6.6	Bancada de teste para obtenção da massa	70
Figura 6.7	Curva de calibração do sistema de instrumentação	71
Figura 6.8	Varreduras realizadas na superfície da areia, em que a curva em laranja re-	
presen	ta a curva de calibração, a curva em azul a varredura do material e a parte	
hachui	rada representa a área da sessão transversal	71
Figura 6.9	Modelo tridimensional do recipiente abastecido com areia	72
Figura 6.10	Diferentes cenários usados no teste	74
Figura 6.11	Gaussianas para os diferentes cenários usados no teste	75
Figura 6.12	Diferentes materiais usados no teste	76
Figura 6.13	Gaussiana dos dados de intensidade oriundos da varredura de diferentes ma-	
teriais,	, em que a curva em laranja representa a areia, cinza brita, branco o gesso,	
preto o	carvão e marrom o solo	77

Lista de Tabelas

Tabela 5.1	Especificações do RPLiDAR S1. Fonte: Slamtec (2021)	48
Tabela 5.2	Especificações do URM-40LC-EWT. Fonte: Hokuyo (2020)	49
Tabela 5.3	Especificações do Raspberry Pi modelo 3B+. Fonte: Raspberry Pi (2022)	51
Tabela 5.4	Especificações do Jetson Nano. Fonte: Kurniawan (2021)	51
Tabela 6.1	Matrizes de confusão para os modelos propostos	70
Tabela 6.2	Resultados do teste de cálculo de massa	72

Lista de Siglas e Abreviaturas

1D Unidimensional

2D Bidimensional

3D Tridimensional

AG Moagem Autógena

AlOH Óxido de Alumínio

ALS Airborn laser scanner

Blob Binary large object

ECT Tomografia de Capacitância Elétrica

EM Eletromagnética

fps Frames per second

GPU Graphics Processing Units

HF Hematita Friável

HTTP Hypertext Transfer Protocol

IMU Inertial Measurement Unit

IoT Internet of Things

IR Infrared

JSON JavaScript Object Notation

LiDAR Light Detection and Ranging

M2M Machine to machine

MQTT Message Queuing Telemetry Transport

PCA Análise do Componente Principal

ROM Run-of-mine

ROS Robot Operating System

SAG Moagem Semi Autógena

SVM Support Vector Machines

TLS Terrestrial laser scanner

ToF Time of flight

Lista de Símbolos

- α_i Ângulo de incidência do feixe ao alvo
- β_t Largura do feixe de *laser*
- η_{atm} Fator de transmissão atmosférica
- η_{sys} Fator de transmissão do sistema
- Ω Ângulo de reflexão
- ρ Refletância da superfície do material
- ρ_a Densidade aparente
- σ Seção transversal do alvo
- θ Ângulo de incremento
- A Área da seção transversal
- A_R Amplitude do sinal de luz recebido
- A_t Área do alvo
- A_T Amplitude do sinal de luz transmitido
- c Velocidade da luz
- cm Centímetros
- D_r Diâmetro de abertura do receptor óptico do sensor
- m Massa
- mm Milímetros
- P_r Potência ótica emitida
- P_t Potência ótica transmitida

R Range

- t Tempo
- t_s Tempo de viagem do pulso do *laser*
- v Volume
- x Largura da correia
- y Altura entre o sensor e o alvo

Sumário

1	Intr	odução		17
	1.1	Contex	xto	17
	1.2	Motiva	ação	18
	1.3	Objeti	vos	20
		1.3.1	Objetivo geral	20
		1.3.2	Objetivos específicos	20
	1.4	Pergur	ntas	20
	1.5	Organi	ização do texto	21
2	Tral	balhos r	relacionados	22
	2.1	Trabal	hos acadêmicos	22
		2.1.1	Análise granulométrica	22
		2.1.2	Vazão volumétrica e mássica	23
		2.1.3	Detecção de material que provoca avalanche	24
		2.1.4	Classificação de tipo de minério	24
	2.2	Patento	es	26
		2.2.1	Análise granulométrica	26
		2.2.2	Vazão volumétrica e mássica	27
		2.2.3	Classificação do tipo de minério	28
3	Prin	cípios d	do LiDAR	30
	3.1	Introdu	ução	30
	3.2	Funcio	onamento	30
	3.3	Mediç	ão de intensidade	31
		3.3.1	Características da superfície alvo	33
		3.3.2	Geometria da aquisição de dados	34
		3.3.3	Efeitos instrumentais	35
		3.3.4	Efeitos ambientais	35
	3.4	Tipos o	de sistemas LiDAR	35

4	Pos	síveis problemas em usina detectáveis com LiDAR bidimensional	37
	4.1	Baixa eficiência do peneiramento	37
	4.2	Baixa eficiência de processos de cominuição	38
	4.3	Atrasos de medição de taxa	39
	4.4	Deterioração de correias trasportadoras	40
	4.5	Avalanche em silos, moegas e alimentadores	40
5	Mat	eriais e Métodos	42
	5.1	Configuração do sistema	42
	5.2	Hardware	47
		5.2.1 <i>Laser Scanner</i>	48
		5.2.2 Minicomputador de placa única	50
		5.2.3 Câmera	52
		5.2.4 Módulo 3G/4G/LTE	52
		5.2.5 Clausuras de proteção	53
	5.3	Software	55
		5.3.1 ROS	56
		5.3.2 Funcionamento dos algoritmos desenvolvidos	56
		5.3.3 Envio dos dados	59
		5.3.4 Configuração de serviços <i>systemd</i>	62
6	Resi	ultados de experimentos em laboratório	65
	6.1	Grau de fragmentação	65
	6.2	Cálculo de massa	70
	6.3	Condição do material	72
	6.4	Diferenciação de materiais	75
7	Cor	nclusão	78
	7.1	Trabalhos Futuros	80
	7.2	Publicações	80
Re	ferên	cias Bibliográficas	82

1. Introdução

1.1. Contexto

Alguns setores industriais beneficiam *commodities* por uma longa cadeia de produção, o que requer o transporte desse material de um local a outro. Por exemplo, na indústria mineral são utilizadas correias transportadoras para transporte do minério, e na indústria petroleira, são usados tubos para transportar o óleo e gás. Um único site de mineração pode conter dezenas ou centenas de quilômetros de correias transportadoras que transportam milhares de toneladas de minério por hora.

Devido à importância do transporte do minério pela usina de beneficiamento mineral, coletar informações acerca do minério transportado pelas correias é de interesse da industria mineral, uma vez que essa ação é essencial para alimentar sistemas de automação, evitar acidentes e situações de falhas ou quebras de equipamentos. Além disso, a indústria mineral vem passando por intensas mudanças para se manter produtiva, por isso, busca a implementação de inovações digitais com o uso de dispositivos, métodos e sistemas digitalizados capazes de reduzir custos e melhorar a produtividade e eficiência dos negócios (BARNEWOLD e LOTTERMOSER, 2020).

Existem diversas características e meios de avaliar particulados. No campo da medição de vazão mássica, tem-se o exemplo das balanças integradoras, que medem a massa do material com o uso de sensores de pressão acoplados embaixo das correias transportadoras. Em abordagens não invasivas, existem os *soft sensors* (MOREIRA *et al.*, 2017; VÄYRYNEN *et al.*, 2013), varredura a *laser* (MIN *et al.*, 2020) e sensores ultrassônicos (VÄYRYNEN *et al.*, 2013). Para a avaliação granulométrica dos particulados, são comumente utilizadas técnicas de visão computacional, sobretudo com o uso de câmera (HAMZELOO *et al.*, 2014; MAERZ, 1998; NÚNEZ *et al.*, 2011) e varredura tridimensional a *laser* (ENGIN e MAERZ, 2019; ENGIN *et al.*, 2020; GE *et al.*, 2020). Silva *et al.* (2018) desenvolveram um analisador de pelotas de minério, em que o teor de magnetita é estimado por meio da medição de propriedades magnéticas do minério. Existem abordagens usando sensores hiperespectrais (COELHO *et al.*, 2019; MCQUILKIN e ENGELKE, 2019; OLIVEIRA, 2020), para análise da composição química de minério, porém as análises são feitas em laboratório, uma vez que há desafios para sua implementação no ambiente industrial.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de instrumentação, capaz de avaliar características das partículas de minério transportados via correia. O sistema proposto deve medir, em tempo real, de forma online, não invasiva e sem o uso de fontes externas de luz, o grau de fragmentação e de compactação, a vazão volumétrica e mássica e o tipo de material. Desse modo, essas informações podem ser lidas e utilizadas por sistemas automáticos, de maneira a ajustar o desempenho de processos e monitorar as condições de segurança da operação. Para tal, utiliza-se um *laser scanner* bidimensional, do tipo LiDAR, para escanear

a superfície do material. Para recepção dos dados medidos e efetuar os cálculos necessários é utilizada uma unidade de processamento de sinais, de forma que é possível classificar as variáveis medidas, utilizando técnicas de *machine learning* e, assim, avaliar as características do granulado transportado em correia.

1.2. Motivação

Na mineração existe uma demanda de implementação de sistemas automatizados de controle e otimização e, muitas vezes, as plantas não possuem instrumentos de medição robustos, precisos e de bom custo benefício, os quais são essenciais para o funcionamento adequado de sistemas automáticos (VÄYRYNEN *et al.*, 2013). Tem-se por exemplo o processo de peneiramento, em que, normalmente, o desempenho das peneiras é medido por meio de uma inspeção visual da granulometria do material transportado em correia. Tal medida expõe o operador a riscos, dado que podem ocorrer situações de eventuais projeções de material da peneira ou eventos similares.

Na inspeção visual a possibilidade de erros de medição é grande, visto que está atrelada ao nível de habilidade e acuidade visual do operador (ALBERTAZZI e SOUSA, 2018). A inspeção visual é usada também para detecção de materiais que provocam avalanches em silos, moegas e alimentadores, em que o operador avalia visualmente a condição do material e comunica a situação para sala de controle (OLIVEIRA, 2020).

No campo de análise granulométrica existem alternativas comerciais, tais como o Visio-Rock da Metso (GUYOT *et al.*, 2004), o WipFrag da WipWare (MAERZ, 1998; MAERZ *et al.*, 2018; NÚNEZ *et al.*, 2011), o BeltMetrics da Motion Metrics e o 3DPM da MBV System. No entanto, todas elas utilizam câmera, um instrumento que apresenta limitações em ambiente industrial devido à necessidade de uma iluminação externa, manutenção constante e problemas relacionados à poeira. Adicionalmente, o processamento de imagens exige um alto poder computacional para análise do *stream* de vídeo.

Neste trabalho é proposta uma alternativa que tem menor precisão na determinação da granulometria do material, no entanto, necessita de um menor poder computacional. Essa abordagem se torna vantajosa pelo fato que em algumas aplicações não é requerida grande precisão para avaliar o processo. Tem-se por exemplo o processo de peneiramento, que seu desempenho pode ser avaliado por meio da verificação da presença de materiais finos retidos na peneira. Os materiais finos deveriam atravessar a peneira e não permanecerem retidos. Assim, uma estimativa da medição, capaz de detectar a presença desses materiais, seria válida para avaliar o processo e promover uma tomada de decisão com eficiência.

Existem trabalhos que abordaram o tema da detecção de materiais com alta umidade, que são potenciais causadores de avalanche. Klippel *et al.* (2022) utilizaram câmera e técnicas de *deep learning* para classificar o material mediante sua capacidade de causar acidentes, enquanto Oliveira (2020), em testes laboratoriais, utilizou sensores hiperespectrais, os quais são

capazes de caracterizar com precisão a condição dos particulados. Todavia, existem desafios em relação ao uso do imageamento hiperespectral para coleta de informações de minério transportado em correia, como o alto custo (U\$ 100.000-200.000 por estação de monitoramento), digitalização linear e dificuldades de instalação (MCQUILKIN e ENGELKE, 2019). Posto isso, apesar dos trabalhos citados apresentarem abordagens capazes de avaliar o material com precisão, o presente trabalho propõe o método de avaliar a condição do minério por meio da varredura bidimensional a *laser*.

A vazão mássica é outra variável extremamente útil no quesito sistemas de controle. Contudo, ela é normalmente medida com o uso de balanças integradoras, instrumento de alto custo (entre R\$ 90.000,00 e R\$ 110.000,00), cuja precisão da medição é influenciada pela vibração, impacto, tensão e poeira, já que o medidor fica em contato direto com o mensurando (XIAO et al., 2010). Isso faz com que o equipamento requeira manutenções, o que reflete em aumento de custo operacional (MOREIRA et al., 2017). Por isso, é válida a implementação de abordagens não invasivas de medição da vazão mássica, de maneira que seja possível reduzir os custos em instrumentação. Além disso, em usinas de beneficiamento de minério pouco se utiliza balanças em fluxos intermediários da planta, de forma que a medição da taxa mássica é feita em pontos distantes dos alimentadores, os quais são, normalmente, pontos de atuação de sistemas automáticos. Isso corrobora com a necessidade do uso de um novo método de medição da vazão mássica (MOREIRA et al., 2017).

A classificação do tipo de rocha é outro campo de grande importância em muitas etapas das operações da mina. Determinando-se a litologia do mineral, as aplicações possíveis vão desde o planejamento de mina até o controle de processos, como o de moagem (CASALI et al., 2001; CHATTERJEE et al., 2010). As variações de diferentes litologias de minério e distribuição de tamanho afetam diretamente o consumo de energia e o rendimento dos moinhos AG e SAG e podem eventualmente levar a problemas operacionais (TESSIER et al., 2007). A energia empregada na operação do moinho poderia ser otimizada se os tipos reais de rocha e a dureza pudessem ser determinados, economizando recursos significativos e reduzindo produção de CO₂ (GALDAMES et al., 2017). Existem aplicações que classificam o tipo de minério utilizando visão de máquina (CASALI et al., 2001; GALDAMES et al., 2017; PEREZ et al., 2015; TESSIER et al., 2007) e utilizando medições de intensidade de terrestrial LiDARs (BURTON et al., 2011; HUMAIR et al., 2015). Apesar dos trabalhos supracitados conseguirem classificar tipos de materiais com alta acurácia, neste trabalho optou-se pelo uso do LiDAR bidimensional, devido as desvantagens do uso de câmera no ambiente industrial e ao alto custo dos terrestrial LiDARs. Além do custo, o LiDAR bidimensional tem outras vantagens em relação ao tridimensional, como a rapidez da velocidade de digitalização, o tamanho pequeno, o baixo consumo de energia, e o baixo custo de fabricação (LIU et al., 2022).

Embora existam, no estado da arte, métodos e sistemas para medição que avaliam características de granulados transportados por correia transportadora, de forma remota e não invasiva, este trabalho propõe o método de avaliação de todas as variáveis mencionadas, de

forma simultânea. Dessa forma, as informações medidas podem ser utilizadas por sistemas de controle automáticos, para ajuste do desempenho de processos e monitoramento das condições de segurança de operação.

1.3. Objetivos

Nesta seção são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos da proposta de desenvolvimento do dispositivo para avaliar características de granulado em correias transportadora por meio de LiDAR.

1.3.1. Objetivo geral

Desenvolver um sistema de instrumentação capaz de medir, em tempo real, de forma online, não invasiva e sem o uso de fontes externas de luz, o grau de fragmentação, volume, massa, tipo e a condição de materiais granulados, levando em consideração sua umidade.

1.3.2. Objetivos específicos

Este item apresenta os objetivos específicos desta pesquisa, descritos a seguir:

- desenvolver um algoritmo para aquisição e tratamento dos dados obtidos na varredura da superfície do material e que seja capaz de estimar as variáveis medidas pelo sistema;
- embarcar e enclausurar os sensores e a unidade de tratamento de sinais que seja robusta o suficiente para o ambiente industrial;
- efetuar testes para conceito de prova em laboratório;
- utilizar ferramentas de inteligência artificial para classificação dos dados.

1.4. Perguntas

Este item apresenta a formulação de algumas questões que motivaram o desenvolvimento do projeto e que surgiram ao longo da pesquisa.

- É possível estimar a presença de finos em uma correia transportadora por meio de um *laser scanner* bidimensional?
- É possível medir a taxa mássica de minério em uma correia trasportadora por meio de um *laser scanner* bidimensional?
- É possível detectar minério causador de avalanche em silos em uma correia trasportadora por meio de um *laser scanner* bidimensional?

- É possível classificar diferentes minérios utilizando um $laser\ scanner\$ bidimensional?
- É possível construir um protótipo robusto o suficiente para uso em campo, capaz de realizar as medições previstas nas questões 1,2, 3 e 4?

1.5. Organização do texto

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é realizada a revisão bibliográfica contendo trabalhos que já abordaram os temas de análise granulométrica, medição de vazão mássica de material transportado via correia, detecção de material que pode causar avalanches e classificação de tipo de minério. Já na Seção 3 é abordada a teoria relacionada a sistemas LiDAR. Na Seção 4 são apresentados os possíveis problemas que podem ser detectados com o LiDAR bidimensional. Na Seção 5, são apresentados os materiais e métodos e os resultados na Seção 6. Por fim, na Seção 7 são apresentadas as considerações finais.

2. Trabalhos relacionados

Nesta Seção é apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos acadêmicos que descrevem métodos e equipamentos para análise granulométrica, medição de vazão mássica, detecção de materiais que provocam avalanche e classificação de litologia de minério. Também são descritas algumas propostas disponíveis em documentos de patentes que tratam sobre os temas supracitados.

2.1. Trabalhos acadêmicos

2.1.1. Análise granulométrica

Engin e Maerz (2019) utilizaram a tecnologia LiDAR para determinar a distribuição do tamanho de partículas de agregados de construção civil. Com o uso de um LiDAR terrestre Leica ScanStation II efetuaram a varredura a *laser* dos materiais em pilha a fim de se obter uma nuvem de pontos 3D, a qual descreve a superfície dos agregados. Dessa forma, desenvolveram um algoritmo capaz de realizar a análise da nuvem de pontos obtidas pelo instrumento de modo a obter o modelo de cada partícula e seu tamanho, levando em consideração sua altura e a proporção da sua área em relação à área total da superfície escaneada. Utilizando a mesma tecnologia, porém com um algoritmo diferente, Engin *et al.* (2020) mediram a granulometria de rochas fragmentadas e compararam o resultado do uso do LiDAR terrestre com o obtido utilizando o software WipFrag Granulometry System para o processamento de imagens.

Campbell e Thurley (2017) e Ge *et al.* (2020) também fizeram o uso do LiDAR terrestre, de forma que utilizaram-no para mensurar o tamanho de fragmentos em uma mina subterrânea. Kaartinen e Tolonen (2008) apresentam a abordagem de determinar o tamanho de partículas de minério, baseada na combinação de uma balança, instalada na correia transportadora, e um *laser scanner* 3D.

Thurley e Andersson (2008) desenvolveram um sistema de avaliação de tamanho de pelotas de minério, baseado na morfologia matemática da superfície tridimensional de cada amostra. As coordenadas 3D foram obtidas usando o princípio da triangulação, por meio da junção de uma câmera e um laser bidimensional, instalados acima da correia transportadora.

Liu *et al.* (2020) elaboraram um trabalho semelhante à patente U.S. 9.418,309, em que utilizando as coordenadas tridimensionais obtidas por imagens 3D, avaliaram a angularidade de agregados transportados em correia. Com o uso de uma câmera 3D binocular Gocator 3110, instalada perpendicularmente ao alvo, aplicaram o método chamado *Virtual Cutting* para determinar a angularidade das partículas.

Em Hamzeloo *et al.* (2014), uma técnica de visão de máquina é apresentada para avaliar tamanho de partículas oriundas do circuito de britagem de um concentrador de cobre. Para avaliar o tamanho das partículas, as imagens obtidas foram processadas utilizando uma rede

neural artificial com a técnica Análise do Componente Principal (PCA).

Maerz (1998) usou métodos ópticos de processamento digital de imagens para determinar tamanho e formato de partículas de agregados, a fim de complementar o processo de peneiramento, ou seja, a proposta do trabalho é utilizar métodos ópticos para classificar particulados em cenários que o uso da peneira é inviável ou improdutivo. Para tal, foi utilizado o software WipFrag Granulometry System para se obter o formato e tamanho dos agregados, bem como feito por Núnez *et al.* (2011).

Trabalhos envolvendo processamento de imagens 2D para análise granulométrica é um tema bastante recorrente como pode-se perceber nos trabalhos propostos por Maerz *et al.* (2018), Schleifer e Tessier (2018), Salinas *et al.* (2005), Chang e Chung (2012), Al-Thyabat *et al.* (2007), Mora e Kwan (2000) e Aldrich *et al.* (2010).

Williams *et al.* (2000) investigaram técnicas não convencionais para avaliação de tamanho de agregados. Fizeram o uso de sensores tomográficos não invasivos em torno de uma correia transportadora, a qual carrega sólidos particulados. Desse modo, a ferramenta denominada tomografia de capacitância elétrica (ECT) é utilizada para fornecer dados e análises para avaliação do tamanho das partículas transportadas.

2.1.2. Vazão volumétrica e mássica

Min et al. (2020) utilizaram uma câmera e um laser scanner 2D para medir a vazão volumétrica de sal de potássio transportado por meio de uma correia transportadora. Dessa forma, a câmera é usada para relacionar as alturas da superfície do material, medida pelo laser scanner e a distância entre cada medição. Para cálculo do volume é determinada as áreas da seção transversal, obtidas entre cada varredura, e pelo método da triangulação é calculado a vazão volumétrica do material transportado. Além disso, uma rede neural artificial é usada para corrigir erros de medição ocasionados pela vibração da correia transportadora, de modo que foi obtido um erro inferior a três por cento. Fojtík (2014) também utilizou um laser scanner 2D e o método da triangulação para medir o volume de toras de madeiras, transportadas via correia.

Em Nguyen *et al.* (2013) é apresentado um método de medição do volume de minério disposto em pilha, utilizando *laser scanner* 3D ou *terrestrial* LiDAR. O método consiste em obter os dados medidos pelo instrumento durante a varredura da pilha, os quais estão no formato de nuvem de pontos e processá-los, de modo a reduzir os ruídos da medição. Com o uso do software Geomatric Studio é feito o modelo 3D da pilha e calculado seu volume.

Väyrynen *et al.* (2013) realizaram um estudo entre diferentes métodos de medição de vazão mássica de material transportado via correia. O primeiro método abordado foi o desenvolvimento de um *soft sensor* para medir vazão mássica, que por meio de um transdutor de potência e a geometria da correia, é usado um modelo não linear para estimar a vazão mássica. Esse método é abordado também por Moreira *et al.* (2017) em uma correia transportadora de minério de carga circulante, obtendo-se resultados satisfatórios. O uso de perfilômetro a *laser*

também foi abordado por Väyrynen *et al.* (2013), em que a vazão volumétrica é calculada por meio das alturas da superfície do material transportado. Além disso, foram testados o sensor ultrassônico, o qual é baseado no *time of flight* do pulso ultrassônico, de maneira que a vazão volumétrica é medida de forma parecida ao perfilômetro a *laser*.

2.1.3. Detecção de material que provoca avalanche

Oliveira (2020) utilizou aparelhos de Espectroscopia de Refletância Field Spec 4 Hi-Res NG para análise do espectro de amostras de minério oriundas da usina de Carajás. Em testes laboratoriais, 38 amostras foram submetidas à análise espectral, sendo que 24 eram amostras de minério com alta umidade, os quais podem causar avalanches em silos, moegas e alimentadores. As amostras foram classificadas em três níveis: (i) não satisfatórias, em que são as potenciais causadoras de avalanche, ou seja, alta presença de óxido de alumínio (AlOH), que possui alta afinidade e capacidade de absorção de água; (ii) amostras intermediárias que não representam risco potencial de avalanche; e (iii) amostras satisfatórias, as quais possuem alto teor de hematita friável (HF) e não promovem risco de avalanches.

Klippel *et al.* (2022) apresentaram um dispositivo de borda, cujo intuito é detectar, na correia transportadora, material potencial causador de avalanche. Para isso, utilizaram técnicas de visão de máquina, em que utilizaram um modelo de rede neural convolucional para classificar o minério transportado. Dado que o minério potencial causador de avalanche tem mais umidade e sua aparência tende a ser brilhante, enquanto o material seco tende a ser mais opaco, utilizaram processamento de imagens para caracterizar o minério. Com uma rede neural convolucional classificaram o material transportado como "minério bom"ou "minério ruim", de maneira que obtiveram uma acurácia de 91%.

Dado que existe uma série de desafios para a implementação do sensoriamento hiperespectral em indústria e que o processamento de imagens requerem alto poder computacional, neste trabalho é apresentado o método de avaliação da condição de material granulado, por meio de um LiDAR 2D. Desse modo, por meio de medições geométricas e pela análise da intensidade de reflexão do sinal do pulso de *laser*, seria possível a detecção do material potencial causador de avalanche.

2.1.4. Classificação de tipo de minério

Um dos primeiros trabalhos que abordou o tema de classificação de tipo de minério foi publicado por Oestreich *et al.* (1995), em que foi desenvolvido um sensor de cor, baseado no uso de uma câmera, uma placa de captura e um computador. Foi desenvolvido um algoritmo capaz de avaliar a cor do material, sendo que utilizaram um vetor de cores para estimar a composição de uma mistura binária de calcopirita (amarelo acobreado) e molibdenita (cinza escuro). Tratase de um problema relativamente simples, devido o contraste de cor muito alto entre as duas amostras (TESSIER *et al.*, 2007).

Tessier *et al.* (2007) desenvolveram um sistema de instrumentação baseado em visão de máquina, capaz de estimar, de forma online, a composição de minério ROM (*run-of-mine*) transportado via correia. O método foi testado utilizando minerais de níquel, os quais são muito heterogêneos e de coloração similar. Para tal, propuseram um algoritmo capaz de analisar a coloração e a textura do material, utilizando Análise do Componente Principal e Análise da Textura *Wavelet*. O sistema foi capaz de classificar com êxito cinco tipos diferentes de minério seco, no entanto não obteve muito sucesso para rochas molhadas, devido ao fato que o material molhado tende a refletir a luz oriunda da iluminação que compõe o sistema de instrumentação.

Em Perez et al. (2015) é proposto um método para classificação de litologia de rochas, baseado em análise de imagens 2D. Utilizou-se uma câmera instalada acima de uma correia transportadora e um algoritmo de processamento de imagens, o qual utiliza de sub-imagens para caracterizar a litologia de diferentes minérios, com o uso de um classificador SVM. Foram testeados dois tipos de datasets, o proposto por Tessier et al. (2007), em que classifica cinco tipos de minério de níquel e o proposto por Perez et al. (2011), o qual utiliza sete tipos de minério de cobre.

Galdames *et al.* (2017) utilizaram câmera e *laser* para gerar imagens 3D de minério transportado via correia e assim classificar tipos de minério de cobre, levando em consideração sua coloração e textura. As imagens são tesseladas em sub-imagens que são classificados usando recursos de cor e textura 3D. Utilizaram classificador SVM para essa tarefa, de maneira que conseguiram caracterizar cinco tipos de minério de cobre, obtendo-se uma acurácia de 99,24% em relação ao *dataset* utilizado.

Foi utilizada a medição de intensidade de um *terrestrial* LiDAR para estudar a relação da quantidade de energia refletida pelo sensor com a litologia de rochas, em Burton *et al.* (2011). Dessa forma, por meio dos dados de intensidade foram capazes de classificar diferentes tipos de rochas, visto que existe uma relação entre a refletividade do material e a energia eletromagnética emitida/recebida. Além disso, realizaram experimentos com materiais úmidos e comprovaram que a refletância se torna menor quando existe a presença de água. Assim, puderam constatar que o dado de intensidade do LiDAR é sensível a diferentes litologias, tanto em rochas secas e levemente úmidas, podendo ser uma alternativa viável para classificação de tipos de rochas em locais remotos e de difícil acesso.

Franceschi et al. (2009) utilizaram o terrestrial LiDAR para escanear rochas sedimentares e com o uso do dado de intensidade do laser scanner foi possível diferenciar argila de calcário. Foram feitos experimentos com materiais secos e úmidos, indoor e outdoor, em que percebeu-se a diferença do sinal de intensidade para cada configuração testada. Já em Hartzell et al. (2014), foi utilizada a combinação de sensoriamento hiperespectral e terrestrial LiDAR para classificação de rochas. Os resultados indicaram que tipos de rocha podem ser identificados com sucesso com dados de intensidade do terrestrial LiDAR e com imagens passivas, oriundas de um dataset multiespectral.

2.2. Patentes

2.2.1. Análise granulométrica

A patente americana US8233667B2, depositada por Helgason *et al.* (2012), apresenta um equipamento e um método de medição tridimensional do tamanho, formato e composição mineral de partículas de rocha. O equipamento proposto é composto por duas câmeras e um laser que, utilizando métodos ópticos e espectrofotométricos, efetuam a visão de máquina tridimensional dos materiais transportados em correias transportadoras.

A patente americana US9418309B2, depositada por Bilandi *et al.* (2016), descreve um método e um aparelho para avaliação de atributos dimensionais de materiais fragmentados. O método é baseado no recebimento de imagens bidimensionais de regiões de interesse, as quais contém o material a ser analisado. Assim, é realizado o processamento da imagem 2D, a fim de identificar características do material e obter a nuvem de pontos da área de interesse por meio de um sensor de imagem 3D. Desse modo, ao identificar as coordenadas 3D das regiões, são realizadas as estimativas do volume e tamanho de cada material fragmentado.

Plate e Pankratz (2000) desenvolveram a patente americana US6061130A, que apresenta um dispositivo capaz de determinar a distribuição de tamanho e caracterizar o formato de materiais particulados. O aparelho consiste em uma seção de medição optoeletrônica que tem uma fonte de luz e um dispositivo de coleta de imagem, alinhados um ao outro, de forma que medem as partículas que caem de um canal de medição, por influência gravitacional. Assim, uma gravação digital das áreas de projeção da silhueta das partículas é usada para analisar as partículas.

A patente americana US10783610B2, publicada por Bilandi *et al.* (2020), apresenta um método e aparelho para processamento de imagens de materiais fragmentados, transportados em correia, de forma a realizar sua análise granulométrica. Com o uso de uma GPU, utiliza-se uma rede neural convolucional, previamente treinada, para processar as imagens provenientes de uma câmera 3D e, assim, é possível estimar a distribuição de tamanho das partículas.

McQuilkin e Engelke (2019) depositaram a patente US10222260B2, também americana, em que é apresentado um sistema de sensoriamento remoto, que utiliza de imageamento espectral composto por uma matriz de filtros espectrais e de imagens capturadas para detectar presença, localização e quantidade de objetos previamente definidos como alvos. A invenção pode ser utilizada na indústria da mineração, de forma a fornecer a composição de minérios transportados em correias.

A patente US6960756B1, depositada por Penumadu *et al.* (2005), mostra um sistema e método para medir o tamanho, forma e distribuição granulométrica de partículas, usando um sistema óptico baseado em análise de imagem digital, de forma que as informações de tamanho e forma são obtidas em tempo real. Para tal, utiliza de hardware e software para o dimensionamento de partículas, uma câmera com varredura progressiva e zoom acionado por

um motor de passo, um alimentador vibratório e um sistema de iluminação. Assim, o sistema de iluminação projeta as partículas em queda livre no plano de imagem da câmera, de forma que os *frames* obtidos são enviados para um software que faz a contagem do número de partículas e bem como seu tamanho e formato.

Conforme mostrado no estado da arte e no estado da técnica, a maioria das abordagens para medir granulometria são utilizando os *terrestrial* LiDAR, em aplicações de frente de lavra e processamento de imagens. Neste trabalho é apresentada uma técnica de avaliar o grau de fragmentação de particulados, em que utiliza-se um LiDAR bidimensional. Por meio do método apresentado não é obtida uma curva granulométrica dos materiais escaneados. É medida uma estimativa do grau de fragmentação do material, avaliada por meio da análise da rugosidade da superfície do material.

2.2.2. Vazão volumétrica e mássica

Heidepriem (2012) desenvolveu a patente alemã EP2246673B1, que propõe um método e dispositivo capaz de medir o volume de materiais granulados transportados em correia por meio de sensoriamento remoto. Para tal, utiliza-se um *laser scanner* bidimensional instalado de forma paralela ao alvo, o qual efetua uma varredura do material transportado e uma vez obtidos os dados das alturas do *laser scanner* em relação ao material, é calculado o volume de cada seção em que foi feita a varredura.

A patente chinesa CN102721367B, depositada por Tiejun *et al.* (2012), sugere outra forma para medir o volume de materiais dispostos em pilha, em que é apresentado um método para medir volume com base em varredura tridimensional a laser. Para isso, utiliza-se um sistema de trilhos, controlado por um motor de passo para movimentar o *laser scanner* 1D, de modo que seja feita a varredura completa do material. Um computador mestre é usado para controle do motor de passo e receber os dados de coordenadas do *laser scanner*, de maneira que é feita a nuvem de pontos do material escaneado e por meio dela é calculado o seu volume.

A patente chinesa CN104534990A, publicada por Jiping e Yi (2012), mostra um sistema de sensoriamento remoto para calcular o volume de materiais granulados. Assim como em EP2246673B1, utiliza-se um *laser scanner* 2D para medir as alturas do dispositivo em relação ao material. Esses dados são enviados para um servidor, em que se calcula a área da seção transversal em que se ocorreu a varredura e relacionando-se a área obtida com a velocidade da correia transportadora, medida por meio de um equipamento proposto na invenção, é possível calcular o volume do material transportado.

A patente chinesa CN102967260A, depositada por Jianjiu *et al.* (2013), apresenta um método e sistema usado para medir volume e densidade de pilhas de materiais em pó dispostos em caçambas de veículos. O método faz o uso de lasers de varredura unidimensional, paralelamente fixados acima da caçamba de forma a efetuar uma varredura da superfície do material nos eixos y e z. Relacionando a frequência de obtenção das alturas das pilhas por meio das

medições dos lasers com a velocidade do veículo, a qual representa o eixo de coordenadas x, é montado um sistema de coordenadas tridimensional de modo a obter o modelo da pilha de material. Efetuando-se a integral dupla da função do modelo obtido, mensura-se o volume da pilha de material. O método faz uso dos dados obtidos na medição do volume e dos de massa, medidos por meio de uma balança de veículos, para mensurar a densidade do material.

A patente alemã, DE102008017671A1, depositada por Kormann (2009), mostra um dispositivo capaz de mensurar a vazão mássica de produtos agrícolas, transportados via correia. A invenção é composta de uma balança de correia, para medir a massa de material transportado, um *laser scanner* para varredura da superfície do material transportado e um computador para relacionar a massa e o volume medido, de forma a calcular a densidade do material e consequentemente sua vazão mássica. A patente americana, US8347709B2, também desenvolvida por Kormann (2013), descreve um dispositivo cuja função é medir a vazão mássica de safras de colheitas. A invenção é uma melhoria da patente DE102008017671A1, em que soluciona os problemas na medição da massa quando a correia está pouco carregada.

Apesar de existirem aplicações usando *laser scanner* 1D e 3D para medir vazão mássica /volumétrica, a maioria dos trabalhos mencionados no estado da arte e da técnica utilizam o *laser scanner* 2D. Neste trabalho também é usado o LiDAR 2D, em que, por meio da nuvem de pontos obtida pelo dispositivo, calcula-se a área da seção transversal escaneada. Com esse dado, é possível calcular o volume/massa do material escaneado e as vazões mássica e volumétrica, no caso de materiais transportados via correias.

2.2.3. Classificação do tipo de minério

A patente americana US20190107483A1 (SILVERSIDES e ANDDEREK WYMAN, 2011) apresenta um sistema para classificar tipos de rocha em um corpo de rocha. O método compreende as etapas de obtenção de dados espectrais de uma uma região da superfície do corpo de rocha. Por meio dos dados espectrais é classificada a litologia da rocha. Para tal, são utilizados uma câmera e um sensor espectral, de maneira que é possível escolher a região a ser analisada e coletar os dados de espectro.

A patente chinesa, CN104989392B, desenvolvida por Lihong *et al.* (2015), apresenta um método de classificação de partículas de rochas sedimentares. O método utiliza raio X e análise de difração para caracterizar a litologia e a composição mineralógica do material.

Foi utilizada a análise de imagens para classificar o conteúdo mineral de carvão e minério em Adel *et al.* (1992), em que uma imagem proveniente do *stream* de vídeo é obtida. A imagem é digitalizada e os níveis de cinza são atribuídos a pontos ou áreas na imagem de vídeo. Dessa forma, a distribuição dos níveis de cinza para a imagem fornece uma indicação da pureza dos minerais na amostra de minério. A invenção é capaz de determinar o teor de fosfato e a razão de cálcio em minérios de fosfato.

Uma abordagem parecida com a proposta do presente trabalho, a patente CN104134074A,

depositada por Wanli e Binhai (2014), apresenta um método de identificação de rochas e carvão, baseado em varredura a *laser*. Os dados de distância e intensidade medidos pelo sensor são utilizados para avaliar o tipo de rocha, em que é feita uma relação entre esses dois dados. Utilizando um *dataset* que contém as medições de distância e intensidade de diferentes tipos de rocha e carvão, o sistema compara os dados medidos com os do *dataset* e assim identifica o tipo de material que teve sua superfície escaneada.

A patente WO2020062470A1, depositada por Lei *et al.* (2018), mostra um método de avaliação de rochas de carvão baseado no imageamento da superfície do material, por meio dos dados de intensidade medidos por um LiDAR de estado sólido. O sistema é composto pelos seguintes módulos: varredura da superfície do material, transmissão de sinal, armazenamento de dados, imageamento, fusão de imagem e reconhecimento de imagem. O método utiliza uma rede neural convolucional para analisar a textura das imagens geradas e assim reconhecer o tipo de carvão.

Conforme observado no estado da arte e no estado da técnica, os dispositivos mais utilizados na classificação de tipo de material são o *terrestrial* LiDAR e a câmera. Devido as desvantagens do uso de câmera em indústria e o alto custo dos *terrestrial* LiDAR, neste trabalho é apresentada a proposta de utilizar o dado de intensidade de reflexão, oriundo de um LiDAR 2D para classificar materiais de diferentes tipos.

3. Princípios do LiDAR

3.1. Introdução

Laser radar, também conhecido como LiDAR, sigla para light detection and ranging, é um tipo de tecnologia de sensoreamento remoto, do tipo ativa, em que utiliza ondas eletromagnéticas (EM) de comprimento de onda do tipo óptico e infravermelho, de forma que o sinal de uma onda eletromagnética é enviado, refletido no alvo e recebido de volta (MCMANAMON, 2019). A tecnologia teve seu advento no início dos anos 60, logo após a invenção do laser. Devido ao desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, ela tornou-se uma tecnologia relativamente barata, confiável e de rica fenomenologia, tornando-se competitiva em comparação a tecnologias alternativas de sensores, como sensores eletro-ópticos passivos ou radar de micro-ondas (MOLEBNY et al., 2016).

Existem dois tipos de sistemas de sensoriamento remoto: passivos e ativos. Sistemas passivos medem a radiação solar refletida no visível, infravermelho próximo e no infravermelho médio ou radiação solar absorvida e reemitida em comprimentos de onda infravermelhos térmicos. Já sistemas ativos, que é onde o sistema LiDAR se encaixa, emitem radiação em direção ao alvo usando sua própria fonte de energia e detectam o radiação refletida daquele alvo. Uma vantagem importante para os sensores ativos é sua capacidade de obter medições independentemente das condições de iluminação solar e amplamente independente das condições meteorológicas (DONG e CHEN, 2017).

O LiDAR tem uma vasta gama de aplicações, tanto em setores militares quanto civis. Segundo McManamon (2019) as aplicações são categorizadas em cinco tipos: geometria, caráter da superfície, ruído de planta, efluentes e movimento bruto . A detecção geométrica caracteriza a forma do objeto em uma, duas ou três dimensões. Caracterização de superfície inclui rugosidade, a distribuição espectral e direcional de energia e propriedades de polarização. Os ruídos de plantas incluem uma variedade de vibrações e movimentos cíclicos atribuídos à operação do alvo. Estes podem ser, por exemplo, variáveis associadas a motores de pistão ou turbina, transmissões, ou outros componentes móveis. Efluentes incluem ar de exaustão, gases, e desperdício de calor. Os movimentos brutos são movimentos do sistema, incluindo translação, rotação ou articulação do sistema. Todos esses tipos de objeto discriminantes podem ser detectados por várias formas de sistemas LiDAR (MCMANAMON, 2019).

3.2. Funcionamento

McManamon (2019) afirma que um sistema LiDAR é formado por basicamente três componentes: A fonte de *laser*, o receptor e o sistema óptico. Para a fonte, são utilizadas tanto *lasers* de ondas pulsadas quanto contínuas, de forma que a distância em relação do dispositivo até o alvo (*range*) é medida por meio do cálculo do tempo de ida e volta de um pulso de luz

curto do laser para o alvo e de volta para o receptor (WEHR e LOHR, 1999). Na Figura 3.1 são mostradas as amplitudes dos sinais de luz transmitidos (A_T) e recebidos (A_R). O cálculo da distância, resolução e distância máxima podem ser observados nas Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

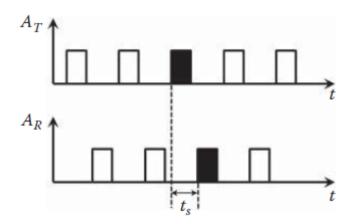


Figura 3.1: Amplitudes dos sinais de luz transmitidos (A_T) e recebidos (A_R) . Em que, t_s é o tempo de viagem do pulso do *laser*. Fonte: Chang e Chung (2012)

$$R = \frac{1}{2}ct_s,\tag{3.1}$$

$$\Delta R = \frac{1}{2}c\Delta t_s,\tag{3.2}$$

$$R_{max} = \frac{1}{2}c\Delta t_{s_{max}}. (3.3)$$

Em que, R é a distância entre o medidor e o mensurando, c a velocidade da luz e t_s o tempo de viagem do pulso a *laser*. O cálculo da distância por meio do tempo de viagem é conhecida como técnica *time of flight* (ToF) e a divisão por dois é feita apenas para adquirir metade da distância total percorrida pela luz, ou seja, a distância até o objeto (SÖDERBERG, 2019).

Sistemas LiDAR possuem um *range* mínimo dentro do qual eles não podem registrar uma medição precisa. Em geral, o alcance máximo do LiDAR depende de alguns fatores, tais como a especificação do equipamento, propriedades do material alvo e a geometria da superfície (BOTH, 2011).

3.3. Medição de intensidade

A intensidade (também referida como remissão ou amplitude) é definida como a razão entre a intensidade da luz refletida e da luz emitida. É influenciada principalmente pelo grau de reflexão do objeto refletor. A refletância varia com as características material, uma vez que materiais têm refletâncias diferentes. Consequentemente, as intensidades podem ser informações

úteis para classificar superfícies de diferentes materiais (REYMANN e LACROIX, 2015; SONG *et al.*, 2002). Pode-se dizer que a intensidade representa características espectrais de reflexão do alvo e pode ser usado como uma característica importante para classificação do alvo (CHUAN *et al.*, 2020; YAN *et al.*, 2020).

A medição da intensidade tornou-se um tema de muito interesse dentro do campo de sensoriamento remoto, pois apresenta potencial para uma infinidade de aplicações, incluindo melhorias na classificação de cenários, bem como a possibilidade de distinguir materiais com diferentes propriedades reflexivas ou composicionais (BURTON et al., 2011). Existe uma vasta gama de aplicações que utilizam a medição de intensidade, como registro de dados, extração de recursos, classificação, análise de superfície, segmentação e detecção e reconhecimento de objetos. No entanto, há também uma série de variáveis que podem gerar ruído na medição, para as quais a intensidade está relacionada, incluindo parâmetros relacionados à condições ambientais, geometria de aquisição de dados, ângulo de reflexão, vibração, movimento do alvo e os próprios sensores. Para contornar esse problema, várias técnicas têm sido desenvolvidas para calibrar, normalizar ou corrigir os valores de intensidade registrados, para assim, produzir valores que são mais úteis e mais intimamente relacionados com as características reais da superfície (KASHANI et al., 2015; PFEIFER et al., 2007; SONG et al., 2002).

O modelo teórico da equação de *range* do LiDAR, mostrada na Equação 3.4, relaciona a potência ótica emitida com a potência transmitida e outros parâmetros relacionados ao sistema, tais como a geometria de aquisição e características do ambiente e do alvo (KASHANI *et al.*, 2015).

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \eta_{atm} \eta_{sys} \sigma}{4\pi R^4 \beta_t^2}.$$
 (3.4)

Em que, P_r denota a potência ótica emitida, P_t a potência ótica transmitida, D_r o diâmetro de abertura do receptor óptico do sensor, σ a seção transversal do alvo, η_{atm} o fator de transmissão atmosférica, η_{sys} o fator de transmissão do sistema, R o range e β_t a largura do feixe. A seção transversal do alvo que descreve suas características é dada pela Equação 3.5 (KASHANI et~al., 2015).

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \rho A_t. \tag{3.5}$$

Sendo que, ρ é a refletância da superfície do material, Ω o ângulo de reflexão e A_t a área do alvo. Em uma superfície lambertiana (a superfície com características ideais de reflexão difusa) a potência ótica refletida é dada pela Equação 3.6 (JELALIAN, 1992; LIU *et al.*, 2022).

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \eta_{atm} \eta_{sys} \rho}{4R^2} cos \alpha_i \tag{3.6}$$

Em que, α_i representa o ângulo de incidência do feixe ao alvo. Os sistemas de varredura a laser de *multi-echo* são projetados para registrar mais de uma reflexão do pulso de *laser*. Eles

registram a potência do retroespalhamento do pulso em função do tempo, $P_r(t)$, e transforma essa função em um vetor discretizado (MALLET e BRETAR, 2009). LiDARs *single echo* ou *multi-eco* operam de acordo com esse princípio, mas a função $P_r(t)$ é processada internamente para extrair um ou vários pontos de reflexões (REYMANN e LACROIX, 2015). Na Equação 3.7, proposta por Mallet (2010), é apresentada a função de potência recebida, $P_r(t)$, modelada para vários ecos, em uma superfície N lambertiana.

$$P_r(t) = D_r^2 \eta_{sys} \rho_m cos\alpha \sum_{i=1}^N \frac{exp(-2R_i \eta_{atm})}{4R_i^2} P_t$$
(3.7)

Dado que, *t* denota o tempo e *R_i* o *range* referente ao i-ésimo obstáculo. Nos casos onde as distâncias não excedem algumas dezenas de metros e a atenuação atmosférica é insignificante, a intensidade é retornada, de maneira que não existe o efeito de divergência do feixe de *laser*. Assim, depende apenas da refletividade da superfície, que é proporcional ao inverso do *range* ao quadrado. Para superfícies puramente lambertianas, a intensidade retornada é proporcional ao cosseno do ângulo do feixe com a normal à superfície. Porém, nos casos gerais, a potência recebida é determinada pela Função de Distribuição Bidirecional de Refletância, que é definida por meio das interações do feixe com a superfície. Essas interações abrangem espalhamento, difusão, reflexão e absorção, e dificilmente pode ser modelado para a variedade de superfícies que podem ser escaneadas (HAID, 2016; REYMANN e LACROIX, 2015).

Segundo Kashani *et al.* (2015), os fatores que interferem na medição da intensidade podem ser divididos em quatro categorias principais: (i) características da superfície alvo; (ii) geometria da aquisição de dados; (iii) efeitos instrumentais e (iv) efeitos ambientais.

3.3.1. Características da superfície alvo

Nessa categoria, os fatores que influenciam a medição da intensidade são a refletância (ρ) e a rugosidade (η) da superfície do alvo. Por definição, o valor de intensidade é proporcional à refletância, uma vez que uma superfície altamente refletiva retornará mais energia a cada pulso (KASHANI *et al.*, 2015). Nos casos de superfícies altamente reflexivas, como espelhos, vidros e água, ocorre um efeito especular ou *mirror efect*. Nele, o pulso é refletido em mais de uma superfície, causando alterações na medição de *range* e de intensidade. Os efeitos ruidosos que ocorrem em superfícies altamente reflexivas são maiores quando o sensor está muito afastado do alvo (LICHTI *et al.*, 2005). Vale ressaltar que a refletividade das rochas é controlada por uma combinação complexa de variáveis, incluindo umidade, composição de grãos individuais e tamanho de grão (BURTON *et al.*, 2011). A refletância é um parâmetro de interesse em trabalhos que realizam a calibração da medição de intensidade utilizando radiometria, conforme mostrado nos trabalhos de Jin *et al.* (2020); Kashani *et al.* (2015); Pfeifer *et al.* (2007) e Kukko *et al.* (2008).

A rugosidade da superfície determina o tipo de reflexão que o pulso de *laser* terá, por

exemplo, se será do tipo especular ou difusa (KASHANI *et al.*, 2015). Entretanto, Kukko *et al.* (2008) verificaram que existem características além da rugosidade, que desempenham um papel mais forte no ângulo de incidência do *laser*. Comprovou que a variação da intensidade é alta em partículas de alta granulometria (1–2 *cm*), em comparação ao diâmetro do *laserbeam*, enquanto que em partículas finas, essa alteração na medição é mínima.

3.3.2. Geometria da aquisição de dados

Fatores relacionados à geometria de aquisição de dados, como *range* (*R*) e ângulo de incidência (α), ou seja, o ângulo entre o feixe de laser emitido e a superfície do alvo normal, influenciam muito a intensidade do LIDAR. Trabalhos utilizam esses dois fatores para calibrar as medições de intensidade, como mostrado em Kukko *et al.* (2008); Yan *et al.* (2020) e Jin *et al.* (2020). A principal influência do *range* na intensidade é o fato de que a força do pulso diminui com a distância (KASHANI *et al.*, 2015). Isso mostra que em aplicações que o percurso do *laser* é curto, o *range* pouco interfere na medição de intensidade (REYMANN e LACROIX, 2015). Em aplicações de TLS (*terrestrial laser scanning*) e ALS (*airborne laser scanning*), essa variável se torna um principal fator de correção, dado que o pulso percorre longas distâncias (KASHANI *et al.*, 2015).

O ângulo de incidência influencia diretamente na intensidade, visto que quanto maiores, menos a energia do laser é recebida, dado que ela é retroespalhada em direção ao receptor, reduzindo assim potência óptica. Além disso, quando o feixe de laser atinge uma superfície de forma oblíqua, aumenta o retroespalhamento do feixe de *laser* (KASHANI *et al.*, 2015). Kukko *et al.* (2008) comprovaram que o efeito é significativo para ângulos de incidência maiores que 20° e mais forte para alvos brilhantes. Na Figura 3.2 é mostrado o efeito do *range* (R) e do ângulo de incidência (α) na medição da intensidade.

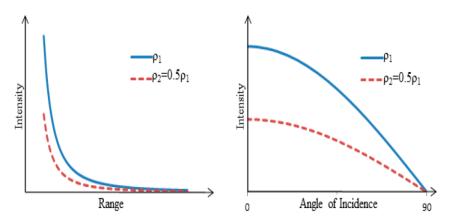


Figura 3.2: Relação teórica entre intensidade e range(R) e ângulo de incidência (α) para materiais de diferentes refletâncias (ρ_1 e ρ_2). Fonte: Kashani et~al.~(2015)

3.3.3. Efeitos instrumentais

Os efeitos instrumentais resultam em diferentes medições de intensidade do mesmo alvo quando diferentes sensores são usados. O tamanho da abertura, o comprimento de onda, divergência do *laserbeam* e potência emitida variam entre os *laser scanners* e podem influenciar a medição de intensidade (KASHANI *et al.*, 2015).

3.3.4. Efeitos ambientais

Em aplicações de TLS e ALS fatores atmosféricos exercem grande influência na intensidade, já que a energia do laser é atenuada quando atravessa a atmosfera, devido ao espalhamento e absorção dos fótons de *laser* (YAN *et al.*, 2020). Outro efeito ambiental é a umidade. Burton *et al.* (2011) estudou o efeito da umidade em rochas e verificou que a umidade reduz valores de intensidade. Kaasalainen *et al.* (2008) comprovaram que a umidade pode causar uma redução de 30 a 50% na refletância de materiais de construção, enquanto Jin *et al.* (2020) criaram um modelo matemático para determinar a umidade de areia utilizando *terrestrial* LiDAR, mostrando que a medição de intensidade pode ser uma alternativa para estimar a umidade de materiais.

3.4. Tipos de sistemas LiDAR

O LiDAR 1D, também conhecido como *range-only*, mede apenas a distância em uma dimensão. O sistema é muito usado em situações que a orientação do objeto é dada a *priori* e é amplamente utilizada a combinação de LiDARs 1D de alta resolução a fim de se criar uma imagem 2D (MCMANAMON, 2019).

Existem sistemas LiDAR 2D do tipo *scanner*, os quais promovem uma varredura bidimensional com o auxílio de um motor rotativo que possibilita a coleta de amostras contínuas conforme está girando. São equipados com codificadores rotativos para serem capazes de mapear uma amostra de laser em um ângulo rotativo. Fazendo isso, é possível adquirir uma nuvem de pontos de amostras representadas no plano. Uma vez que não existe nenhum campo de visão vertical para esses sensores, eles não são capazes de representar o ambiente circundante de forma tridimensional (SÖDERBERG, 2019).

LiDARs 3D do tipo *scanner* possuem campo de visão vertical, sendo que para obtê-lo são usadas diferentes abordagens. Velodyne, líder de mercado, atualmente usa 64 lasers em seu principal produto, o HDL-64E, com ângulos igualmente espaçados entre cada emissor de laser. Outros variantes usam espelhos para apontar os feixes de laser, a fim de ganhar campo de visão vertical (SÖDERBERG, 2019). LiDARs tridimensionais têm todos os mesmos benefícios que os bidimensionais, mas possuem a vantagem de fornecer informações de forma 3D. A forma 3D é um ótimo discriminante para reconhecer objetos porque a forma não muda tanto quanto recursos de iluminação associados à maioria das imagens 2D. Mapeamento 3D vem se

espalhando como uma aplicação comercial do LiDAR, porque é possível mapear um centro da cidade, ou uma área com problemas de inundação, em três dimensões (MCMANAMON, 2019).

Diferentemente do LiDAR *scanner*, o LiDAR de estado sólido não possui partes mecanicamente móveis. Em vez de usar um motor rotativo para girar o módulo do sensor, LiDARs de estado sólido são usados como unidades estacionárias. Eles geralmente têm um campo de visão mais estreito e maquinário que requerem 360 graus de visão e geralmente requerem vários sensores instalados (SÖDERBERG, 2019).

4. Possíveis problemas em usina detectáveis com LiDAR bidimensional

Neste capítulo são descritos os principais problemas em usina de mineração que podem ser determinados com um LiDAR bidimensional. Até esse estágio do trabalho, foram selecionados cinco problemas: baixa eficiência do peneiramento, baixa eficiência de processos de cominuição, atrasos na medição da taxa, deterioração de correias trasportadoras e avalanche em silos, moegas e alimentadores, que estão organizados nas subseções a seguir.

4.1. Baixa eficiência do peneiramento

O processo de peneiramento é um estágio de classificação largamente utilizado na indústria mineral. Nele são usados equipamentos mecânicos, peneiras, que classificam o material de entrada com base na granulometria do minério. As peneiras possuem *decks*, telas com aberturas de tamanho pré-definido, que separam o material que as alimenta em dois fluxos, *oversize* e *undersize*. O *oversize* é composto por partículas grossas, maiores do que o tamanho de abertura do *deck*, que ficam retidos na tela e direcionadas para fora da peneira. O *undesize* é composto por partículas finas que atravessam as aberturas do *deck* e seguem uma direção diferente. Ambos os fluxos produzidos no peneiramento são usualmente transportados por correias transportadoras para os processos subsequentes adequados. Na Figura 4.1 é ilustrado o processo de peneiramento.

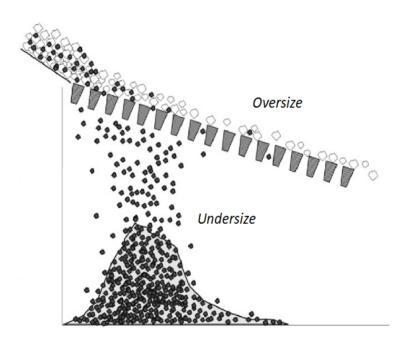


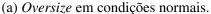
Figura 4.1: Representação do processo de peneiramento. Fonte: adaptado de Gupta e Yan (2016).

A eficiência do processo de peneiramento em separar as partículas finas das grossas está

sujeito a: (i) Umidade do minério. O material contendo partículas com alta umidade superficial, ou seja, entre 5 e 8% de umidade, torna a operação de classificação extremamente difícil. Isso ocorre pois a água exerce um efeito capilar, aglomerando as partículas em grandes blocos de minério e, com isso, as partículas finas são carregadas para o *oversize* junto às partículas grossas (CHAVES e PERES, 2012); (ii) Taxa de alimentação. Taxas altas de alimentação, além da capacidade de absorção das peneiras, tendem a sobrecarregar as telas com minério, o que causa arraste das partículas finas para o *oversize*.

Além disso, no peneiramento, muitas vezes, ela se torna uma tarefa complicada dado que, normalmente, é aplicado a formas irregulares de partículas, fazendo com que uma partícula com um tamanho próximo ao da abertura nominal da peneira de teste possa passar apenas quando apresentado em uma posição favorável (WILLS, 2006). Na Figura 4.2 é mostrado o comparativo do *oversize* em condições normais, contendo partículas grossas, e o *oversize* oriundo de um peneiramento de baixa eficiência, contendo grande quantidade de materiais finos.







(b) Oversize com grande presença de finos.

Figura 4.2: Oversize transportado via correia.

Medir o grau de fragmentação das partículas do *oversize* por meio do LiDAR bidimensional pode ser uma forma de avaliar a eficiência de peneiras, umas vez que a presença de partículas finas no *oversize* é um indicativo de baixa eficiência de operação da peneira. Essa informação é útil para ajustar parâmetros de operação do peneiramento visando melhorar a eficiência do processo.

4.2. Baixa eficiência de processos de cominuição

Na indústria mineral, equipamentos de cominuição, como britadores e moinhos são responsáveis por reduzir o tamanho das partículas de minérios que os alimentam. É importante ava-

liar se esses equipamentos estão exercendo sua função adequadamente ao fragmentar o minério a um tamanho que permita o beneficiamento do minério por outros processos. Essa avaliação pode ser feita por meio de medições do LiDAR 2D, via análise do grau de fragmentação do minério que deixa os equipamentos de cominuição. Caso seja constatado que o desempenho dos equipamentos não está adequado, ajustes nos parâmetros de operação devem ser feitos.

Além disso, vale ressaltar que o processo de moagem é uma operação muito cara, temse o exemplo das minas de cobre, em que essa operação unitária pode contribuir com 40% dos custos totais (CHAVES e PERES, 2012). Variações nas propriedades do minério que alimenta moinhos, como a composição, distribuição de tamanho e tenacidade podem ser medidas e usadas para otimizar o processo de moagem, de maneira a melhorar a qualidade do minério, economizar recursos e diminuir a produção de CO_2 (GALDAMES et al., 2017; TESSIER et al., 2007). Normalmente o que é feito, é a classificação do tipo de rocha e, consequentemente sua tenacidade, por operadores ou por testes em laboratório (CHATTERJEE et al., 2010; MOR-RELL, 2004). Posto isso, desenvolver um instrumento capaz de rastrear essas variações em diferentes locais da usina de processamento mineral é importante para melhorar desempenhos econômicos, dado que as variações na tenacidade do minério afetam diretamente o consumo de energia e rendimento de moinhos AG e SAG. Outro ponto é que moinhos que operam em baixa eficiência podem, eventualmente, causar problemas operacionais (TESSIER et al., 2007).

Diferentes tipos de minério possuem características diferentes, como a coloração e a textura. Por exemplo, a goethita possui uma coloração amarelada, enquanto algumas hematitas possuem uma cor vermelho roxo (SCHEINOST e SCHWERTMANN, 1999). Sabendo-se disso, pode-se estimar o tipo do minério por meio de LiDAR, de maneira que mede-se a intensidade de refletância do pulso de laser, dado que há uma relação entre cor e refletância, uma vez que quanto mais escuro o alvo, mais absorve fótons (HAID, 2016). Com o dado de intensidade pode-se estimar o tipo do material transportado via correia, de forma que essa informação possa ser utilizada em sistemas automáticos para a operação de moagem.

4.3. Atrasos de medição de taxa

Em correias que há algum tipo de sistema de medição instalado, o dispositivo não é capaz de indicar múltiplas informações e/ou, devido a limitações de instalação, está posicionado em local desfavorável ao uso por sistemas de automação. Por exemplo, balanças industriais são encontradas em usinas de mineração sendo usadas para medição de taxa de material. Elas, porém, são muito caras e os pontos de instalação possíveis ao longo da correia são poucos. Dessa forma, os pontos em que são instaladas são distantes dos equipamentos de beneficiamento do minério, gerando atrasos na medição da taxa mássica. Isso ocorre, pois, normalmente, utilizam-se balanças integradoras apenas nas extremidades da planta, o que torna a medição pouco útil para os sistemas de controle automáticos do processo.

4.4. Deterioração de correias trasportadoras

Uma correia transportadora possui uma capacidade máxima de carga que suporta transportar. Se o limite máximo de carga for ultrapassado, a correia é danificada, podendo chegar ao ponto de parar de funcionar. Isso causa uma interrupção do transporte do material para os processos subsequentes e, consequentemente, interrompe a produção e ganhos da indústria. Esse problema pode ser detectado monitorando-se a vazão mássica do material transportado e realizando as ações necessárias para sua resolução.

4.5. Avalanche em silos, moegas e alimentadores

Existem minérios de alta umidade, que fazem com que algumas operações de beneficiamento de minério tornem-se uma tarefa complicada. Os materiais com essas características podem ocasionar avalanches em silos, moegas e alimentadores. Na Figura 4.3 é mostrado o material transportado via correia.

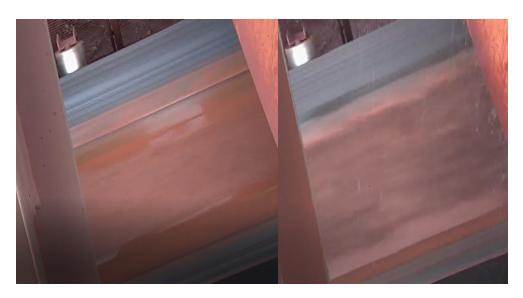


Figura 4.3: Aspecto visual do minério causador de avalanche.

Atualmente, o que é comumente feito para detecção desse material é a inspeção visual de um operador de campo, que comunica e sinaliza para a sala de controle a aparência do minério para tomada de decisões imediatas (OLIVEIRA, 2020). Por meio de varredura a *laser* da superfície desse material transportado por correia é possível avaliar sua rugosidade e assim caracterizar sua compatibilidade, de maneira a detectar o material causador de avalanche. Outra possibilidade é o uso da medição de intensidade do LiDAR, dado que seu valor é influenciado pela presença de água e pela refletância do material. O material muito úmido tende a ser mais claro, enquanto o material seco tende a ser escuro, o que altera a refletância do material. Alvos mais claros conseguem espalhar mais fótons, enquanto alvos mais escuros tende a abservê-los

(HAID, 2016). Estimando-se a presença desse material problemático, pode-se tomar as ações de controle, de forma que é possível melhorar a segurança dos ativos e dos operadores.

5. Materiais e Métodos

O sistema de instrumentação proposto neste trabalho tem por objetivo indicar o grau de fragmentação, a vazão volumétrica, a vazão mássica, a condição do material e o tipo de minério transportado via correia. Dessa forma, é possível melhorar a atuação de sistemas de automação que trabalham para garantir o desempenho adequado dos processos de produção e garantir que os equipamentos trabalhem em um ponto de operação seguro. Nesta Seção são apresentadas a proposta de instalação e de funcionamento, os dispositivos eletrônicos utilizados para as aplicações, os algoritmos desenvolvidos e as ferramentas computacionais utilizadas.

5.1. Configuração do sistema

Pretende-se utilizar o *laser scanner* bidimensional do tipo LiDAR para efetuar a varredura do minério transportado via correia. Desse modo, o dispositivo deve ser instalado acima do material alvo, de forma que o feixe de *laser* aponte perpendicularmente para o mensurando. Para garantir melhores resultados na medição, a superfície do alvo deve ser perpendicular ao *scanner* para uma melhor reflexão (CHAN, 2010). Portanto, quanto menor o ângulo de incidência, maior a precisão da varredura. Na Figura 5.1 é mostrada a localização do sistema proposto e a configuração da medição.

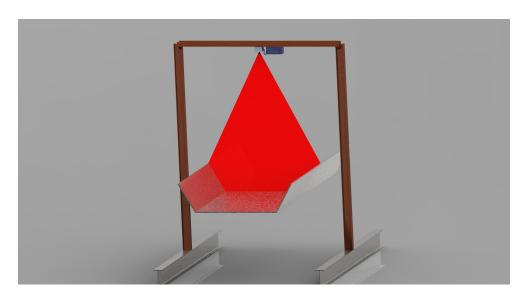


Figura 5.1: Localização do sistema de medição proposto.

O processo de varredura consiste no *laser scanner* bidimensional emitir uma radiação em forma de *laser* em direção à correia transportadora, sob a qual está seu alvo, o minério. Essa radiação é refletida ao atingir as partículas e é então detectada pelo *laser scanner* bidimensional, que determina a distância do sensor até o minério e a intensidade que o pulso foi refletido. Dessa forma, não há contato direto entre o sensor e o alvo a ser analisado, e nem é preciso fornecer iluminação por uma fonte externa, já que trata-se de uma técnica de sensoreamento remoto do

tipo ativa.

Uma câmera, também instalada acima da correia, deve ser usada para capturar um *frame* do cenário a cada dado medido pelo *laser scanner*, de forma que seja possível validar o sistema de medição e auxiliar na montagem do *dataset*. Além disso, segure-se o uso de um minicomputador de placa única para aquisitar e processar os dados medidos durante a operação do sistema proposto e realizar os cálculos das informações do minério. A fim de proteger os componentes de poeira e jatos d'água, eles são inseridos em clausuras de proteção IP67.

Para evitar falhas de superaquecimento, o minicomputador é refrigerado com o uso de pastilhas peltier, as quais têm o lado de refrigeração em contato direto com o minicomputador e são inseridas no interior da clausura. O lado que é aquecido fica em contato direto com um dissipador de calor, presente no exterior da clausura, que é refrigerado com o auxílio de um ventilador *cooler* IP67. Como o ambiente industrial está sujeito a excesso de poeira, será utilizada a refrigeração com pastilhas de peltier, de modo a evitar uma ventilação forçada para o interior da clausura, evitando o contato do minicomputador e dos demais componentes eletrônicos com poeira e outras intempéries. Assim, a ventilação forçada é usada apenas no exterior da clausura, de modo a resfriar o dissipador de calor presente em sua porta.

Para coleta de dados de forma remota um módulo 3G/4G/LTE conectado com a mini PCIe EC-25 AU é usado para conexão do dispositivo com a nuvem. Para recepção dos dados na nuvem será usado o Microsoft Azure, em que nele é possível acessar os dados medidos via web.

Utiliza-se o *Robot Operating System* (ROS) para inicializar os sensores e para publicar e subscrever as mensagens que contém os dados medidos por eles. No caso do LiDAR, são coletados os dados de intensidade, *range* e ângulo de incremento entre cada medição. Os dados de intensidade são usados para estimar o tipo de minério, enquanto o *range* e o ângulo são usados para o cálculo das demais variáveis medidas pelo sistema e limitar o ângulo de varredura. Assim, o ângulo é restringido, de forma a coletar dados apenas nos limites da correia, ou seja, efetua a varredura apenas no alvo de interesse, conforme é mostrado na Figura 5.2.

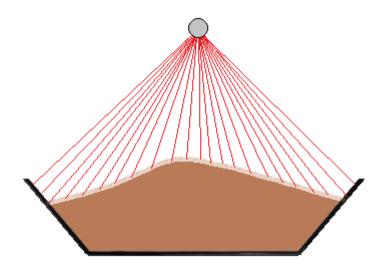


Figura 5.2: Delimitação do ângulo de varredura do *laser scanner*.

Visto que os dados de range e ângulo de incremento apresentam-se em coordenadas polares (r, θ) , em que r representa o range, θ o ângulo de incremento entre cada medição, eles podem ser convertidos para coordenadas cartesianas (x, y), em que y representa a altura entre o sensor e o alvo e x a largura da correia, conforme a conversão é mostrada nas Equações 5.1 e 5.2. Na Figura 5.3 é mostrado o sistema de coordenadas usado em varreduras.

$$x = rcos(\theta) \tag{5.1}$$

$$y = rsen(\theta) \tag{5.2}$$

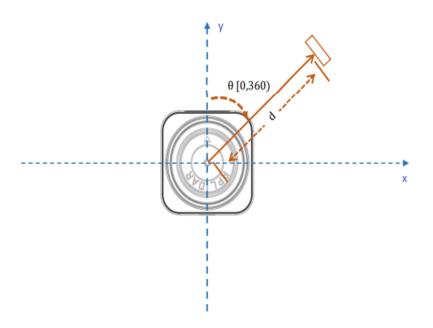
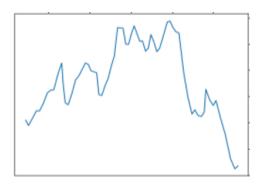
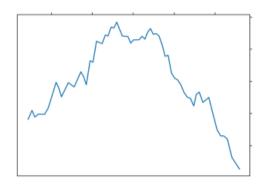


Figura 5.3: Sistema de coordenadas. Fonte: adaptado de Slamtec (2021)

Para avaliação do grau de fragmentação e de compactação do granulado, são usados os dados do vetor de alturas (y), de modo que é calculada a diferença discreta entre cada valor e com base nesse cálculo. Assim, são definidos índices estatísticos para avaliação qualitativa da rugosidade da superfície do material aglomerado. Na Figura 5.4a é mostrada a envoltória da varredura de uma superfície rugosa. Já na Figura 5.4b é mostrada a varredura de uma superfície suave.





- (a) Varredura de uma superfície de textura rugosa.
- (b) Varredura de uma superfície de textura suave.

Figura 5.4: Envoltórias oriundas da varredura de materiais com diferentes graus de fragmentação.

São calculados os índices SII (sum of absolute input increments) (EUZÉBIO *et al.*, 2020), variância e mediana, os quais são usados como parâmetro de entrada de um método de classificação de dados, baseado em aprendizagem de máquina chamado *Random Forest*, que é responsável por classificar o grau de fragmentação e de compactação do material. Para o grau de fragmentação, o material é analisado como fino, intermediário ou grosso.

Para medição da vazão volumétrica do material sendo transportado pela correia transportadora, pretende-se utilizar como base a nuvem de pontos bidimensional do local inspecionado, definida por meio dos dados de alturas do alvo em relação ao sensor. Desse modo, o processo de medição de vazão volumétrica requer uma etapa de calibração do sistema de instrumentação proposto. Para que seja feita a calibração do sistema, deve ser feita uma varredura da correia transportadora, de maneira que ela esteja parada e vazia. Desse modo, é possível coletar a nuvem de pontos da correia, que é uma forma de reconhecer o formato da correia transportadora. Uma botoeira de pulso conectada ao sistema de instrumentação proposto, ao ser acionada, ativa o processo de calibração que utiliza os dados coletados na varredura da correia vazia para criar uma referência para o cálculo de vazão volumétrica.

Após o procedimento de calibração, com a retomada do funcionamento da correia transportadora, devem ser feitas varreduras a laser do minério sob a correia a uma frequência prédefinida, de maneira a coletar uma nuvem de pontos bidimensional do minério transportado. A cada varredura, as nuvens de pontos obtidas na varredura do material e na calibração, são usadas para calcular a área da seção transversal do material. Na Figura 5.5 é mostrado o procedimento

que será usado para extrair o perfil do material transportado para cálculo de sua área.



Figura 5.5: Área da seção transversal.

O cálculo da área da seção transversal do material (A) é feito utilizando a integral definida mostrada na Equação 5.3, em que f(x) é a curva de varredura do material, g(x) é a curva de referência, a e b são referentes aos pontos de extremidade da correia transportadora.

$$\int_{a}^{b} (f(x) - g(x))dA \tag{5.3}$$

Para determinar o deslocamento da correia, representado pelo eixo (z), pretende-se relacionar a velocidade da correia transportadora e o período entre cada varredura. Multiplicando a área transversal do material pelo deslocamento da correia calcula-se a vazão volumétrica entre uma varredura e outra.

Os cálculos da densidade aparente e da vazão mássica do minério sob a correia transportadora devem ser feitos utilizando os dados obtidos no cálculo do volume e os valores de massa, medidos por uma balança industrial. A densidade aparente do material transportado pode ser calculada utilizando os valores de massa obtidos pela balança industrial e os valores de volume obtidos pelo sistema de instrumentação proposto, como é mostrado na Equação 5.4, em que ρ_a representa a densidade aparente, m a massa indicada e v o volume medido.

$$\rho_a = \frac{m}{v} \tag{5.4}$$

Com base no valor da densidade aparente torna-se possível o cálculo da vazão mássica do material sob a correia transportadora no ponto em que o sistema de instrumentação está instalado.

Os dados de *range* e ângulo de incremento convertidos em coordenadas cartesianas podem ser utilizados para a detecção de materiais causadores de avalanche. Dado que esses materiais possuem alta umidade, avaliando-se o grau de compactação do material seria possível a detecção deles. Materiais secos tendem a ser mais compactos, enquanto os materiais extremamente úmidos se espalham nos limites da correia transportadora. Além disso, utiliza-se os dados de intensidade de reflexão, uma vez que existe uma relação entre umidade do alvo e o valor da intensidade. Desse modo, a medição de intensidade pode ajudar na classificação da condição do minério.

Outra abordagem utilizando o valor de intensidade do *laser scanner* bidimensional, seria na determinação do tipo de minério transportado. Visto que existe uma diferença de coloração para minérios de diferentes litologias, os valores de intensidade podem ser utilizados para clas-

sificar o tipo do minério. Essa abordagem é importante, uma vez que, minérios possuem diferentes graus de tenacidade, de maneira que a medição dessa variável pode ser extremamente útil para controles automáticos de processos de cominuição. Na Figura 5.6 é mostrado o diagrama esquemático do funcionamento do sistema proposto.

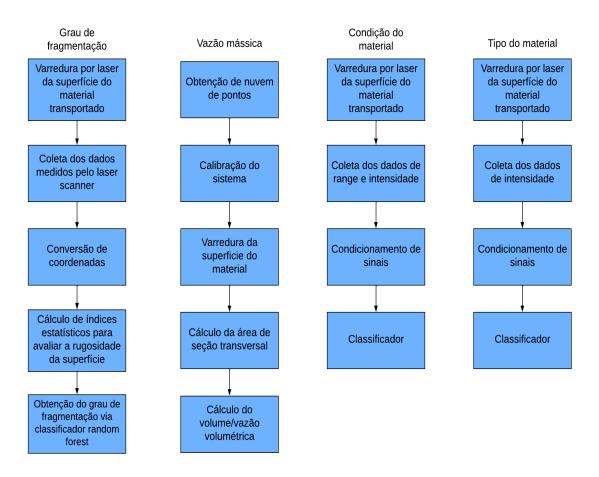


Figura 5.6: Diagrama esquemático do funcionamento do sistema.

5.2. Hardware

Durante o desenvolvimento do trabalho foram utilizados diferentes componentes, de maneira que foram desenvolvidos três protótipos para o sistema de medição. Inicialmente foram utilizados sensores de menor precisão, juntamente com um minicomputador de menor poder de processamento. Posteriormente, foram adquiridos um minicomputador e sensores mais robustos e precisos, de forma que ocorreram também melhorias nas clausuras de proteção, tornando-as mais robustas. O primeiro protótipo possuía clausuras de proteção feitas de polímero, já os protótipos posteriores, tiveram suas clausuras feitas de alumínio e com proteção IP67. Nesta Subseção são descritos os componentes que formam os três protótipos desenvolvidos.

5.2.1. Laser Scanner

O primeiro *laser scanner* utilizado foi RPLiDAR S1 da marca Slamtec. Trata-se de um sensor muito usado em aplicações de localização e mapeamento de robôs. Possui baixo custo e baixa robustez, dado que não possui nenhuma certificação de proteção. Além disso, possui baixa acurácia, quando comparado a modelos específicos para aplicações industriais. Na Figura 5.7 é mostrado o *laser scanner* RPLiDAR S1 e na Tabela 5.1 as especificações do modelo.



Figura 5.7: RPLiDAR S1 da Slamtec. Fonte: Slamtec (2021).

Tabela 5.1: Especificações do RPLiDAR S1. Fonte: Slamtec (2021).

Item	Detalhe
Cenário de aplicação	Indoor e outdoor
Range máximo	40 m para objetos brancos e 10 m para objetos pretos
Taxa de amostragem	9,2 kHz
Taxa de scan	10 Hz
Campo de visão	360°
Resolução angular	0,391°
Interface de comunicação	TTL UART
Acurácia	±5 cm
Resolução	3 cm
Comprimento de onda do laser	905 nm
Classe de segurança do laser	IEC-60825 Classe 1
Certificação de proteção	Não possui

O outro *laser scanner* bidimensional usado foi o URM-40LC-EWT da Hokuyo, o qual é mais robusto e preciso, quando comparado com o RPLiDAR S1. Na Figura 5.8 é mostrado o sensor e na Tabela 5.2 suas especificações.



Figura 5.8: URM-40LC-EWT da Hokuyo. Fonte: Hokuyo (2020)

Tabela 5.2: Especificações do URM-40LC-EWT. Fonte: Hokuyo (2020)

Item	Detalhe
Cenário de aplicação	Indoor e outdoor
Range máximo	40 m para objetos brancos e 18 m para objetos pretos
Taxa de scan	20 Hz
Campo de visão	270°
Resolução angular	$0,25^{\circ}$
Interface de comunicação	Ethernet
Acurácia	±2 cm
Resolução	1 cm
Comprimento de onda do <i>laser</i>	905 nm
Classe de segurança do laser	IEC60825 1:2007 e IEC60825 1:2014 Classe 1
Certificação de proteção	IP67 (jatos d'água e poeira)

O URM-40LC-EWT possui a função *multi-echo*, em que o sensor trabalha com múltiplas reflexões em uma mesma direção, no caso deste, um total de três reflexões ou ecos. Isso faz com que o instrumento seja mais adequado para ambientes industriais, uma vez que LiDARs *single-echo* possuem baixa eficiência, já que o seu único pulso de *laser* pode ser refletido em partículas de poeira, enquanto os *multi-echo* tendem a ter um comportamento mais robusto em relação a chuva e a poeira (GÓMEZ *et al.*, 2020; HALL, 2014). O comportamento de um LiDAR *multi-echo* é mostrado na Figura 5.9.

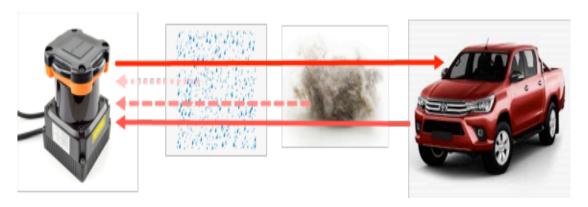


Figura 5.9: Varredura de um LiDAR *multi-echo*, em que um pulso emitido promove múltiplas reflexões . Fonte: Gómez *et al.* (2020)

Além da função *multi-echo*, o URM-40LC-EWT possui outras vantagens em relação ao RPLiDAR S1, tais como melhor acurácia e resolução, menor resolução angular e maior frequência de *scan*. Isso significa que o dispositivo é mais preciso, consegue efetuar a varredura abrangendo mais pontos e em um menor tempo.

5.2.2. Minicomputador de placa única

Inicialmente, fora utilizado o Raspberry Pi 3B+, um minicomputador de placa única, o qual possui um processador quad-core Broadcom BC2837 ARM-8 de 64 bits. Possui memória RAM de 1GB e um cartão MicroSD, que é usado como disco rígido. Possui um conector de alimentação do tipo micro USB e sua potência nominal pode chegar a 5 W (SAŁUCH *et al.*, 2018). Na Figura 5.10 é mostrada a placa e seus principais componentes. Na Tabela 5.3 são mostradas as especificações do dispositivo.



Figura 5.10: Raspberry Pi modelo 3B+. Fonte: adaptado de Raspberry Pi (2022).

Tabela 5.3: Especificações do Raspberry Pi modelo 3B+. Fonte: Raspberry Pi (2022).

Item	Detalhe
Processador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz
Memória	1GB LPDDR2 SDRAM
Pinagem	40 pinos GPIO
Alimentação	5V/2.5A DC via conector micro USB
Temperatura de operação	0–50 <i>C</i> °
Comunicação	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth
Protocolos	UART, I2C, SPI

O outro minicomputador usado foi o Jetson Nano da Nvidia, que é composto por uma CPU de 1,43 GHz e GPU de 128 núcleos. Trata-se de um computador poderoso, ideal para aplicações de sistemas embarcados, IoT, visão de máquina e *deep learning* (SÜZEN *et al.*, 2020). O Jetson Nano é mostrado na Figura 5.11 e suas especificações estão presentes na Tabela 5.4.



Figura 5.11: Jetson Nano da Nvidia. Fonte: Kurniawan (2021).

Tabela 5.4: Especificações do Jetson Nano. Fonte: Kurniawan (2021).

Item	Detalhe
GPU	128-core Maxwell
CPU	Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz
Memória	4 GB 64-bit LPDDR4 25.6 GB/s
Pinagem	40 pinos GPIO
Alimentação	5V/2.5A DC via conector micro USB
Temperatura de operação	$-25-97C^{\circ}$
Comunicação	Ethernet
Protocolos	UART, I2C, SPI

5.2.3. Câmera

A câmera que compõe o primeiro e segundo protótipo é a webcam C920 HD pro da Logitech, a qual possui resolução de 1080 pixels a 30 fps e 3 Megapixels (LOGITECH, 2022). Na Figura 5.12 é mostrada a C920 HD pro.



Figura 5.12: C920 HD pro da Logitech.

Para o terceiro protótipo foi usada a câmera RealSense D435i da Intel. Trata-se de uma câmera estereoscópica de profundidade, a qual é equipada por duas câmeras de visão stereo, um projetor IR e uma câmera RGB. O projetor IR ajuda a combinar recursos comuns entre as câmeras stereo. A D435i também contém uma IMU (*Inertial Measurement Unit*) (INTEL, 2022a). Na Figura 5.13 é mostrada a RealSense D435i.



Figura 5.13: RealSense D435i. Fonte: Intel (2022b)

5.2.4. Módulo 3G/4G/LTE

Para promover uma conexão à internet foi utilizado um *hat*, juntamente com um módulo mini PCIe 3G/4G/LTE. Dessa forma, torna-se possível a conexão do minicomputador de placa única com uma rede de celular. Foi utilizado o 3G/4G & LTE *Base HAT* da SixFab e a mini PCle EC-25 AU da Quectel. O cartão micro SIM é inserido no *Base HAT*, o qual funciona como uma ponte entre a mini PCle e o minicomputador. O *Base HAT* permite comunicação UART ou USB. A mini PCle EC-25 AU é muito utilizado em aplicações M2M (*machine to machine*) e

IoT de banda larga, de maneira que ele suporta velocidades de *download* de 150 Mbps e *upload* de 50 Mbps (SIXFAB, 2022). Na Figura 5.14 é mostrado o Módulo 3G/4G/LTE.

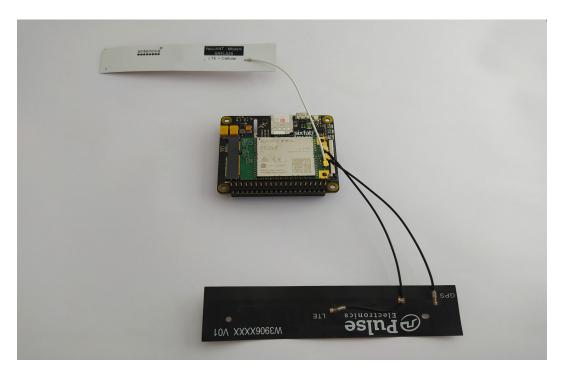
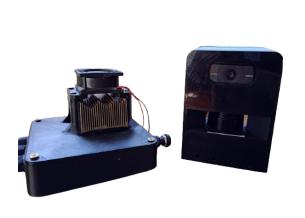
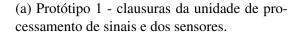


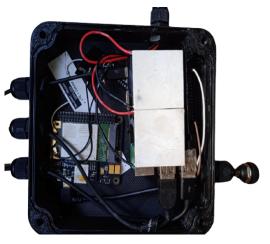
Figura 5.14: 3G/4G & LTE Base HAT, mini PCle EC-25 AU e antenas. Fonte: Sixfab (2022)

5.2.5. Clausuras de proteção

Foram projetadas três clausuras de proteção. O primeiro protótipo é composto por uma clausura pouco robusta, dado que é feita de polímero. Além disso, não promove proteção contra poeira e água e possui um sistema de dissipação de calor pouco eficiente, uma vez que foi utilizada uma aleta de alumínio pouco robusta e um *cooler* sem proteção IP67. As clausuras foram projetadas para proteção do RPLiDAR S1, a webcam C920 e do Raspberry Pi, conforme é mostrado nas Figuras 5.15a e 5.15b.







(b) Protótipo 1 - clausura da unidade processamento de sinais.

Figura 5.15: Primeiro protótipo.

No protótipo 2 foram feitas melhorias nas clausuras, elas foram usinadas em alumínio e utilizados *o-rings* para vedação das junções das caixas, de forma a promover a proteção contra água e poeira. Foi inserido um dissipador de calor na porta da clausura da unidade de processamento de sinais e um miniventilador *cooler* IP67 para refrigerá-lo. Nas Figuras 5.16a e 5.16b é mostrado o protótipo 2, o qual foi desenvolvido para proteção do RPLiDAR S1, a webcam C920 e do Raspberry Pi.



(a) Protótipo 2 - clausuras da unidade de processamento de sinais e dos sensores.

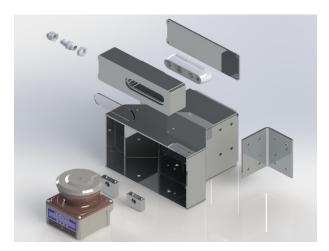


(b) Protótipo 2 - clausura da unidade processamento de sinais.

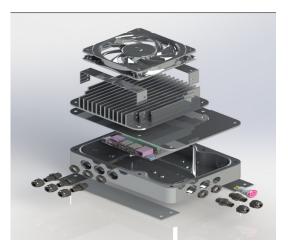
Figura 5.16: Segundo protótipo.

Para o protótipo 3 foi feito o projeto de clausuras de proteção contra água e poeira. Este foi dimensionado para guardar o LiDAR URM-40LC-EWT, a câmera D435i e o Jetson Nano. Trata-se de um protótipo IP67, diferentemente do anterior, já que RPLiDAR S1 não possui certificado de proteção, tornando o sistema de instrumentação vulnerável as intempéries presentes no ambiente industrial, visto que existe uma abertura para o feixe de *laser* do LiDAR.

Nas Figuras 5.17a e 5.17b são mostradas as vistas explodidas do terceiro protótipo. Na Figura 5.18 são mostradas as clausuras do terceiro protótipo.



(a) Protótipo 3 - clausuras da unidade de processamento de sinais e dos sensores.



(b) Protótipo 3 - clausura da unidade processamento de sinais.

Figura 5.17: Terceiro protótipo.



Figura 5.18: Terceiro protótipo.

5.3. Software

Neste trabalho foram utilizadas algumas ferramentas para o desenvolvimento do software utilizado nas aplicações. Nesta Subseção são descritas as ferramentas utilizadas e o funcionamento dos algoritmos desenvolvidos.

5.3.1. ROS

O software *Robot Operating System* (ROS) foi usado o para o desenvolvimento de *software* e comunicação entre *hardwares*. O ROS é um *software* que contém uma série de bibliotecas e ferramentas para construção de aplicações em robótica. Ele permite a criação de aplicações em múltiplas linguagens de programação, porém neste trabalho foi utilizada a biblioteca "rospy", que permite o desenvolvimento de pacotes com o uso da linguagem de programação Python.

O ROS funciona de uma maneira modular, com o uso de pacotes, neles estão contidos os nós do ROS, *datasets*, arquivos de configuração e bibliotecas necessárias para o desenvolvimento de uma aplicação (ROS, 2022).

De acordo com Aitken *et al.* (2014), uma aplicação ROS deve conter, basicamente, as seguintes estruturas (Figura 5.19): i) Nós- são um tipo de executável do ROS, nele é performado o software desenvolvido. Esses nós comunicam entre si em uma arquitetura do tipo *publisher/subscriber*, em que podem publicar e subscrever mensagens em tópicos. ii) Tópicos - é o tipo de estrutura que transporta as mensagens do ROS, de maneira que podem enviar e receber mensagens. Normalmente, o nome do tópico é usado para identificar o conteúdo da mensagem. iii) Serviços - fornece um modelo de comunicação mais estrito, em que envia requisições para um nó, cujo intuito é realizar uma determinada tarefa e receber uma resposta.

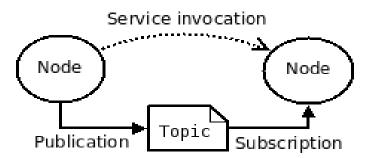


Figura 5.19: Conceitos básicos do ROS. Fonte: ROS (2022)

Foi utilizado o pacote "sensor_msgs"do ROS para obter acesso as mensagens oriundas de sensores. Dessa forma, foram publicadas, em seus respectivos tópicos, as mensagens "LaserScan", que contém os parâmetros dos LiDARs e "Image", a qual contém os dados das câmeras.

5.3.2. Funcionamento dos algoritmos desenvolvidos

Para o primeiro e segundo protótipo, em que foi utilizado o Raspberry Pi, o ROS Kinetic foi instalado no sistema operacional Raspbian. No ambiente de desenvolvimento ROS foi usado o pacote OpenCV ROS para ser usado como *driver* da *webcam*. Nele é possível inicializar a câmera e rodar o nó "cv_camera_node", o qual publica a mensagem "Image"no tópico "image_raw". Para tal, utiliza-se o comando "rosrun" para inicializar o nó, conforme mostrado abaixo.

rosrun cv_camera cv_camera_node

Foi usado o pacote "rplidar_ros" disponibilizado pela Slamtec para ser usado como *driver* do RPLiDAR S1, de modo que o sensor seja inicializado e a mensagem tipo 'LaserScan" seja publicada no tópico "scan". Assim, é usado o comando "roslaunch" para inicializar o nó *driver*, conforme é mostrado no comando abaixo.

roslaunch rplidar_ros rplidar_s1.launch

Para o terceiro protótipo foi usado o Jetson Nano com o sistema operacional Ubuntu 18.04. Nele foi instalado o ROS Melodic Morenia. No ambiente ROS foram instalados os pacotes "librealsense", "realsense_camera", "librealsense2"e "realsense2_camera". Essa ação foi necessária pra rodar o nó da câmera RealSense ("rs_camera"), o qual inicializa a câmera e publica a mensagem no tópico "image_raw". Para isso foi usado o comando "roslaunch".

roslaunch realsense2_camera rs_camera.launch

Para a inicialização do Hokuyo URM-40LC-EWT foram necessários os pacotes "urg_c" e "urg_node", os quais foram inseridos no ambiente ROS. Além disso, com o *laser scanner* conectado ao Jetson Nano, via ethernet, foi configurada uma rede com endereço de IP 192.168.0.10, *Subnet Mask* 255.255.255.0 e *Default Gateway* 192.168.0.1. Assim, o nó "urg_node" pôde ser inicializado por meio do comando "rosrun", conforme mostrado abaixo.

```
rosrun urg_node urg_node _ip_address:=192.168.0.10
```

Independente dos modelos de sensores e de minicomputadores foi necessária a criação de novos pacotes, consequentemente, novos nós, para subscrição dos tópicos supracitados. Dessa maneira, torna-se possível a manipulação dos dados medidos pelos sensores. Sendo assim, foram criados dois pacotes, intitulados "laser_values" e "send_data".

O pacote "laser_values" subscreve os tópicos "scan"e "image_raw", de forma que são calculadas as variáveis medidas pelo sistema de instrumentação. Por meio da subscrição do tópico "scan" coleta-se os dados de *range* e intensidade medidos pelo *laser scanner*, de maneira que é feita uma série de cálculos para estimar o grau de fragmentação e compactação, a vazão mássica e vazão volumétrica e a litologia do material. Os dados medidos são escritos em um arquivo de texto no formato JSON (*JavaScript Object Notation*), de modo a armazenar de forma local os dados medidos, em outras palavras, as variáveis medidas são gravadas em um *datalogger*, que é salvo no cartão SD do minicomputador. Além disso, com a subscrição do tópico "image_raw" o nó realiza uma captura do cenário e armazena a foto de forma local, dentro do cartão SD do minicomputador.

No pacote também está presente o algoritmo para a calibração do sistema com o uso do *push button* e todas as operações que devem ser realizadas antes dos cálculos das variáveis medidas. Como por exemplo: i) a delimitação do ângulo de varredura, que limita os vetores que contém os dados de *range* e intensidade, de maneira que só abranjam a área da correia transportadora; ii) a conversão do dado de *range* e ângulo de *scan*, fornecidos em coordenadas polares, para coordenadas cartesianas.

O pacote "send_data"é responsável por enviar os dados medidos e as imagens para a nuvem. Os dados medidos são enviados para o IoT Hub da Azure e as imagens e o arquivo de *datalogger* para o Storage Blob da Azure. A estratégia de separar o envio dos dados de forma remota das tarefas realizadas pelo pacote "laser_values", foi escolhida pelo fato que o envio remoto é dependente do sinal 3G/4G presente em campo. Assim, em caso de inexistência de sinal, o sistema de instrumentação pode continuar coletando dados de forma *offline*. Para não sobrecarregar o espaço de armazenamento do minicomputador, no pacote intitulado "laser_values" é possível alterar o tempo que o sistema irá trabalhar *offline*. No pacote "send_data" existe uma lógica que apaga as imagens capturadas assim que são enviadas para o Storage Blob da Azure, fazendo com que o sistema trabalhe de forma *online* sem requerer espaço no cartão SD.

Para executar os pacotes citados foi necessário a criação de um arquivo do tipo *launch*. Com isso, é possível executar os nós utilizando o comando "roslaunch". Tem-se o exemplo do pacote "laser_values", em que o arquivo *launch* é mostrado abaixo, nele é configurado no ambiente ROS o nome do pacote, o arquivo Python que contém o código ("scan.py") e o nome do nó a ser executado ("scan_values"). Assim os pacotes de subscrição podem ser executados por meio dos arquivos *launch*.

Grau de fragmentação e compactação

Para estimar o grau de fragmentação e de compactação do material utiliza-se os dados medidos pelo LiDAR, convertidos em coordenadas cartesianas. A componente y representa a altura entre o sensor e o alvo. Para isso, foram calculados índices estatísticos do vetor das variações de alturas y, para que seja possível avaliar a rugosidade da superfície do material. Para realizar o cálculo dos índices mediana, variância e SII foi utilizada a biblioteca Numpy. Trata-se de uma biblioteca muito indicada para trabalhar com vetores em Python e ela contém uma série de funções que auxiliam no desenvolvimento de programas. Para o cálculo do vetor de diferenças utilizou-se a função "np.diff", assim, é dada a diferença discreta entre cada dado de altura medido. A mediana dos dados desse vetor foi calculada com a função "numpy.median", a variância por meio da "numpy.var"e o SII o somatório dos dados do vetor de diferenças.

Vazão mássica e vazão volumétrica

Para este cálculo é necessário o procedimento de calibração, o qual foi mencionado anteriormente. Os dados de nuvem de pontos coletados durante o processo de calibração são

armazenados em um vetor, bem como os dados de nuvem de pontos obtidos na varredura do material. Utiliza-se a componente x dos dados provenientes da conversão polar para cartesiano para que o algoritmo calcule a área da seção transversal do material. Para isso utilizou-se a biblioteca SciPy, a qual possui uma função própria para realizar integrais. Desse modo, utilizou-se a função "integrate.simps", que utiliza o método de Simpsons para o cálculo da integral. Dessa forma, é feita a integral da curva de varredura do material no eixo x, e esse valor é subtraído pela integral da curva de calibração no eixo x, de maneira que o algoritmo é capaz de calcular a área da seção transversal. Multiplicando a área calculada pelo deslocamento do material obtém-se a vazão volumétrica. A vazão mássica é calculada multiplicando a vazão volumétrica pela densidade do material.

Tipo de minério

A biblioteca do ROS "sensor_msgs", que possibilita a subscrição da mensagem "Laser_scan" no tópico "scan" provê um parâmetro chamado "intensities". Trata-se de um vetor do tipo *float* 32, que contém o valor da intensidade de reflexão em cada ponto do alvo escaneado. No pacote criado coleta-se os valores desse vetor, de maneira que fique restringido nos limites do alvo selecionado. Aquisitando os dados de intensidade, torna-se possível utilizá-los para estimar o tipo de material que foi escaneado.

5.3.3. Envio dos dados

Configuração do hardware

O módulo 3G/4G/LTE foi configurado para operar por meio do método ECM (*Ethernet Control Model*), em que a conexão à internet é promovida via USB. Para tal, utilizou-se o software Minicon, no qual foi aberta a comunicação serial da USB e configurado um *baudrate* de 115200. No Minicom configurou-se o módulo para trabalhar via ECM por meio do comando listado abaixo.

```
AT+QCFG="usbnet",1
```

Além disso, foi necessário configurar a APN da operadora utilizada. Nos testes realizados neste trabalho foi utilizada a operadora Oi. O comando usado para configuração da APN é mostrado abaixo.

```
AT+CGDCONT=1,"IP","gprs.oi.com.br"
```

Microsoft Azure

Foram usados dois protocolos para envio dos dados. O protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) para envio das variáveis data, hora, temperatura interna do minicomputador, índices estatísticos do vetor de diferenças de alturas, vazão mássica e os vetores: de intensidade e os referentes a x e y, em coordenadas cartesianas. Já o protocolo HTTP

(*Hypertext Transfer Protocol*) foi usado para envio das fotos coletadas e do *datalogger*. O protocolo MQTT é o mais recomendável para aplicações de IoT, uma vez que foi projetado para subscrição e publicação de mensagens de forma mais rápida e segura que os protocolos convencionais. Porém, foi necessário o uso do protocolo HTTP, dado que a versão Python suportada pelo ROS (Python 2.7), não suporta o envio de fotos via protocolo MQTT, por meio das bibliotecas fornecidas pela Microsoft.

O Microsoft Azure foi utilizado para envio dos dados para a nuvem. O serviço IoT Hub foi utilizado para recepcionar os dados enviados via protocolo MQTT. O IoT Hub do Azure pode ser visto como um *gateway* de grande escala que atua como um capacitador e gerenciador de toda comunicação bidirecional entre dispositivos entre si e com a nuvem (KLEIN, 2017). Conforme é mostrado na Figura 5.20, as soluções de IoT podem ser divididas em dois núcleos, que são a conexão do dispositivo e o processamento e análise de dados.

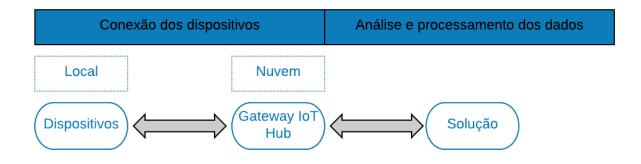


Figura 5.20: Princípios essenciais da solução IoT.

O *gateway* atua como um mediador que reúne os dados recebidos e os disponibiliza para processamento posterior por outros serviços e processos da solução IoT. O Azure IoT Hub promove uma comunicação bidirecional entre o dispositivo e a nuvem (KLEIN, 2017).

Assim, conforme os dados chegam ao IoT Hub, eles são imediatamente coletados pelo Azure Stream Analytics, para serem armazenados em contêineres para análise posterior, com o uso do Azure Storage Blob. O Azure *Stream Analytics* fornece um mecanismo de processamento de eventos que permite o exame e análise de grandes volumes de dados transmitidos por dispositivos (STACKOWIAK, 2019).

Apesar do custo do serviço ser U\$100,00 mensais, o Azure Stream Analytics foi escolhido para enviar os dados para o Azure Storage Blob. Existe a possibilidade de rotear a mensagens do IoT Hub diretamente para o Storage Blob, em que no IoT HuB é criado uma aplicação para essa tarefa. Porém, o dado é armazenado no Storage Blob, de forma que ele é codificado em *Base* 64. Dessa maneira, é necessária a decodificação dos dados para que sejam entendíveis. Dado que a comunicação remota será usada apenas para coleta de dados para auxiliar no desenvolvimento do sistema de instrumentação, não sendo necessária de forma recorrente, optou-se pelo uso do Azure Stream Analytics para envio dos dados para o Azure

Storage Blob.

Blob Storage, também conhecido como *Object Storage*, é onde dados de objetos não estruturados podem ser armazenados (DAHER e HAJJDIAB, 2018). Blob significa objeto binário grande (*binary large object*). Este tipo de serviço pode armazenar quase tudo, uma vez que armazena dados não estruturados, como documentos, arquivos, imagens, VHDs e assim por diante. Com o serviço de armazenamento de *blobs* do Azure, é possível acessar os objetos armazenados, usando diferentes métodos de acesso, como URLs, APIs REST ou até mesmo os SDKs do Azure (WALY, 2017). Na Figura 5.21 é mostrado o diagrama esquemático do envio dos dados para a nuvem.

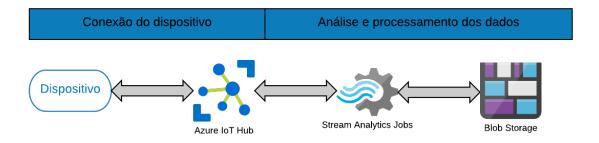


Figura 5.21: Diagrama de IoT que será utilizado.

As fotos capturadas e o arquivo *datalogger* são enviados diretamente para o Azure Storage Blob, via protocolo HTTP, sem antes serem mediados pelo IoT HuB.

Algoritmo de envio dos dados

Configurados o *hardware* para conexão à internet e os serviços Azure a serem utilizados, foi desenvolvido um algoritmo no pacote "send_data", cujo objetivo é enviar os dados medidos para a nuvem. Para envio dos dados para o IoT Hub foram usadas as biblioteca "azure-iot-device", "azure-iot-hub", "azure-iothub-service-client" e "azure-iothub-device-client". Assim, foi criada uma função no código, cujo objetivo é criar um cliente IoT Hub, de modo que utilizase a chave de conexão obtida na criação do serviço IoT Hub, conforme mostrado no código abaixo.

Dentro da função que são calculadas as variáveis medidas, os dados são formatados em tipo JSON e são enviados para o IoT hub, conforme mostrado abaixo, em que a variável "message" representa o arquivo JSON contendo os dados medidos.

```
client = iothub_client_init()
message = Message(msg_txt_formatted)
client.send_message(message)
```

Para envio das fotos e do arquivo *datalogger* é usada a biblioteca Python "azure.storage.blob", e bibliotecas como as "os", "re"e "os.path"para acessar os diretórios que contém os arquivos e obter permissões sobre os arquivos a serem enviados para o Azure Storage Blob. Posto isso, foi criada uma função, cujo intuito é enviar as fotos e *datalogger*. Além disso, após enviar os arquivos, ela apaga as fotos que não devem ficar armazenadas no cartão SD. Para envio dos arquivos para o Storage blob são configurados o nome do contêiner que irá receber os arquivos, a conta criada no Storage Blob e a chave de conexão. No código abaixo é mostrada a função mencionada.

```
def blob(): #envia as fotos para o coneteiner no azure
      block_blob_service = BlockBlobService(account_name='opitplantstorage
     ', account_key='chave de conexao')
      container_name = 'fotos'
     local_path = "/home/saulo/catkin_ws/src/camera/src"
     local_path2 = "/home/saulo/catkin_ws/src/laser_values/src"#armazena
     o datalogger no blob
     local_path3 = "/home/saulo/Desktop/images/"
     for files in os.listdir(local_path):
          block_blob_service.create_blob_from_path(container_name,files,os
     .path.join(local_path,files))
     for files in os.listdir(local_path2):
          block_blob_service.create_blob_from_path(container_name,files,os
10
     .path.join(local_path2,files))
     for files in os.listdir(local_path3):
11
          block_blob_service.create_blob_from_path(container_name,files,os
     .path.join(local_path3,files))
      for root, dirs, f in os.walk(local_path3):
13
          for file in f:
14
              os.remove(os.path.join(root, file))
```

5.3.4. Configuração de serviços systemd

Foi necessária a criação de serviços do tipo *systemd*, para que os nós do ROS, necessários para a aplicação desenvolvida, executem automaticamente, após o *boot* do sistema operacional. O primeiro serviço desenvolvido foi para executar o "roscore", que é uma série de nós e programas que são pré requisitos para que os demais nós se comuniquem em um sistema ROS. O segundo serviço criado tem a função de executar o nó que é executado por meio do comando

"rosrun". Já o terceiro, executa todos os nós executados via "roslaunch". Esse terceiro serviço executa todos os nós citados, dado que fora alterado o arquivo *launch* da câmera RealSense (no caso do terceiro protótipo), de maneira que ele executa todos os nós executados via "roslaunch" simultaneamente. Para tal, inicialmente criou-se *scripts* do tipo .sh.

```
#!/bin/bash
source /opt/ros/melodic/setup.bash
source /home/saulo/catkin_ws/devel/setup.bash
roscore

#!/bin/bash
source /opt/ros/melodic/setup.bash
source /home/saulo/catkin_ws/devel/setup.bash
rosrun urg_node urg_node _ip_address:=192.168.0.10

#!/bin/bash
source /opt/ros/melodic/setup.bash
source /opt/ros/melodic/setup.bash
source /opt/ros/melodic/setup.bash
roslaunch realsense2_camera rs_camera.launch
```

No diretório /lib/systemd/system criou-se os serviços roscore.service, rosrun.service e roslaunch.service. As configurações desses serviços são mostradas abaixo.

```
[Unit]
2 Description=roscore
4 [Service]
5 Type=forking
6 ExecStart=/home/saulo/scripts/roscore.sh
7 Restart=on-failure
9 [Install]
WantedBy=multi-user.target
[Unit]
2 Description=rosrun
3 After=roscore.service
5 [Service]
6 Type=forking
7 ExecStart=/home/saulo/scripts/rosrun.sh
8 Restart=on-failure
10 [Install]
WantedBy=multi-user.target
[Unit]
```

```
[Unit]
Description=roslaunch
After=rosrun.service
```

```
Service]
Service]
WorkingDirectory=/home/saulo/
ExecStart=/home/saulo/scripts/laser.sh
User=saulo
Restart=always

Illustall]
WantedBy=multi-user.target
```

Nesta configuração os serviços se iniciam em ordem, em que primeiro é iniciado o roscore.service e posteriormente o rosrun.service e o roslaunch.service. Isso foi realizado pelo fato que os comandos do tipo "rosrun"só são executados se o "roscore"estiver executado. Criados os serviços, eles são habilitados para serem executados após o *boot* do sistema operacional, com o uso do comando do Linux "systemetl".

6. Resultados de experimentos em laboratório

Nesta Seção são apresentados os resultados dos testes realizados em laboratório. Devido às limitações de acesso causadas pela pandemia da COVID-19 o sistema de instrumentação proposto não foi testado em campo. Além disso, não foi possível obter amostras de minério para os testes em laboratório. Foram realizados testes para estimar o grau de fragmentação de diferentes granulados, a massa, a condição do material e diferenciação de materiais por meio da intensidade de reflexão.

6.1. Grau de fragmentação

Foi montada uma plataforma de teste, onde o *laser scanner* RPLiDAR S1 da marca Slamtec foi fixado a uma altura de meio metro de distância de um recipiente. Três tipos de agregados de construção civil foram considerados para haver uma variação granulométrica: areia média, cuja a granulometria varia de 0,2 a 0,6 *mm* (fino), pó de brita, que são particulados de granulometria até 4,8 mm (intermediário) e brita 2, a qual possui granulometria entre 19 e 31,5 mm (grosso). Na Figura 6.1 é mostrada a fixação do *laser scanner* e o recipiente abastecido de areia.



Figura 6.1: Plataforma de testes usada no experimento.

Feita a configuração do *laser scanner* para o teste, foram criados três cenários diferentes para cada material , inicialmente com o material não compactado, compactado e muito compactado, conforme é mostrado na Figura 6.2.



(a) Areia não compactada, compactada e muito compactada.



(b) Pó de brita não compactado, compactado e muito compactado.

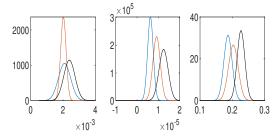


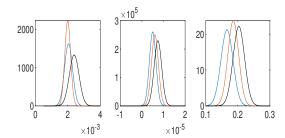
(c) Brita não compactada, compactada e muito compactada.

Figura 6.2: Diferentes cenários usados no teste.

Foram feitas as varreduras dos materiais a partir das quais foram calculados índices estatísticos SII (Sum of Absolute Input Increments), variância e mediana do vetor das variações de altura medido pelo *laser scanner* para que seja possível avaliar a rugosidade da superfície dos materiais durante o procedimento. Os índices estatísticos mediana, variância e SII foram utilizados como parâmetro de entrada de uma *Random Forest*, cuja função é classificar o grau de fragmentação em fino (areia), intermediário (pó de brita) e grosso (brita).

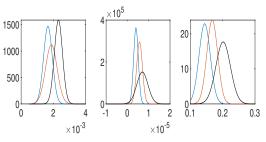
Com o intuito de analisar a mediana, variância e SII, calculados por meio do vetor de variações de alturas, foram plotadas as distribuições normais de cada índice para cada material e cenário diferente, assim como pode ser observado na Figura 6.3.





(a) Distribuição normal dos índices mediana, variância e SII para materiais não compactados, em que a curva em azul representa areia, laranja pó de brita e preto brita.

(b) Distribuição normal dos índices mediana, variância e SII para materiais compactados, em que a curva em azul representa areia, laranja pó de brita e preto brita.



(c) Distribuição normal dos índices mediana, variância e SII para materiais muito compactados, em que a curva em azul representa areia, laranja pó de brita e preto brita.

Figura 6.3: Distribuições normal obtidas nas varreduras.

Analisando-se o comportamento das curvas pode-se perceber a influência da rugosidade da superfície do material nos índices calculados. É possível avaliar que a média dos índices é maior quanto mais rugosa a superfície do material, ou seja, um material menos fragmentado.

Para o pré-processamento dos dados foi usado um filtro média móvel para atenuação de ruídos, de modo que os dados tratados foram usados para criar um *dataset* de entrada de uma técnica de *machine learning* chamada *Random Forest*. Essa técnica trata-se de um conjunto de árvores de decisão, em que cada uma é gerada usando um subconjunto aleatório de dados de um *dataset*. Ela é muito utilizada para problemas que englobam classificação e regressão. Para sua criação foi utilizado o *software* Weka, que é uma coleção de algoritmos de aprendizado de máquina para resolver problemas de uma grande quantidade de dados. Os parâmetros de entrada foram os índices SII, mediana e variância e o *label*, o grau de fragmentação, classificado como grosso, intermediário e fino. Foram testados dois modelos de *Random Forest*, um utilizando 25 árvores e outro com 50. Para treinamento dos modelos foi utilizado o método *cross validation*, em que os dados foram particionados em 10 campos, sendo que em cada um deles foi utilizado 90% desses dados para treinamento e 10% para validação. O diagrama de fluxo é mostrado na Figura 6.4.

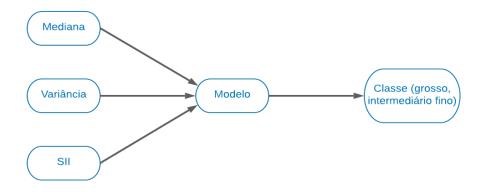


Figura 6.4: Diagrama de fluxo da Random Forest.

O algoritmo proposto, utilizando *Random Forest* com 25 e 50 árvores, foi treinado 30 vezes alterando-se sua semente aleatória (*seed*). A aleatoriedade é usada para definir dentro do *dataset* quais dados serão usados para formar as árvores de decisão. Dessa forma, evita-se um *overfitting* da técnica, ou seja, uma técnica bem treinada apenas para aquele *dataset* utilizado. Foram analisados os erros RMSE de cada modelo e posteriormente calculadas a média e desvio padrão para cada configuração da *Random Forest*. Para a *Random Forest* de 25 árvores foi obtida uma média de erro RMSE igual a 0,1085 e desvio padrão igual a 2,4656e – 04. Já para a *Random Forest* de 50 árvores a média do erro foi igual a 0,1069, enquanto o desvio padrão foi de 2,1413e – 04.

Por meio dos dados de média e desvio padrão, obtidos para cada modelo, foi possível plotar o gráfico *boxplot*, mostrado na Figura 6.5 e comprovar a normalidade da distribuição, usando o teste de Shapiro-Wilk. Foi comprovada a normalidade de ambos os modelos, uma vez que pelo teste de Shapiro-Wilk, para uma distribuição ser considerado normal, *p-value* deve ser superior a 0,05. A RF25 obteve *p-value* igual a 0,69 e a RF50, *p-value* igual a 0,09.

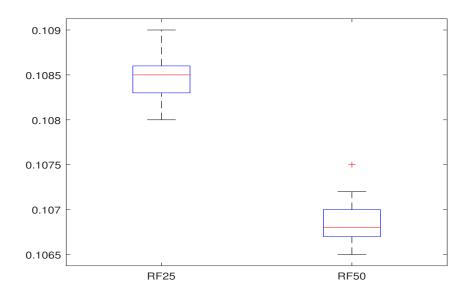


Figura 6.5: Boxplot da RF com 25 e 50 árvores.

Matriz de confusão é um meio de avaliar o desempenho da técnica *Random Forest*. Os valores da diagonal dessa matriz representam as classes corretamente classificadas. A Tabela 6.1 mostra a matriz de confusão de cada modelo treinado. A acurácia de cada modelo é calculada dividindo o total de classes corretamente classificadas pelo total de instâncias. A RF25 obteve taxa de acerto igual a 97,81%, enquanto RF50 97,89%. Utilizando-se 50 árvores, foi observado maior acurácia e menor média de erro. Além disso, por meio do *Welch Two Sample t-test*, foi obtido *p-value* inferior a 0,05 mostrando que existe uma diferença significante em relação aos dois modelos.

Tabela 6.1: Matrizes de confusão para os modelos propostos.

Fino	Grosso	Intermediário	Fino	Grosso	Intermediário
18142	0	566	18182	0	526
0	17172	2	0	17172	2
621	1	17962	615	1	17968

⁽a) Matriz de confusão para *Random Forest* com 25 árvores.

Pela taxa de acerto apresentada, obteve-se uma solução instrumentada competente para classificação de grau de fragmentação de forma útil a ser utilizada para retroalimentação em estratégias de controle de regulação de alimentação na peneira para obtenção da operação de forma a evitar finos no *oversize* no processo de peneiramento.

6.2. Cálculo de massa

Para testar a capacidade do sistema de medir a vazão mássica, foi realizado um teste utilizando o *laser scanner* RPLiDAR S1, cujo o objetivo era estimar a massa de areia despejada em um recipiente. Na Figura 6.6 é mostrada a bancada de testes montada, em que o *laser scanner* foi instalado perpendicularmente ao seu alvo.



(a) RPLiDAR S1 e recipiente abastecido com areia



(b) Vista frontal do recipiente abastecido com areia.



(c) Vista vertical do recipiente abastecido com areia.

Figura 6.6: Bancada de teste para obtenção da massa.

⁽b) Matriz de confusão para *Random Forest* com 50 árvores.

Para determinar a massa de areia despejada no recipiente, o sistema de instrumentação foi calibrado. Com o recipiente vazio coletou-se a nuvem de pontos que determina o formato do recipiente vazio, conforme mostrado na Figura 6.7.

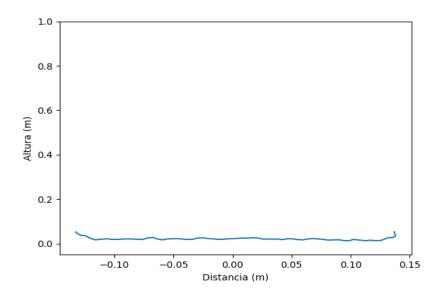


Figura 6.7: Curva de calibração do sistema de instrumentação.

Após isso, coletou-se a nuvem de pontos já com o recipiente abastecido com 4,4 kg areia. Como o recipiente foi deslocado linearmente a cada 5 cm, com o intuito de simular o movimento de uma correia, foram efetuadas 6 varreduras da superfície da areia. Na Figura 6.8 são mostrados os gráficos das varreduras.

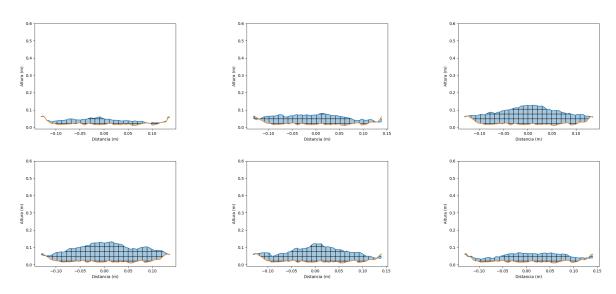


Figura 6.8: Varreduras realizadas na superfície da areia, em que a curva em laranja representa a curva de calibração, a curva em azul a varredura do material e a parte hachurada representa a área da sessão transversal.

Por meio dos dados obtidos nas varreduras, foi possível plotar o modelo tridimensional

do recipiente abastecido com a areia, como é mostrado na Figura 6.9. Os resultados obtidos pelo cálculo da área de sessão transversal de cada varredura e o volume são mostrados na Tabela 6.2. Assim, multiplicando-se o volume total do material escaneado pela densidade teórica da areia de $1300 \ kg/m^3$, obteve-se uma massa estimada de areia igual a 4,94 kg. Sabendo-se que a massa de areia medida por uma balança comercial foi de 4,40 kg, obteve-se um erro porcentual de aproximadamente 12%. Tendo em vista os resultados apresentados, percebe-se que o uso da varredura a *laser* pode ser uma solução capaz de estimar a taxa mássica de minério transportado via correia, em pontos que o uso da balança integradora é inviável, como por exemplo, próximos aos alimentadores.

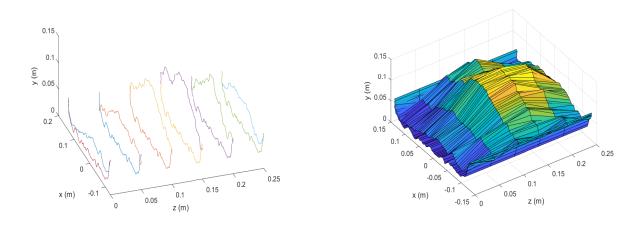


Figura 6.9: Modelo tridimensional do recipiente abastecido com areia.

Varredura	Área (m²)	Volume (m³)	
1	0,00490	0,00024	
2	0,01089	0,00054	
3	0,01804	0,00090	
4	0,01916	0,00095	
5	0,01468	0,00073	
6	0,00840	0,00042	
Total	-	0,00380	

Tabela 6.2: Resultados do teste de cálculo de massa.

6.3. Condição do material

Foi usado o *laser scanner* 2D, o Hokuyo URM-40LC-EWT, para efetuar a varredura de um solo em diferentes cenários. O sensor foi fixado a uma altura de meio metro de distância do seu alvo. Um recipiente foi abastecido com solo seco, que durante o processo foi molhado, inserindo-se água ao material, de modo gradativo. Assim, foram criados diferentes cenários,

com o solo em diferentes graus de umidade, sendo que, em cada uma dessas configurações, utilizou-se o *laser scanner* para escanear a superfície do material.

Além das medições do *range*, foram utilizadas as medições de intensidade (*intensity*). Esta, é a medida da quantidade de onda eletromagnética que é refletida. O seu valor é influenciado por uma série de características do material e, dentre elas, está a umidade.

De maneira parecida a estimação do grau de fragmentação, utilizou-se o dado de *range* para avaliar a rugosidade da superfície do material. Assim, por meio dessa análise, verificou-se a capacidade do sistema de instrumentação de avaliar a condição do material, dado que, materiais com altas quantidades de água tendem a se espalhar na local em que estão depositados, diferentemente de um material seco, o qual tende a ser menos compactado, ou seja, de superfície mais rugosa.

Foram testados quatro cenários, de modo que iniciou-se com o solo seco e gradativamente foi adicionada água no material, aumentando-se sua umidade. Assim, formou-se os seguintes cenários: solo seco, úmido, molhado e lama. O solo em diferentes graus de umidade é mostrada na Figura 6.10.



(a) Varredura da superfície da solo seco.



(c) Varredura da superfície da solo molhado.



(b) Varredura da superfície da solo úmido.



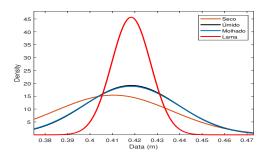
(d) Varredura da superfície da solo molhado.

Figura 6.10: Diferentes cenários usados no teste.

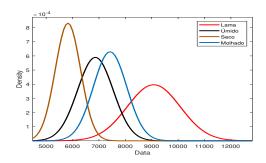
Foram plotadas as distribuições normais para o vetor de alturas, para o índice SII, calculado por meio do vetor de alturas e para o vetor de intensidades. Assim, foi possível perceber a diferença do sinal para cada tipo de cenário. Na Figura 6.11 são mostradas as gaussianas para os dados de altura, do índice SII e para os de intensidade, respectivamente.

Foi possível perceber que com o uso do índice SII a diferenciação da condição do material é mais aparente, em comparação com os dados de alturas. Os dados de intensidade obtiveram êxito em caracterizar a condição do material, uma vez que foi percebido que a intensidade da reflexão aumenta de acordo com o a umidade da superfície do material. Esse tipo de abordagem pode ser útil na detecção de minérios de alta umidade, os quais podem causar avalanche

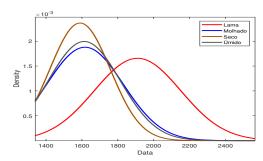
em silos, moegas e alimentadores.



(a) Distribuições normais para o vetor de alturas, em que vermelho representa lama, azul solo molhado, marrom o solo seco e preto a solo úmido.



(b) Distribuições normais para o índice SII, em que vermelho representa lama, azul solo molhado, marrom o solo seco e preto a solo úmido.



(c) Distribuições normais para o vetor de intensidades, em que vermelho representa lama, azul solo molhado, marrom o solo seco e preto a solo úmido.

Figura 6.11: Gaussianas para os diferentes cenários usados no teste.

6.4. Diferenciação de materiais

Foram realizados testes cujo objetivo era caracterizar materiais de cores diferentes. Para tal, diferentes materiais foram escaneados e coletou-se os dados de intensidade, posto que que esse valor varia de acordo com a coloração do material. Foram testados os seguintes materiais: carvão, solo, areia, brita e gesso, conforme mostrado na Figura 6.12.



(a) Varredura da superfície do carvão.



(c) Varredura da superfície da areia.



(b) Varredura da superfície do solo.



(d) Varredura da superfície da brita.



(e) Varredura da superfície do gesso.

Figura 6.12: Diferentes materiais usados no teste. 76

Foram plotadas as gaussianas das medições de intensidade para cada tipo de material, conforme mostrado na Figura 6.13. Pode-se comprovar que a medição de intensidade é influenciada pela cor do material, visto que a intensidade é menor quando é feita varredura de materiais escuros. Isso ocorre, pois quanto mais escuro o alvo, mais absorve radiação. Essa nova abordagem é um bom indício para aplicações futuras, como caracterizar minério de acordo com sua cor, já que uma das formas de analisar o tipo de minério é por meio de sua coloração. Classificando-se o tipo do material, pode-se alimentar sistemas de controle do processo de moagem, dado que materiais de diferentes tipos possuem diferentes graus de dureza, o que interfere diretamente na moagem.

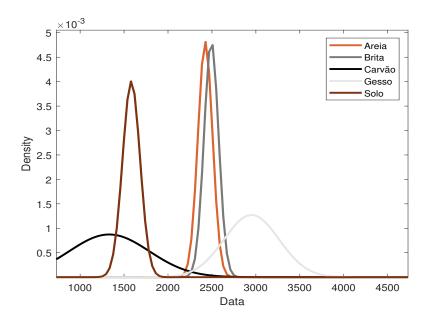


Figura 6.13: Gaussiana dos dados de intensidade oriundos da varredura de diferentes materiais, em que a curva em laranja representa a areia, cinza brita, branco o gesso, preto carvão e marrom o solo.

7. Conclusão

Nesta dissertação foi apresentado um novo sistema de instrumentação, o qual é capaz de avaliar particulados transportado via correia. O sistema tem como características medir em tempo real, de forma online, não invasiva e sem o uso de fontes externas de luz, uma vez que o principal sensor utilizado é um *laser scanner* bidimensional. O desenvolvimento desse tipo de tecnologia é de interesse da indústria mineral, dado que para a avaliação de muitos processos é utilizada a técnica de inspeção visual, feita por um operador. Além disso, as informações medidas pelo sistema de instrumentação podem ser utilizadas por sistemas de controle automáticos, para ajuste do desempenho de processos e monitoramento das condições de segurança de operação, de forma a melhorar a eficiência e produtividade dos negócios.

Foi efetuado um levantamento dos trabalhos que englobam o tema de avaliação de particulados transportados em correia e pôde-se constatar que o sistema proposto trata-se de uma novidade, visto que em nenhum dos trabalhos presentes no estado da arte é desenvolvido um sistema capaz de estimar todas as variáveis apresentadas pelo sistema de instrumentação elaborado neste trabalho. Ele possui uma vasta gama de aplicações, pelo fato de avaliar uma série de características de particulados. Foram analisados problemas em usina, que podem ser detectados com o uso do instrumento, como por exemplo a baixa eficiência de processos de classificação e cominuição, atrasos na medição da taxa mássica, a deterioração de ativos e avalanches.

Foram desenvolvidos três protótipos para o sistema de instrumentação, todos baseados em um *laser scanner* bidimensional, uma câmera, um mini computador de placa única e um módulo 3G/4G & LTE. O terceiro protótipo é composto por três clausuras de proteção e possui proteção contra água e poeira. Todo algoritmo desenvolvido foi embarcado no minicomputador, de maneira que o instrumento está pronto para testes em campo. Devido a pandemia da COVID 19 não foi possível a instalação do sistema em usina, em que a coleta dos dados seria mais congruente com a realidade da indústria.

Posto isso, foram realizados testes laboratoriais: i) o primeiro para avaliar o grau de fragmentação de agregados de construção civil, em que eles foram escaneados pelo LiDAR, o qual teve suas medições analisadas. Utilizou-se uma *Random Forest* para classificar o grau de fragmentação dos particulados, de modo que foi obtida uma taxa de acerto em torno de 98%; ii) foi calculada a massa de areia despejada em um recipiente, para avaliar a possibilidade do sistema de medir a taxa mássica de material transportado via correia. A superfície da areia foi escaneada, de forma que foram efetuados cálculos para a medição da massa de material. O instrumento foi capaz de medir a massa, de modo que foi obtido um erro porcentual de aproximadamente 12%; iii) para analisar a capacidade do sistema de detectar materiais causadores de avalanche, foi feito um teste, em que a superfície de terra foi escaneada em diferentes cenários. Foram criados quatro cenários, sendo que em cada um deles a terra escaneada possuía diferentes graus de umidade. Utilizando os dados de *range* e intensidade foram plotadas distribuições normais, para avaliar o comportamento da medição perante a umidade da superfície do mate-

rial. Constatou-se que existe uma relação entre a umidade do material com a intensidade de reflexão e a compactação do material; iv) para investigar a relação da intensidade com a cor do objeto alvo, foi efetuado um teste em que cinco particulados de colorações diferentes foram escaneados. Plotou-se as distribuições normais das medições e verificou-se que, quanto mais escuro o material menor a intensidade de reflexão.

A taxa de acerto do classificador, o erro percentual e a distinção dos sinais das gaussianas são bons indícios para a futura instalação do sistema em um ambiente industrial. Isso mostra que o instrumento pode ser uma alternativa para avaliação de minério transportado via correia.

Foram elaboradas algumas questões na Seção 1.4 que embasaram e motivaram o desenvolvimento desta pesquisa. Essas questões foram respondidas com base nos resultados dos experimentos realizados. As questões com as respectivas respostas são apresentadas abaixo:

Questão 1: É possível estimar a presença de finos em uma correia transportadora por meio de um *laser scanner* bidimensional?

No teste mostrado na Seção 6.1 foi constatado que o sistema proposto pôde classificar com precisão particulados de diferentes granulometrias, por meio da avaliação da rugosidade da superfície do material. Porém, é necessária a realização de um teste em campo, para que seja feita a coleta de dados e montagem de um *dataset* robusto. Assim, será possível avaliar o desempenho do classificador com o uso de dados oriundos do ambiente industrial.

Questão 2: É possível medir a taxa mássica de minério em uma correia transportadora por meio de um *laser scanner* bidimensional?

Na Seção 6.2 é mostrado o experimento em que calculou-se a massa de areia dentro de um recipiente. O recipiente foi deslocado linearmente, de forma a simular o movimento de uma correia transportadora. O instrumento foi capaz de medir com um erro percentual de 12%, em comparação a uma balança comercial. Apesar do resultado ser um bom indício para aplicação industrial, deve-se realizar testes em campo. Dessa forma, serão utilizadas as medições da velocidade da correia transportadora, para auxílio na medição da vazão volumétrica e as medições de massa de material transportado, medida por uma balança integradora, para calcular a densidade aparente do material e, posteriormente, a taxa de material transportado.

Questão 3: É possível detectar minério causador de avalanche em silos em uma correia transportadora por meio de um *laser scanner* bidimensional?

Os testes mostrados na Seção 6.3 mostram que o sistema pôde avaliar as características do material escaneado. O sistema foi capaz de diferenciar o solo em diferentes níveis de umidade, tanto pela abordagem de avaliar a compactação do material, quanto na medição da intensidade de reflexão. Entretanto, apesar do resultado positivo nos testes laboratoriais, são necessários testes em campo para afirmar que o sistema de instrumentação é capaz de detectar o minério causador de avalanche.

Questão 4: É possível classificar diferentes minérios utilizando um *laser scanner* bidimensional?

Utilizando o laser scanner bidimensional foi possível diferenciar tipos diferentes de ma-

teriais, de acordo como é mostrado na Seção 6.4. O sistema de instrumentação pôde diferenciar os materiais carvão, terra, areia, brita e gesso. No entanto, nesse teste foram usados materiais com um alto contraste de cores, de maneira que são necessários novos testes utilizando diferentes tipos de minério para observar o comportamento da intensidade. Não pode-se afirmar por meio dos resultados desse teste se a medição bruta da intensidade poderia classificar de forma precisa minérios. Conforme explicado na Seção 3.3, a medição da intensidade é muito suscetível a ruídos, dado que uma série de fatores interferem na sua medição. Dessa forma, é necessária uma coleta de dados em campo, para avaliar o comportamento dessa variável, para assim verificar se serão necessárias técnicas de tratamento dos dados e/ou fusão de medidas para a classificação do material.

Questão 5: É possível construir um protótipo robusto o suficiente para uso em campo, capaz de realizar as medições previstas nas questões 1, 2, 3 e 4?

Provavelmente sim, na Seção 5.2.5 é mostrado o terceiro protótipo. Trata-se de três clausuras de proteção usinadas em alumínio. Nas suas junções são utilizados *orings* para vedação e impedir a entrada de poeira e água para o interior das clausuras. A única parte aberta é a fenda presente na clausura do LiDAR. Porém, nesse protótipo, será usado o Hokuyo URM-40LC-EWT, o qual possui certificação IP67. Essas características mostram que o protótipo é robusto o suficiente para o uso em campo.

7.1. Trabalhos Futuros

Como trabalhos a serem realizados futuramente, recomenda-se:

- testar o sistema desenvolvido para campo e coletar dados do minério transportado em correia, para a construção de um *dataset* robusto;
- realizar testes em laboratório para diferenciação do tipo de materiais utilizando amostras de minério;
- testar outras ferramentas de classificação além da Random Forest;
- utilizar um transmissor 4 a 20 mA para que o sistema se comunique com o PLC e o SDCD da indústria.

7.2. Publicações

Durante o desenvolvimento da pesquisa, os seguintes trabalhos foram publicados:

• Método e sistema para avaliação de material em correias transportadoras, e, meio de armazenamento legível por computador - patente depositada no INPI (2021);

- Estratégia de avaliação da eficiência do processo de peneiramento utilizando sensoriamento remoto - artigo publicado no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2021);
- Utilização do Microsoft Azure para IIoT relatório técnico (2021);
- Avaliação de estruturas de controle para alimentadores com elevado tempo morto em transportadores de correia na mineração - artigo publicado no Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2022).

Referências Bibliográficas

- ADEL, K. T., YOON, R.-H., LUTTRELL, G. H. "Video instrumentation for the analysis of mineral content in ores and coal". 1992. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US5396260A. US Patent 5396260A.
- AITKEN, J. M., VERES, S. M., JUDGE, M. "Adaptation of system configuration under the robot operating system", *IFAC Proceedings Volumes*, v. 47, n. 3, pp. 4484–4492, 2014.
- AL-THYABAT, S., MILES, N., KOH, T. "Estimation of the size distribution of particles moving on a conveyor belt", *Minerals Engineering*, v. 20, n. 1, pp. 72–83, 2007.
- ALBERTAZZI, A., SOUSA, A. R. Fundamentos de metrologia científica e industrial. 2ª Edição. Barueri, SP, Manole, 2018.
- ALDRICH, C., JEMWA, G., VAN DYK, J., et al.. "Online analysis of coal on a conveyor belt by use of machine vision and kernel methods", *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, v. 30, n. 6, pp. 331–348, 2010.
- BARNEWOLD, L., LOTTERMOSER, B. G. "Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry", *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 30, n. 6, pp. 747–757, 2020.
- BILANDI, S. T., SAMETI, M., ZIRAKNEJAD, N., et al.. "Method and apparatus for performing a fragmentation assessment of a material". 2016. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US9418309B2. US Patent 8233667B2.
- BILANDI, S. T., SAMETI, M., ZIRAKNEJAD, N., et al.. "Method and apparatus for identifying fragmented material portions within an image". 2020. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US10783610B2. US Patent 10783610B2.
- BOTH, L. "Grain Size Distribution Analysis from 3D Laser Scan Data". jun 2011.
- BURTON, D., DUNLAP, D. B., WOOD, L. J., et al.. "Lidar intensity as a remote sensor of rock properties", *Journal of Sedimentary Research*, v. 81, n. 5, pp. 339–347, 2011.

- CAMPBELL, A., THURLEY, M. "Application of laser scanning to measure fragmentation in underground mines", *Mining Technology*, v. 126, n. 4, pp. 240–247, 2017.
- CASALI, A., GONZALEZ, G., VALLEBUONA, G., et al.. "Grindability soft-sensors based on lithological composition and on-line measurements", *Minerals Engineering*, v. 14, n. 7, pp. 689–700, 2001.
- CHAN, A. Using 3D terrestrial laser scanning technique to determine volume changes of a cobble beach. Tese de Mestrado, Delfty University and Technologies, jul 2010.
- CHANG, F.-J., CHUNG, C.-H. "Estimation of riverbed grain-size distribution using image-processing techniques", *Journal of Hydrology*, v. 440, pp. 102–112, 2012.
- CHATTERJEE, S., BHATTACHERJEE, A., SAMANTA, B., et al.. "Image-based quality monitoring system of limestone ore grades", *Computers in Industry*, v. 61, n. 5, pp. 391–408, 2010.
- CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. *Britagem, Peneiramento e Moagem*, v. 3. 5 ed., Oficina de Textos, 2012.
- CHUAN, Z., HAITAO, G., JUN, L., et al.. "Airborne LiDAR point cloud classification based on deep residual network", *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, v. 49, n. 2, pp. 202, 2020.
- COELHO, P. A., SANDOVAL, C., ALVAREZ, J., et al.. "Automatic near-infrared hyperspectral image analysis of copper concentrates", *IFAC-PapersOnLine*, v. 52, n. 14, pp. 94–98, 2019.
- DAHER, Z., HAJJDIAB, H. "Cloud Storage Comparative Analysis Amazon Simple Storage vs. Microsoft Azure Blob Storage", *International Journal of Machine Learning and Computing*, v. 8, pp. 85–89, 2018.
- DONG, P., CHEN, Q. LiDAR remote sensing and applications. CRC Press, 2017.
- ENGIN, I. C., MAERZ, N. H. "Size distribution analysis of aggregates using LiDAR scan data and an alternate algorithm", *Measurement*, v. 143, pp. 136–143, 2019.
- ENGIN, I. C., MAERZ, N. H., BOYKO, K. J., et al.. "Practical Measurement of Size Distribution of Blasted Rocks Using LiDAR Scan Data", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 53, n. 10, pp. 4653–4671, 2020.
- EUZÉBIO, T. A., YAMASHITA, A. S., PINTO, T. V., et al.. "SISO approaches for linear programming based methods for tuning decentralized PID controllers", *Journal of Process Control*, v. 94, pp. 75–96, 2020.

- FOJTÍK, D. "Measurement of the volume of material on the conveyor belt measuring of the volume of wood chips during transport on the conveyor belt using a laser scanning". Em: *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, pp. 121–124. IEEE, 2014.
- FRANCESCHI, M., TEZA, G., PRETO, N., et al.. "Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner", *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 64, n. 6, pp. 522–528, 2009.
- GALDAMES, F., PEREZ, C., ESTÉVEZ, P., et al.. "Rock Lithological Classification by Laser Range 3D and Color Images", *Interational Journal of Mineral Processing*, 2017.
- GE, Y., LIN, Z., TANG, H., et al.. "Measurement of Particle Size of Loose Accumulation Based on Alpha Shapes (AS) and Hill Climbing-Region Growing (HC-RG) Algorithms", *Sensors*, v. 20, n. 3, pp. 883, 2020.
- GUPTA, A., YAN, D. S. Mineral processing design and operations: an introduction. Elsevier, 2016.
- GUYOT, O., MONREDON, T., LAROSA, D., et al.. "VisioRock, an integrated vision technology for advanced control of comminution circuits", *Minerals Engineering*, v. 17, n. 11-12, pp. 1227–1235, 2004.
- GÓMEZ, D., RUIZ-DEL SOLAR, J., MASCARÓ, M., et al.. "Characterization of Multiple-Echo LIDAR Sensors under variable Dust Conditions". 12 2020.
- HAID, T. M. "Utilization of Lidar Intensity Data and Passive Visible Imagery for Geological Mapping of Planetary Surfaces", 2016.
- HALL, C. Comparing the performance of structured light depth sensors and traditional timeof-flight depth sensors for use in a lunar mining environment. Tese de Doutorado, University of Alabama Libraries, 2014.
- HAMZELOO, E., MASSINAEI, M., MEHRSHAD, N. "Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks", *Powder Technology*, v. 261, pp. 185–190, 2014.
- HARTZELL, P., GLENNIE, C., BIBER, K., et al.. "Application of multispectral LiDAR to automated virtual outcrop geology", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 88, pp. 147–155, 2014.
- HEIDEPRIEM, S. "Method for determining the volume of loads and device". 2012. Disponível em: https://patents.google.com/patent/EP2246673B1. EP Patent 2246673B1.

- HELGASON, T., LEE, J., SMITH, M. L., et al.. "Apparatus and method for analysis of size, form and angularity and for compositional analysis of mineral and rock particles". 2012. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US8233667B2/en?oq=8%2c233%2c667. US Patent 8,233,667.
- HOKUYO. 2D Lidar URM-40LC-EWT Specification, 2020. Disponível em: https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=228.
- HUMAIR, F., ABELLAN, A., CARREA, D., et al.. "Geological layers detection and characterisation using high resolution 3D point clouds: example of a box-fold in the Swiss Jura Mountains", *European Journal of Remote Sensing*, v. 48, n. 1, pp. 541–568, 2015.
- INTEL. Intel RealSense Product Family D400 Series, 2022a. Disponível em: https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2022/03/ Intel-RealSense-D400-Series-Datasheet-March-2022.pdf>.
- INTEL. "Intel RealSense Depth Camera D435i". https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/, 2022b.
- JELALIAN, A. "Laser Radar Systems (Boston: Artech House)", URISA Journal Palmer, Shan, v. 25, 1992.
- JIANJIU, L., XIANGTAO, N., JUN, G., et al.. "Method and system for measuring volume and density of powder material stack". 2013. Disponível em: https://patents.google.com/patent/CN102967260A. CN Patent 102967260A.
- JIN, J., DE SLOOVER, L., VERBEURGT, J., et al.. "Measuring surface moisture on a sandy beach based on corrected intensity data of a mobile terrestrial LiDAR", *Remote Sensing*, v. 12, n. 2, pp. 209, 2020.
- JIPING, S., YI, L. "Belt material measuring system based on laser ranging". 2012. Disponível em: https://patents.google.com/patent/CN104534990A. CN Patent 104534990A.
- KAARTINEN, J., TOLONEN, A. "Utilizing 3D height measurement in particle size analysis", *IFAC Proceedings Volumes*, v. 41, n. 2, pp. 3292–3297, 2008.
- KAASALAINEN, S., HYYPPA, H., KUKKO, A., et al.. "Radiometric calibration of LIDAR intensity with commercially available reference targets", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 47, n. 2, pp. 588–598, 2008.
- KASHANI, A. G., OLSEN, M. J., PARRISH, C. E., et al.. "A review of LiDAR radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration", *Sensors*, v. 15, n. 11, pp. 28099–28128, 2015.

- KLEIN, S. *IoT Solutions in Microsoft's Azure IoT Suite*. 1 ed. New York USA, Apress, 2017. ISBN: 978-1-4842-2143-3. doi: 10.1007/978-1-4842-2143-3.
- KLIPPEL, E., BIANCHI, A. G. C., DELABRIDA, S., et al.. "Deep Learning Approach at the Edge to Detect Iron Ore Type", *Sensors*, v. 22, n. 1, pp. 169, 2022.
- KORMANN, G. D. "Measuring arrangement for mass flow rate detection". 2009. Disponível em: https://patents.google.com/patent/DE102008017671A1. DE Patent 102008017671A1.
- KORMANN, G. D. "Measurement apparatus for mass flow detection of harvested crops". 2013. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US8347709B2>. US Patent 8347709B2.
- KUKKO, A., KAASALAINEN, S., LITKEY, P. "Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data", *Applied optics*, v. 47, n. 7, pp. 986–992, 2008.
- KURNIAWAN, A. "Introduction to nvidia jetson nano". Em: *IoT Projects with NVIDIA Jetson Nano*, Springer, 2021.
- LEI, S., XIANGXIANG, X., ZHONGBIN, W., et al.. "Apparatus and method for recognizing coal-rock interface based on solid-state laser radar imaging". 2018. Disponível em: https://patents.google.com/patent/W02020062470A1. CN Patent WO2020062470A1.
- LICHTI, D. D., GORDON, S. J., TIPDECHO, T. "Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks", *Journal of surveying engineering*, v. 131, n. 4, pp. 135–142, 2005.
- LIHONG, Z., XIUGANG, P., WENGE, W., et al.. "A kind of Lithology Identification Methods". 2015. Disponível em: https://patents.google.com/patent/CN104989392B>. CN Patent 104989392B.
- LIU, H., SUN, Z., LI, W., et al.. "Evaluating Angularity of Coarse Aggregates Using the Virtual Cutting Method Based on 3D Point Cloud Images", *IEEE Access*, v. 8, pp. 143241–143255, 2020.
- LIU, X., LI, Q., XU, Y., et al.. "Point Cloud Intensity Correction for 2D LiDAR Mobile Laser Scanning", *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2022, 2022.
- LOGITECH. "C920 HD PRO WEBCAM". https://www.logitech.com/pt-br/products/webcams/c920-pro-hd-webcam.960-000764.html, 2022.

- MAERZ, N. H. "Aggregate sizing and shape determination using digital image processing". Em: *Center For Aggregates Research (ICAR) Sixth Annual Symposium Proceedings*, pp. 195–203, 1998.
- MAERZ, N. H., PALANGIO, T. C., FRANKLIN, J. A. "WipFrag image based granulometry system". Em: *Measurement of Blast Fragmentation*, Routledge, pp. 91–99, 2018.
- MALLET, C. Analyse de données lidara Retour d'Onde Complete pour la classification en milieu urbain. Tese de Doutorado, Thèse de Doctorat. Paris: Telecom Paris Tech, 2010.
- MALLET, C., BRETAR, F. "Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art", *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 64, n. 1, pp. 1–16, 2009.
- MCMANAMON, P. *LiDAR Technologies and Systems*. Bellingham, Washington 98227-0010 USA, SPIE Press, 2019. ISBN: 9781510625396. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=cIIIwAEACAAJ.
- MCQUILKIN, G. L., ENGELKE, G. L. "Spectral imaging system for remote and noninvasive detection of target substances using spectral filter arrays and image capture arrays". 2019. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US10222260B2/. US Patent 10222260B2.
- MIN, F., LOU, A., WEI, Q. "Design and Experiment of Dynamic Measurement Method for Bulk Material of Large Volume Belt Conveyor Based on Laser Triangulation Method". Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 735, p. 012029. IOP Publishing, 2020.
- MOLEBNY, V., MCMANAMON, P. F., STEINVALL, O., et al.. "Laser radar: historical prospective—from the East to the West", *Optical Engineering*, v. 56, n. 3, pp. 031220, 2016.
- MORA, C., KWAN, A. "Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing", *Cement and concrete research*, v. 30, n. 3, pp. 351–358, 2000.
- MOREIRA, V. D. S., EUZÉBIO, T. A. M., MIOLA, W. "Aplicação de soft sensor de baixo custo para medição de vazão mássica de mi-nério em transportador de correia", *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente SBAI 2017*, v. 13, 2017.
- MORRELL, S. "Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples", *Minerals Engineering*, v. 17, n. 3, pp. 447–451, 2004.

- NGUYEN, T. T., LIU, X. G., HUANG, Y., et al.. "Ore volume measurement based on 3d laser scanning technique: a case study". Em: *Advanced Materials Research*, v. 610, pp. 3708–3714. Trans Tech Publ. 2013.
- NÚNEZ, F., SILVA, D., CIPRIANO, A. "Characterization and modeling of semi-autogenous mill performance under ore size distribution disturbances", *IFAC Proceedings Volumes*, v. 44, n. 1, pp. 9941–9946, 2011.
- OESTREICH, J., TOLLEY, W., RICE, D. "The development of a color sensor system to measure mineral compositions", *Minerals Engineering*, v. 8, n. 1-2, pp. 31–39, 1995.
- OLIVEIRA, C. H. "Caracterização de minério por técnica hiperespectral Em usina de beneficiamento de minério de ferro Para prevenção de avalanches". oct 2020.
- PENUMADU, D., ZHAO, R., STEADMAN, E. F. "Particle size and shape distribution analyzer". 2005. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US6960756B1. US Patent 6960756B1.
- PEREZ, C. A., CAMENT, L. A., CASTILLO, L. E. "Methodological improvement on local Gabor face recognition based on feature selection and enhanced Borda count", *Pattern Recognition*, v. 44, n. 4, pp. 951–963, 2011.
- PEREZ, C. A., SARAVIA, J. A., NAVARRO, C. F., et al.. "Rock lithological classification using multi-scale Gabor features from sub-images, and voting with rock contour information", *International Journal of Mineral Processing*, v. 144, pp. 56–64, 2015.
- PFEIFER, N., DORNINGER, P., HARING, A., et al.. "Investigating terrestrial laser scanning intensity data: quality and functional relations", 2007.
- PLATE, M., PANKRATZ, J. "Apparatus for determining the particle size distribution of a mixture". 2000. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US6061130A. US Patent 6061130A.
- RASPBERRY PI, F. Raspberry Pi 3 Model B+, 2022. Disponível em: https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/200206+Raspberry+Pi+3+Model+B+plus+Product+Brief+PRINT&DIGITAL.pdf.
- REYMANN, C., LACROIX, S. "Improving LiDAR point cloud classification using intensities and multiple echoes". Em: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5122–5128. IEEE, 2015.
- ROS. "ROS Concepts". http://wiki.ros.org/ROS/Concepts, 2022.

- SALINAS, R., RAFF, U., FARFAN, C. "Automated estimation of rock fragment distributions using computer vision and its application in mining", *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing*, v. 152, n. 1, pp. 1–8, 2005.
- SAŁUCH, M., TOKARSKI, D., GRUDNIEWSKI, T., et al.. "Raspberry PI 3B+ microcomputer as a central control unit in intelligent building automation management systems". Em: *MATEC Web of Conferences*, v. 196, p. 04032. EDP Sciences, 2018.
- SCHEINOST, A., SCHWERTMANN, U. "Color identification of iron oxides and hydroxy-sulfates: use and limitations", *Soil Science Society of America Journal*, v. 63, n. 5, pp. 1463–1471, 1999.
- SCHLEIFER, J., TESSIER, B. "FRAGSCAN: A tool to measure fragmentation of blasted rock". Em: *Measurement of blast fragmentation*, Routledge, pp. 73–78, 2018.
- SILVA, C., TRÉS, E., MAYERHOFER, F., et al.. "Development of a Magnetite Content Analyzer for Iron Ore Pellets based on Magnetic Properties". 06 2018.
- SILVERSIDES, K., ANDDEREK WYMAN, R. M. "Determination of rock types by spectral scanning". 2011. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US20190107483A1. US Patent 20190107483A1.
- SIXFAB. RASPBERRY PI 3G/4G <E BASE HAT, 2022. Disponível em: https://docs.sixfab.com/docs/raspberry-pi-3g-4g-lte-base-hat-introduction.
- SLAMTEC, S. RPLiDAR S1 low cost 360 degree laser range scanner introduction and datasheet, 2021. Disponível em: https://bucket-download.slamtec.com/6ba93c533dcf5e264210cae27b362359860fa682/LD601_SLAMTEC_rplidar_datasheet_S1_v1.7_en.pdf.
- SONG, J.-H., HAN, S.-H., YU, K., et al.. "Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data", *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, v. 34, n. 3/B, pp. 259–262, 2002.
- STACKOWIAK, R. Azure Internet of Things Revealed: Architecture and Fundamentals. 1 ed. New York USA, Apress, 2019. ISBN: 978-1-4842-5470-7. doi: 10.1007/978-1-4842-5470-7.
- SÜZEN, A. A., DUMAN, B., ŞEN, B. "Benchmark analysis of jetson tx2, jetson nano and raspberry pi using deep-cnn". Em: 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), pp. 1–5. IEEE, 2020.
- SÖDERBERG, E. "Object detection and avoidance using LiDAR on a hydrofoil boat". 2019. ISSN: 0280-5316. Student Paper.

- TESSIER, J., DUCHESNE, C., BARTOLACCI, G. "A machine vision approach to on-line estimation of run-of-mine ore composition on conveyor belts", *Minerals Engineering*, v. 20, n. 12, pp. 1129–1144, 2007.
- THURLEY, M. J., ANDERSSON, T. "An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation", *Minerals engineering*, v. 21, n. 5, pp. 405–415, 2008.
- TIEJUN, Z., HANG, Z., FANGANG, M., et al.. "Method for measuring volume of large irregular bulk grain pile based on dynamic three-dimensional laser scanning". 2012. Disponível em: https://patents.google.com/patent/CN102721367B>. CN Patent 102721367B.
- VÄYRYNEN, T., ITÄVUO, P., VILKKO, M., et al.. "Mass-flow estimation in mineral-processing applications", *IFAC Proceedings Volumes*, v. 46, n. 16, pp. 271–276, 2013.
- WALY, M. *Learning Microsoft Azure Storage*. 1 ed. Birmingham UK, Packt Publishing Ltd, 2017. ISBN: 978-1-78588-491-7.
- WANLI, L., BINHAI, Y. "Coal and rock identification method based on laser scanning". 2014. Disponível em: https://patents.google.com/patent/CN104134074A. CN Patent 104134074A.
- WEHR, A., LOHR, U. "Airborne laser scanning—an introduction and overview", *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 54, n. 2-3, pp. 68–82, 1999.
- WILLIAMS, R. A., LUKE, S., OSTROWSKI, K., et al.. "Measurement of bulk particulates on belt conveyor using dielectric tomography", *Chemical Engineering Journal*, v. 77, n. 1-2, pp. 57–63, 2000.
- WILLS, B. A. Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Elsevier Science and Technology Books, 2006.
- XIAO, Z., SONG, J., WU, Y. "A new method of online weighing based on non-contract measurement". Em: 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, v. 4, pp. 488–490. IEEE, 2010.
- YAN, S., YANG, G., LI, Q., et al.. "Waveform centroid discrimination of pulsed Lidar by combining EMD and intensity weighted method under low SNR conditions", *Infrared Physics & Technology*, v. 109, pp. 103385, 2020.